



FACULDADE • DE • CIÊNCIAS UNIVERSIDADE • DE • LISBOA

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia

Geomagnetismo – Professor Doutor Eric Font

Paleomagnetismo



Relatório realizado por:

Joana Santos, nº 40537

Manuel Nascimento, nº 38875

Introdução

Este trabalho teve como objectivo determinar a idade de um *sill*, com uma idade previamente estabelecida em cerca de 90 milhões de anos (Ma), situada na Lomba dos Planos (Fig.3) através do cálculo das coordenadas do Pólo Paleomagnético Virtual.

Um *sill* é uma formação rochosa de origem sedimentar ou metamórfica que sofre uma intrusão magmática. Esta intrusão aconteceu por ascendência de material, devido à sua baixa densidade, e que solidificou horizontalmente ao longo da estratificação anterior. Ao arrefecer e atingir a temperatura de Curie dos seus componentes, gravou a magnetização do campo terrestre da altura. O *sill* que analisamos estava disposto praticamente horizontalmente em relação ao solo logo não houve a necessidade de fazer um *bedding correction*.

O Paleomagnetismo tem como base principal o estudo do magnetismo das rochas. O estudo desse magnetismo tem implicações na correlação estratigráfica (magnetoestratigrafia), datação relativa, reconstrução dos movimentos da litosfera e no comportamento do campo magnético terrestre na época de formação da rocha. Uma vez que a magnetização das rochas reproduz de uma forma complexa o campo magnético da Terra na altura da sua formação ou transformação posterior, podemos estudar esse campo medindo com rigor a magnetização das diferentes formações geológicas.

No entanto, ao medir a magnetização das amostras de rocha podemos estar a integrar várias componentes: a magnetização primária, que é a magnetização remanescente natural adquirida no processo de formação da rocha, e as magnetizações secundárias adquiridas após a formação da rocha. Uma das tarefas fundamentais do paleomagnetismo é a separação adequada destas componentes. Além disso, porque a influência do campo magnético terrestre é apenas uma das possíveis causas de magnetização remanescente primária, é necessário ainda analisar as componentes de várias amostras da mesma rocha, mas separadas fisicamente entre si, e calcular a sua média, de modo a obter um vector comum a todas as amostras.

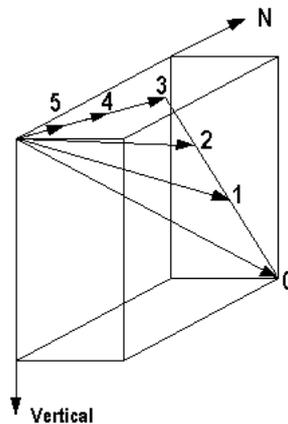


Figura 1 - Esquema de desmagnetização de uma amostra, onde se evidenciam uma componente secundária (0-3) e uma componente primária (3-5).

Um dos processos de eliminação das magnetizações secundárias consiste na aplicação de campos magnéticos alternados. A desmagnetização AF depende da coercividade das substâncias presentes nas amostras. Consiste na aplicação de um campo magnético alternado de intensidade inicial H_{AF} , que vai diminuindo até se anular. Assumindo que as partículas de coercividade menor que H_{AF} terão coercividades diferentes entre si, a aplicação do campo alternado decrescente resultará então em cerca de metade dos grãos orientados para um lado

e os restantes para o outro, resultando efectivamente na anulação da magnetização, ou na soma dos momentos, dessas partículas.

Os dados obtidos após a desmagnetização térmica ou em campo alternado são tratados de modo a isolar as diferentes componentes magnéticas presentes na amostra. Este processo é baseado no método de Análise em Componente Principais usando estatística de Fisher. Esta estatística é controlada por uma série de parâmetros, nomeadamente α_{95} (intervalo de confiança da média), N (número de amostras), R e k (parâmetros de dispersão).

Chamam-se pólos virtuais geomagnéticos às coordenadas geográficas onde, em média, se deverão ter localizado os polos magnéticos da Terra, na altura de aquisição de magnetização remanescente por uma determinada rocha, e em que admitimos que o campo magnético terrestre pode em média ser representado pelo modelo do dipolo axial geocêntrico.

As amostras de rocha recolhidas no ponto S de coordenadas φ_s, λ_s adquiriu uma intensidade de magnetização **M**, na altura da sua formação, com ângulos de inclinação **I** e declinação **D**.

