

FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia

Mestrado em Ciências Geofísicas

Geomagnetismo

Relatório final

Daniela Lima
Sofia Ermida
Virgílio Bento

02-01-2012

Índice

1	Susceptibilidade magnética	3
1.1	Introdução	3
1.2	Metodologia	4
1.3	Resultados	5
1.4	Conclusão	6
2	Aquisição e tratamento de curvas IRM.....	7
2.1	Introdução	7
2.2	Metodologia	8
2.3	Resultados	9
2.4	Conclusão.....	11
3	Paleomagnetismo	12
3.1	Introdução	12
3.2	Metodologia	13
3.3	Resultados	14
3.4	Conclusão.....	17
4	Bibliografia	18

1 Susceptibilidade magnética

1.1 Introdução

A magnetização total numa rocha é dada pela soma da magnetização induzida J_i e remanescente J_r :

$$J = J_i + J_r \quad (1)$$

A magnetização induzida é directamente proporcional ao campo magnético H , sendo que o parâmetro de proporcionalidade é a susceptibilidade magnética,

$$J_i = \chi H \quad \text{ou} \quad J_i = kH \quad (2)$$

que pode ser por unidade de volume $[k] = SI.cm^{-3}$ ou por unidade de massa $[\chi] = SI.g^{-1}$. A susceptibilidade magnética pode ser considerada como a capacidade de magnetização de uma substância. As expressões utilizadas acima remontam para a susceptibilidade como um escalar, o que implica que a magnetização induzida é paralela ao campo. Alguns materiais apresentam anisotropia de susceptibilidade, onde J_i não é paralelo a H . Neste caso a susceptibilidade deixa de ser um escalar passando a ser um tensor (que requer uma matriz de 3×3 para descrever completamente a física).

O valor de susceptibilidade varia em função do tipo de rocha e não é necessariamente constante para uma dada substância, podendo ser função do valor do campo H . As rochas sedimentares tendem a apresentar valores mais baixos de susceptibilidade média, ao passo que as ígneas os valores mais altos. Para um tipo de rocha particular, a susceptibilidade varia em função de vários aspectos: composição e concentração de minerais de ferro, tamanho de grão e temperatura. Existem 3 tipos de comportamentos magnéticos diferentes na natureza, sendo eles o dia, para e ferromagnetismo. Uma substância diz-se diamagnética (Figura 1.1.a) quando tem uma susceptibilidade magnética χ negativa, i.e., a magnetização induzida na substância pelo campo \vec{H} tem direcção contrária à do campo. A magnetização reduz-se a zero quando o campo é removido. Uma rocha diz-se paramagnética (Figura 1.1.b) quando apresenta uma susceptibilidade magnética macroscópica positiva, i.e., a magnetização induzida na substância pelo campo \vec{H} tem a mesma direcção que o campo aplicado. Uma rocha diz-se ferromagnética quando existe magnetização espontânea, mesmo na ausência de um campo externo. O seu comportamento pode ser caracterizado por uma curva de histerese (Figura 1.1.c). Para rochas ferromagnéticas, quando o campo \vec{H} volta a zero, a rocha guarda uma magnetização residual denominada magnetização remanescente J_r .

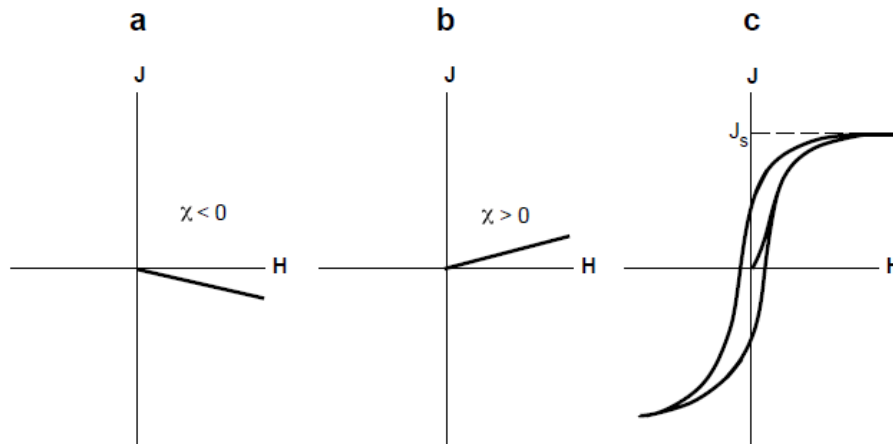


Figura 1.1 - Magnetização em função do campo para uma substância a) diamagnética, b) paramagnética e c) ferromagnética.

1.2 Metodologia

Foi medida a susceptibilidade magnética ao longo do percurso marcado na Figura 1.2.



Figura 1.2 - Percurso tomado para medir a susceptibilidade magnética, no Campo Grande.

O percurso foi feito entre o jardim do edifício C8 da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e o jardim da Universidade Lusófona, no Campo Grande, Lisboa. Neste troço existem 3 estradas (uma secundária e duas avenidas), e um campo de ténis onde não foram recolhidos dados.