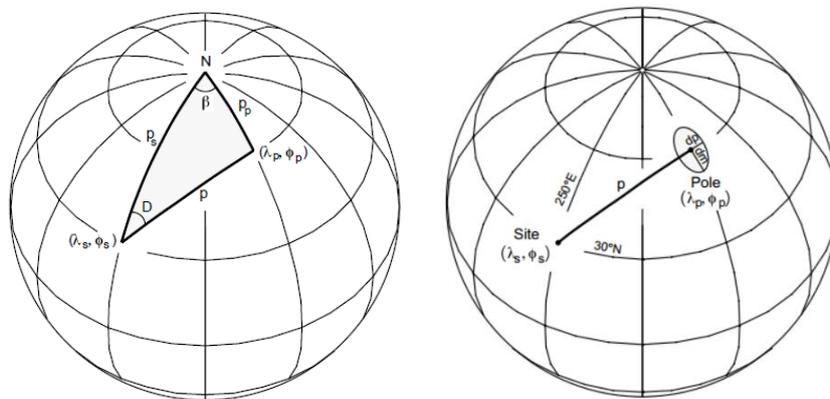


Figura 2 - Determinação das coordenadas do pólo paleomagnético. Nesta representação λ representa a latitude e ϕ a longitude. A elipse de confiança tem como valores de semi-eixos d_p e d_m .

Através da equação do dipolo e, admitindo que o campo magnético da Terra é semelhante ao campo de um dipolo cujo eixo coincide com o eixo de rotação da Terra, e localizado no seu centro, podemos estabelecer uma relação entre a inclinação do campo num ponto e a sua latitude magnética.

$$\cot \theta = \frac{1}{2} \operatorname{tg} I$$

Para a determinação da latitude do Pólo Paleomagnético Virtual usamos a lei dos cosenos e obteve-se:

$$\sin \lambda_p = \sin \lambda_s \cos \theta + \cos \lambda_s \sin \theta \cos D$$

O próximo passo consiste em determinar o ângulo correspondendo a diferença de longitude entre o pólo magnético e o local de amostragem. Aplicando a lei dos senos no triângulo esférico, obtemos:

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{\sin D}{\cos \lambda_p} \sin \theta\right)$$

Existe contudo uma ambiguidade na determinação da longitude do pólo magnético devido ao facto de que tanto β ou $\pi - \beta$ satisfazem a equação anterior, então:

Se $\cos \theta \geq \sin \lambda_p \sin \lambda_s$, a longitude do pólo é $\phi_p = \phi_s + \beta$
 Se $\cos \theta \leq \sin \lambda_p \sin \lambda_s$, a longitude do pólo é $\phi_p = \phi_s + (\pi - \beta)$

Para avaliar a qualidade do cálculo de um polo paleomagnético, estabeleceu-se um parâmetro denominado: o factor Q. O factor Q é assim baseado em 7 criterios estabelecidos por Van Der Voo:

1. Idade bem definida da rocha e presunção de que a magnetização é da mesma idade
2. Quantidade suficiente de amostras: $N > 24$, $k \geq 10$ e $\alpha_{95} \leq 16$
3. Desmagnetização adequada incluindo a análise em componentes principais
4. Testes de consistência que constroem a idade da magnetização
5. Controlo estrutural e coerência tectónica com o craton ou os blocos envolvidos
6. Presença de inversões
7. Não ter similaridades com pólos de idade mais recentes

Procedimento e resultados

No dia 19 de Novembro de 2013 deslocámo-nos até ao local de Casal dos Pianos para obter amostras do *sill*.

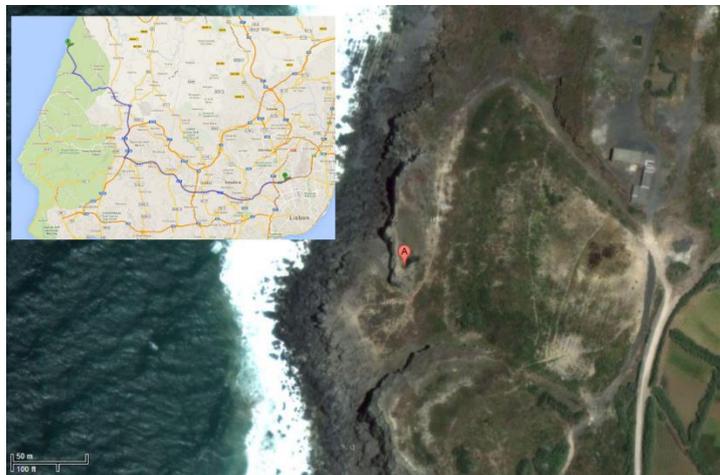


Figura 3 - Lomboa dos Pianos

As amostras, sob a forma de cilindros, foram recolhidas com auxílio de uma caroteadora improvisada por uma broca circular diamantada, ligada a uma moto-serra e a uma bomba de água, que serviria para arrefecer e lubrificar a lâmina, prevenindo assim fracturas nos cilindros. De notar que antes de se iniciar cada furo, era feito uma primeira marca na rocha para que se pudesse identificar o topo do cilindro, depois de retirado.



Figure 4 - Furos no sítio 13.

Depois de feito o furo, e antes de retirar o cilindro, inseriu-se o orientador de modo a que o mostrador no topo estivesse completamente horizontal, com a bolha de nível bem centrada. Determinaram-se então as declinações geográfica e solar (esta quando possível) e, com o transferidor lateral, a inclinação do furo, marcando ainda o topo do cilindro com uma caneta permanente azul (porque canetas vermelhas poderiam conter pigmentos de hematite) ou com um arame de cobre quando necessário.



Figure 5 - Orientador em posição.

Finalmente, utilizando uma chave de fendas para partir a base do cilindro, e uma ferramenta de pesca como gancho improvisado, retirando-o da rocha, e marcando-se o topo, indicando a sua direcção, de acordo com a figura, assim como o seu nome em vários locais do cilindro. Este é definido pelas iniciais do local, LP, por um número indicador da rocha de onde foi retirado o cilindro, e uma letra que diferenciava zonas distintas da mesma rocha.

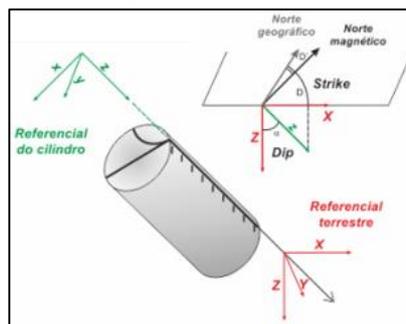


Figura 6 - Marcação no local.

Retirámos nove cilindros do local. De notar que a falta de declinação solar para muitos deles não tem grande efeito, dado que a rocha mãe era pouco magnética e, portanto, a medição por meio de bússola é suficiente.

Tabela 1 - Cilindros retirados e os seus dados.

Cilindro	Declinação (°)	Inclinação (°)	Dec. Solar (°)	Hora
LP10A	102	82	76	14:07
LP10B	112	70	84	14:20
LP10C	104	80	72	14:30
LP11A	261	56	N/A	N/A
LP11B	255	64	N/A	N/A
LP12A	281	70	N/A	N/A
LP12B	272	74	N/A	N/A
LP13A	274	76	N/A	N/A
LP13B	271	83	N/A	N/A

De volta ao laboratório de Paleomagnetismo, transformámos os cilindros de modo a obter amostras de tamanho suficiente para os aparelhos de medição a utilizar, também cilindros com dimensões de 25,4 mm de altura e 22 mm de diâmetro. Foi utilizada para isso uma lâmina diamantada dupla com as dimensões correctas, a qual se limpou e se encheu de água para, novamente, a arrefecer e lubrificar, mas antes ainda se colaram os cilindros que estavam partidos, marcando o nome repetidas vezes e traçando rectas como se vê na figura, para reter a posição relativa das amostras depois de cortadas.



Figura 7 - Lâmina dupla e suporte para o cilindro. Notar as marcas neste.

De notar que se retiraram os topos de cada cilindro porque estes, estando junto à superfície, estavam mais sujeitos a induções naturais. Feito o corte, identificaram-se as novas amostras adicionando ao nome um número respectivo à posição relativamente ao cilindro original, com 1 representando o topo e 2 ou 3 a base. Além disso, marcou-se ainda uma seta auxiliar na face circular numa das bases circulares da amostra que permite redefinir o seu topo,

com o auxílio das marcações anteriores. Finalmente, embrulhámos as amostras em película aderente, para evitar danos de poeiras e resíduos nos aparelhos de medição a utilizar, e guardámos todas dentro de um cilindro de metal para evitar interferências magnéticas enquanto não eram realizados os testes seguintes.