A susceptibilidade foi medida utilizando o equipamento *KT-6 Kappameter*. Os dados obtidos foram posteriormente comparados com os dados obtidos utilizando outro método

de medição (*susceptometro KLY-2*) no ano anterior. Estes últimos dados foram corrigidos tendo em conta que o aparelho faz a medição considerando que a amostra tem um volume de 10 cm^3 , utilizando para tal a massa das amostras, de acordo com a seguinte equação:

$$\chi_{corr} = \chi \frac{V}{10}$$

Em que $V = m/\rho$ tem unidades de cm^3 e ρ é a densidade média do solo, sendo utilizado o valor de 1.3 g cm^{-3} .

1.3 Resultados

A Figura 1.3A mostra os resultados obtidos neste trabalho e a Figura 1.3B os resultados do ano passado. Comparando os dois gráficos, observa-se que existem discrepâncias significativas.

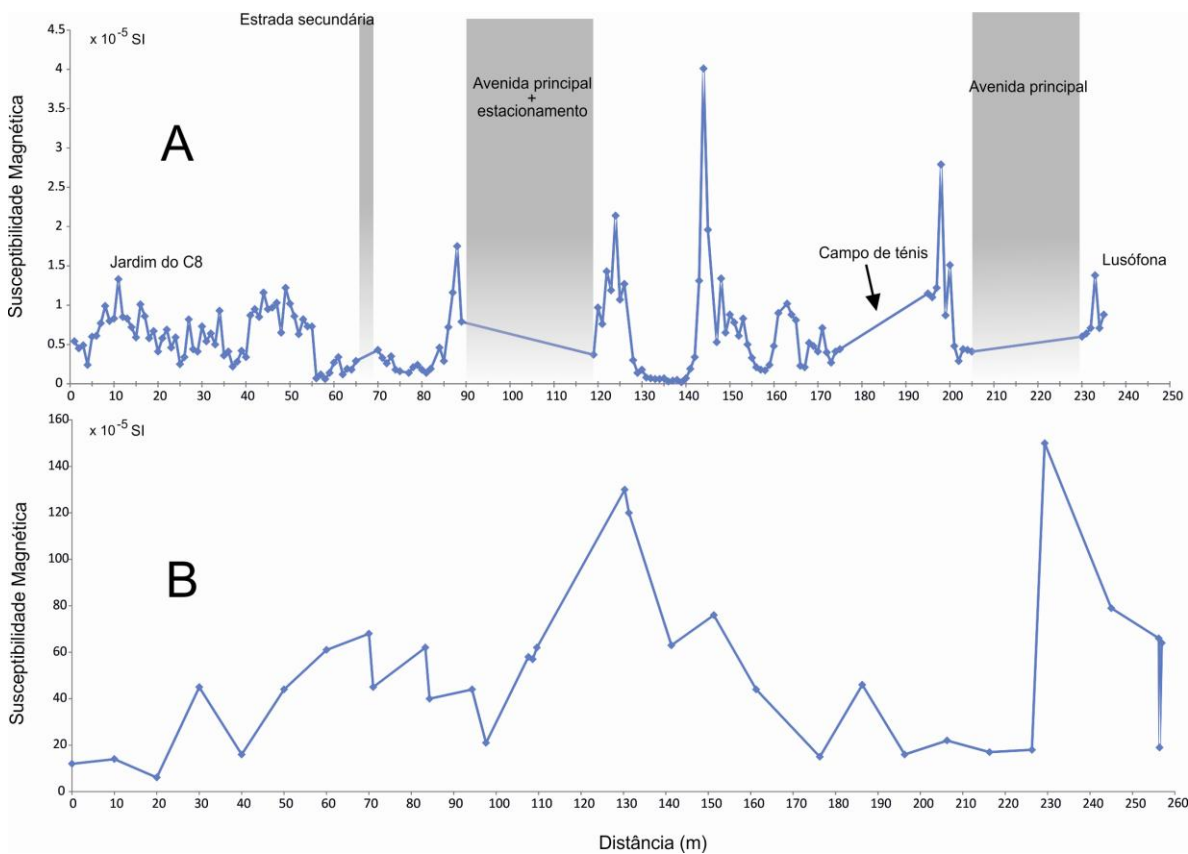


Figura 1.3 - Susceptibilidade magnética medida no percurso deste ano (A), e no ano passado (B).

1.4 Conclusão

Observando a Figura 1.3B é possível verificar uma correspondência entre as fontes de poluição (estradas) e os picos de susceptibilidade magnética. Assim, a susceptibilidade magnética será, *a priori*, um bom indicador qualitativo da poluição de um dado local.

Neste estudo isto não se verifica muito provavelmente devido a erros de utilização do equipamento. Primeiro, note-se que nas medições efectuadas no ano anterior foi removida das amostras toda a vegetação, que é diamagnética, o que não ocorre na medição com o KT-6, podendo por isso influenciar a medição. Para além disso, não foi observado que tipo de materiais estavam presentes na camada de 20 mm de alcance do aparelho.

Apesar de tudo, à excepção do pico a cerca de 145 m de distância do edifício C8 da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, existe uma tendência para o aumento da susceptibilidade perto das estradas, seguido de uma ligeira diminuição que pode ser devida à maior circulação de peões, que provocam erosão das partículas de combustão mais perto da estrada.

2 Aquisição e tratamento de curvas IRM

2.1 Introdução

Uma substância ferromagnética irá manifestar uma certa magnetização se lhe for aplicado um campo magnético H . Se essa substância estiver inicialmente desmagnetizada e se o campo magnético a que está sujeita for aumentando progressivamente, obtém-se uma curva designada *Curva de histerese* (Figura 2.1).

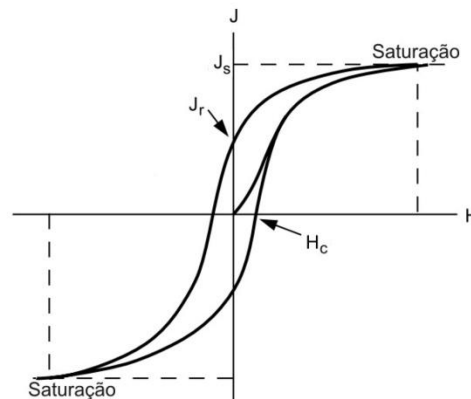


Figura 2.1 - Curva de Histerese para uma substância ferromagnética. J é a magnetização e H é a intensidade do campo magnético. J_s é a magnetização de saturação, J_r é a magnetização remanescente e H_c é a coercividade.

Para baixos valores de H , observa-se reversibilidade, ou seja, se se diminuir a intensidade do campo obtém-se a mesma curva. Para valores mais elevados, a reversibilidade já não se observa e obtém-se uma curva diferente quando é diminuído o campo, e a substância adquire uma magnetização remanescente, i.e. a substância continua a ter magnetização sem que lhe esteja aplicado algum campo magnético.

A magnetização remanescente isotérmica (IRM) refere-se à magnetização remanescente que provém da aplicação de um forte campo magnético (H) a temperatura constante, num curto período de tempo. Após a indução, a magnetização remanescente decai exponencialmente com o tempo e portanto é instável (Figura 2.2). Contudo, é um processo vantajoso devido à sua rapidez de execução e pelo facto de a amostra ser preservada.

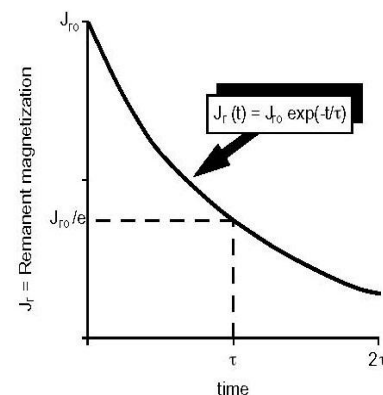


Figura 2.2 - Relaxação magnética para uma amostra ferromagnética.

A partir das curvas de aquisição de IRM é possível obter duas características relevantes dos minerais: a IRM de saturação (SIRM) e a coercividade remanescente, H_{cr} .

Para cada substância ferromagnética e cada temperatura, existe um valor de SIRM. A magnetização de saturação diminui quando a temperatura absoluta aumenta, anulando-

-se na temperatura de Curie característica da substância ferromagnética. A coercividade é o valor do campo aplicado para o qual a IRM se anula.

A forma da curva (côncava ou convexa) informa também sobre o tamanho de grão, *MultiDomain* ou *SingleDomain* (MD e SD, respectivamente). Quando um grão ferromagnético é magnetizado, verifica-se que a distribuição dos dipolos magnéticos elementares no seu interior tem tendência a se rearranjar de modo a ser alcançado o estado de menor energia magnetostática. Tal é alcançado através da criação de domínios magnéticos dentro dos quais a direcção da magnetização apresenta uma direcção consistente, e que estão separados uns dos outros por paredes, que se podem rearranjar, com algumas limitações, em função da sua magnetização. Nos materiais com grãos muito pequenos não há lugar à formação de paredes, são SD. O comportamento SD é caracterizado pela “facilidade” que a substância tem em adquirir e perder a magnetização do campo que lhe é aplicado. Os grãos MD são mais difíceis de remagnetizar, sendo que a sua magnetização persiste tanto mais tempo quanto maior for a dimensão do grão.

As curvas de aquisição de IRM podem ser representadas por uma função Log-Gaussian tipo cumulativo (*Robertson & France, 1994*). Decompondo a curva IRM em diferentes curvas LGC, que são função da SIRM, coercividade média e índice de dispersão, é possível diferenciar a composição mineralógica do material.

2.2 Metodologia

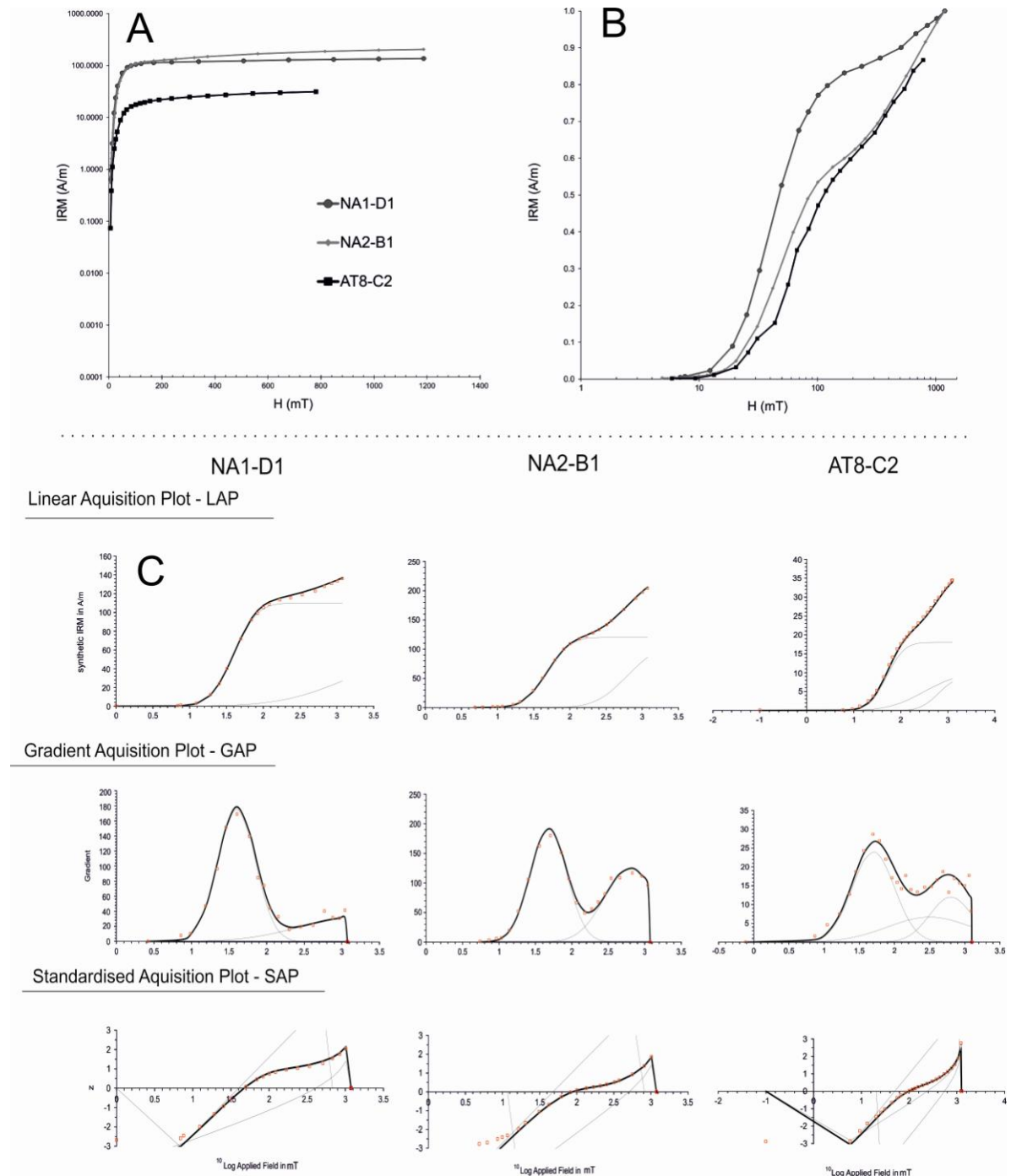
Experimentalmente, a curva IRM de um material é obtida aplicando um campo magnético com diferentes intensidades (crescentes) e medindo a respectiva magnetização, até atingir a saturação. Neste caso, aplica-se um campo até cerca de 1200 mT.

As curvas são posteriormente tratadas, usando o LAP-GAP-SAP (*Kruiver et al., 2001*) de forma a caracterizar as diferentes fases magnéticas presentes na amostra. Este método consiste no ajuste das curvas de IRM em função do logaritmo do campo magnético aplicado, com a curva de IRM numa escala linear (LAP), com a curva de IRM expressa como um gradiente (GAP), e com a curva de IRM expressa numa escala de probabilidade (SAP). Mesmo que a amostra não atinja a saturação, é possível definir as suas propriedades magnéticas, ainda que com maior incerteza. O número de componentes magnéticas necessário para um melhor ajuste da curva de IRM é obtido estatisticamente. O método baseia-se principalmente nas diferenças de coercividade para identificar os diferentes componentes, pelo que não é adequado para amostras cujos minerais possuam coercividades semelhantes.

Neste trabalho foram estudadas as amostras NA2-B1, NA1-D1 e AT8-C2.

2.3 Resultados

Os resultados do ajuste das curvas IRM aos dados são apresentados na Tabela 2.1. A Figura 2.3 apresenta as curvas de IRM obtidas e as relações entre os vários parâmetros obtidos.



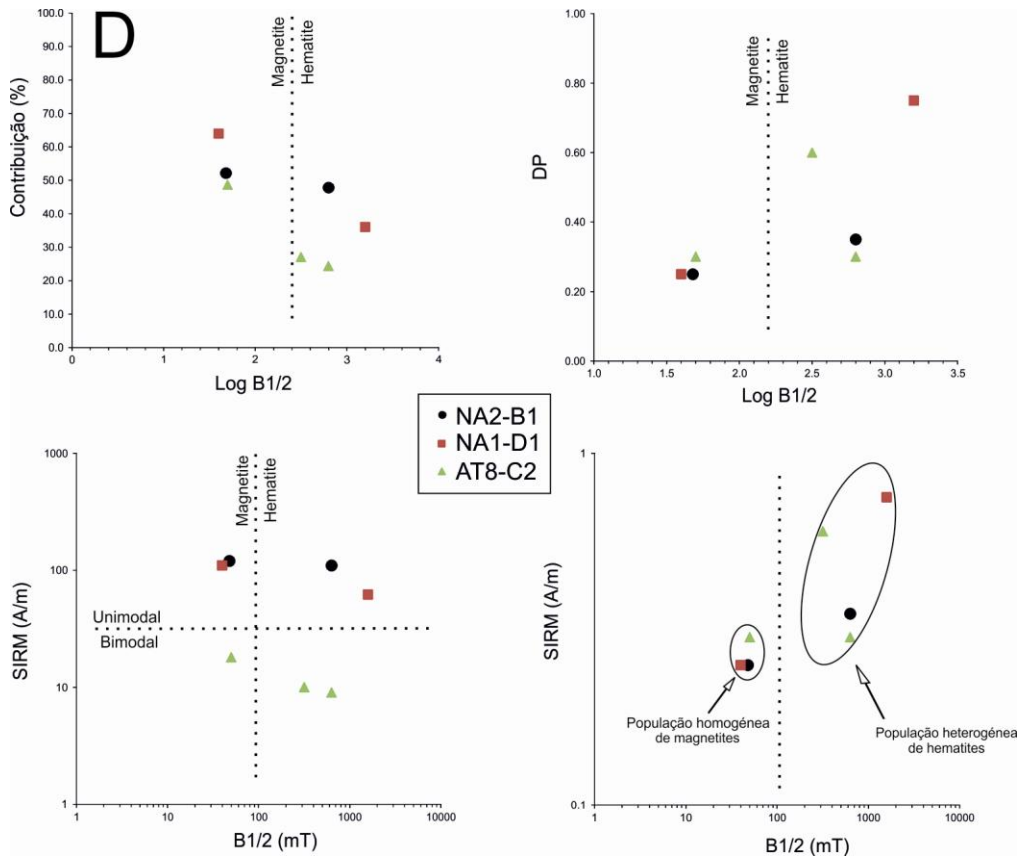


Figura 2.3 - Ajuste das curvas IRM e relação entre os diferentes parâmetros.

Tabela 2.1 - Resultados da análise de componentes em curvas IRM.

NA2-B1				
	SIRM (A/m)	B _{1/2} (mT)	DP (mT)	Contribuição (%)
Componente 1	120	47.9	0.25	52.2
Componente 2	110	631.0	0.35	47.8
NA1-D1				
	SIRM (A/M)	B _{1/2} (mT)	DP (mT)	Contribuição (%)
Componente 1	110	39.8	0.25	64.0
Componente 2	62	1584.9	0.75	36.0
AT8-C2				
	SIRM (A/M)	B _{1/2} (mT)	DP (mT)	Contribuição (%)
Componente 1	18	50.1	0.30	48.6
Componente 2	9	631.0	0.30	24.3
Componente 3	10	316.2	0.60	27.0

2.4 Conclusão

Na Figura 2.3D podemos observar a presença de uma componente de hematite e uma de magnetite em todas as amostras. Nas amostras NA2-B1 e NA1-D1 ambas as componentes são unimodais, enquanto que na amostra AT8-C2 as componentes são bimodais. A população de magnetites é homogénea e a população de hematites é heterogénea, podendo indicar que houve alguma oxidação desta componente.

3 Paleomagnetismo

3.1 Introdução

A amostragem para este estudo foi realizada em afloramentos utilizando uma furadeira com brocas diamantadas e lubrificadas a água.

A orientação das amostras no local é de grande importância pois permite obter a orientação do campo magnético. A orientação do campo magnético é completamente determinada por duas componentes: a inclinação I , que é o ângulo entre o vector e o plano horizontal, e a declinação D , que é o ângulo entre o norte geográfico e a componente horizontal do campo. A orientação das amostras é feita utilizando uma bússola magnética.

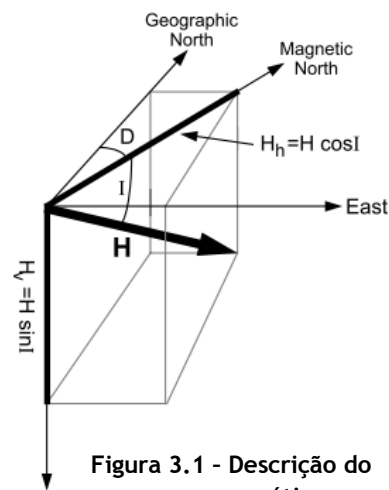


Figura 3.1 - Descrição do campo magnético.

As amostras são marcadas de forma a facilmente identificar a sua orientação. No topo é marcada uma seta que indica a direcção a partir da qual é medida a declinação. Esta seta é expandida para a lateral do cilindro por uma linha recta cruzada por pequenas linhas de modo a que estas apontem para o topo do cilindro. Uma segunda marcação lateral é adicionada de modo a poder distinguir a ordem dos diferentes cilindros que vão ser obtidos a partir da amostra.



Figura 3.2 - Marcação das amostras.

Durante o processo de formação de uma rocha é gravada uma certa magnetização. Esta magnetização é designada por magnetização remanescente natural (NMR). No entanto, a rocha pode adquirir uma magnetização secundária, que resulta da formação de novos minerais magnéticos na presença de um campo magnético por alteração dos minerais magnéticos preexistentes, por exemplo. Para o caso dos grãos monodomínio (*Single Domain* SD) de uma substância ferromagnética, o tempo de relaxação está relacionado com a força coerciva pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{vH_c J_s}{2kT}\right) \quad (3)$$

Onde C é o factor de frequência, 10^8 s^{-1} , v é o volume dos grãos monodomínio, H_c é a coercividade dos grãos monodomínio, J_s é a magnetização de saturação e kT é a energia térmica.

Um dos métodos para eliminar a magnetização secundária adquirida pela rocha consiste na aplicação de campos alternados (AF). Este método baseia-se no seguinte: ao colocar uma amostra num campo magnético alternado, de amplitude H , todos os domínios com

força coerciva inferior a $H \cos(\theta)$, em que θ é o ângulo entre H e a força coerciva, H_c , seguirão a direcção do campo indutor. Se diminuirmos, progressivamente, a amplitude de H , os domínios com força coerciva menor ficarão orientados.

Ao aplicarmos este método a uma amostra, é necessário medir o valor da magnetização remanescente natural passo a passo, até atingir um valor máximo de 100 mT . A contribuição de todos os grãos que possuam uma força coerciva menor que o valor máximo de desmagnetização é destruída, preservando a magnetização remanescente natural dos grãos cuja força coerciva é maior que o valor máximo de desmagnetização.

Para além deste método, existe a desmagnetização térmica que actua nas temperaturas de Curie dos minerais ferromagnéticos.

3.2 Metodologia

As amostras foram recolhidas num local de Paço d'Ilhas, de coordenadas $38^{\circ}59'54.3'' \text{ N}$ e $9^{\circ}24'1.9'' \text{ O}$. Foram retiradas 13 amostras cuja distribuição é indicada na Figura 3.4.

As mostras foram desmagnetizadas aplicando um campo alternado e medindo a sua susceptibilidade magnética a cada passo da desmagnetização. Os dados foram posteriormente tratados utilizando o programa Remasoft.

Foram calculados os vectores médios das amostras J1, F4 e E2. Utilizando os vectores médios de todas as amostras, foi possível calcular o vector médio do local. A partir deste foi calculado o pólo magnético médio.



Figura 3.3 - Afloramento em Paço d'Ilhas.

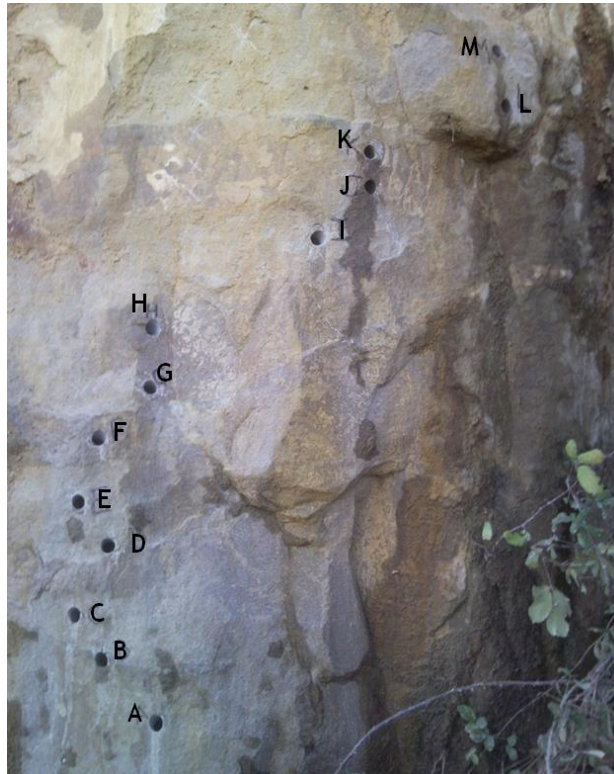


Figura 3.4 - Distribuição das amostras no afloramento.

3.3 Resultados

A Tabela 3.1 mostra a orientação das amostras e a sua distância à amostra A.

Tabela 3.1 - Orientação das amostras.

Amostra	D (°)	I (°)	d (cm)
PI11.A	256	64	0
PI11.B	261	75	12
PI11.C	271	78	21
PI11.D	243	69	35
PI11.E	255	80	44
PI11.F	222	65	57
PI11.G	224	65	68
PI11.H	212	63	81
PI11.I	212	72	98
PI11.J	212	87	109
PI11.K	215	82	117
PI11.L	206	77	129
PI11.M	207	63	142

A Figura 3.5 apresenta o resultado da desmagnetização e o vector médio das amostras J1, F4 e E2.

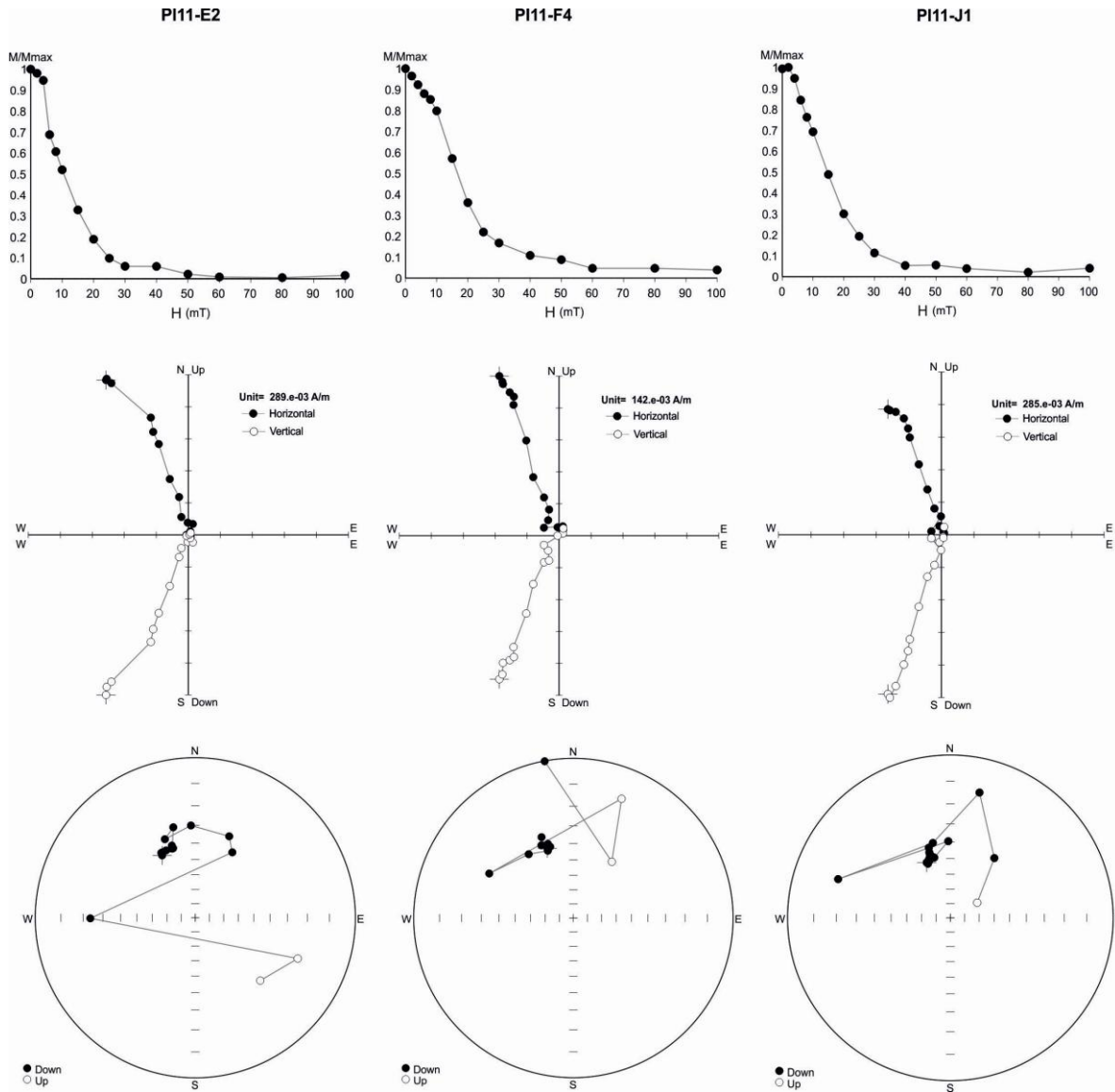


Figura 3.5 - Curva de desmagnetização (painéis de cima), projecção ortogonal (painéis do meio) e projecção estereográfica (painéis de baixo) para as amostras PI11-E2, PI11-F4 e PI11-J1.

A Figura 3.6 mostra o vector médio do local calculado a partir dos vectores médios de todas as amostras e os parâmetros estatísticos obtidos. A Figura 3.7 apresenta a localização do pólo calculada com base no vector médio do local.

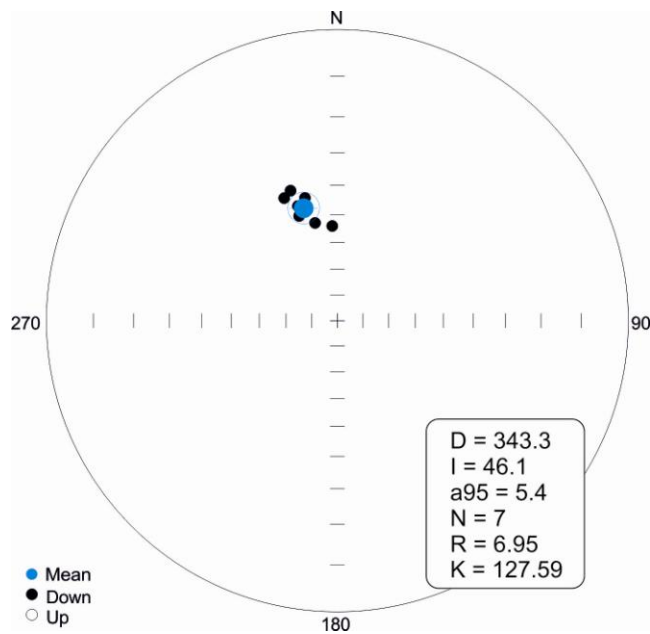


Figura 3.6 - Projecção estereográfica dos vectores médios de todas as amostras e média.

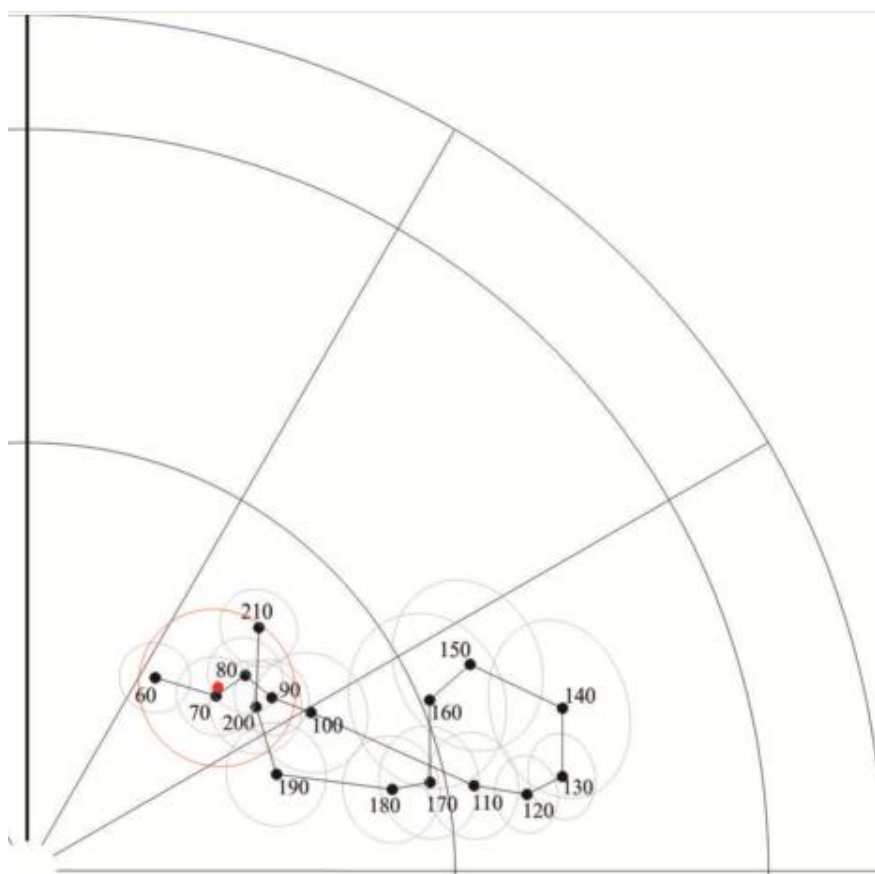


Figura 3.7 - Localização do pólo médio calculado (vermelho) em relação ao APWP (Representação apenas do 1º quadrante da projecção estereográfica).

3.4 Conclusão

Os resultados obtidos apontam para uma idade das amostras de cerca de 70 Ma, relativamente ao APWP em coordenadas da África do Sul (*Torsvik et al, 2008*). Na Figura 3.6, encontrou-se o vector médio calculado utilizando estatísticas Fisherianas. Pelas estatísticas presentes nesta figura, verifica-se que os parâmetros se encontram dentro do razoável.

4 Bibliografia

Butler, R.F., 2004. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. *Electronic Edition*.

Kruiver, P.P., Dekkers, M.J., Heslop, D., 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analyses of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth and Planetary Science Letters*, **189**, 269-276.

Miranda, J.M., 2011. *Introdução ao Geomagnetismo*. Unpubl. notes, FCUL, Lisboa.

Trindade, R., Font, E., D'Agrella-Filho, M.S., Nogueira, A., Riccomini, C., 2003. Low-latitude and multiple geomagnetic reversals in the Neoproterozoic Puga cap carbonate, Amazon craton. *Terra Nova*, **15**, 441-446.

Font, E., Nascimento, C., Omira, R., Baptista, M.A., Silva, P.F., 2010. Erratum to identification of tsunami-induced deposits using numerical modeling and rock magnetism techniques: A study case of the 1755 Lisbon tsunami in Algarve, Portugal. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **182**, 187-198.

Desenfant, F., Petrovský, E., Rochette, P., 2004. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: case study from south France. *Water, Air and Soil Pollution*, **152**, 297-312.

Robertson, D.J., France, D.E., 1994. Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetization acquisition curves. *Phys. Earth planet Inter.*, **84**, 223-234.

Torsvik, T.H., Muller, R.D., Van der Voo, R., Steinberger, B., Gaina, C., 2008. Global Plate Motion Frames: Toward A Unified Model. *Reviews Geophysics*, **46**, RG3004, doi:10.1029/2007RG000227.