Para analisar as componentes primária e secundária da magnetização remanescente, é necessário medir a magnetização remanescente por passos, isto é, desmagnetizando depois de cada medição os minerais de coercividade crescente. Para medir essa magnetização foi usado um magnetómetro rotativo JR6 Spinner, que induzia rotação na amostra e, estando esta dotada de um campo magnético, produzia um campo eléctrico numa bobina do aparelho, que podia ser medido e, portanto, calculada então a magnetização da amostra, em forma vectorial, isto é, nas suas componentes XYZ, utilizando o programa Rema6W, tentando obter valores de erro inferiores a 5% e 5°. De notar que foram também introduzidas a inclinação e a declinação geográfica de cada amostra no programa de modo a obter os valores reais das componentes, já que, no laboratório, a análise não tomava em conta a orientação da amostra na rocha-mãe. Foi depois usado um desmagnetizador em campo alternado LDA-3A.

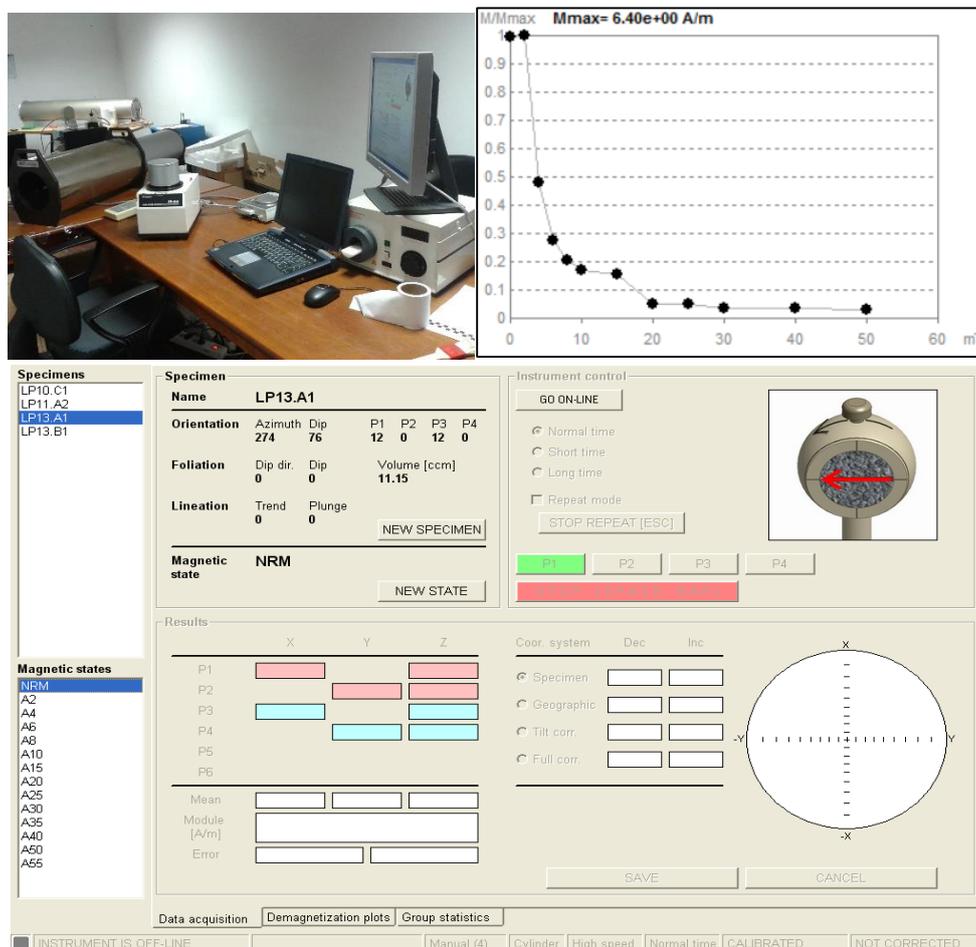


Figure 8 - Laboratório de Paleomagnetismo, exemplo de análise da amostra LP13B1 e interface do Programa Rema6W.

As desmagnetizações, de valores entre 2 a um máximo de 100 mT como mostrado na figura acima, foram efectuadas até se atingir um patamar em que não havia diferença na

magnetização remanescente da amostra, indicador que já não haveria grande concentração de materiais mais coercivos. Feito este procedimento para duas amostras, juntámos ainda mais quatro análises de outras amostras, realizados pelos colegas de turma, das quais uma era inutilizável. Com estas cinco análises, utilizámos o programa informático REMASOFT 3.0 para obter os valores das componentes principais e secundárias usando estatística de Fisher.

Tabela 2 - Componentes principais das amostras e respectivo desvio angular máximo (MAD)

Amostra	Declinação (°)	Inclinação (°)	MAD (°)
LP10A1	357.4	41.8	6.4
LP10B1	346.8	47.4	8.3
LP10C1	343.5	46.0	6.9
LP13A1	336.4	44.1	7.1
LP13B1	350.3	41.7	8.3

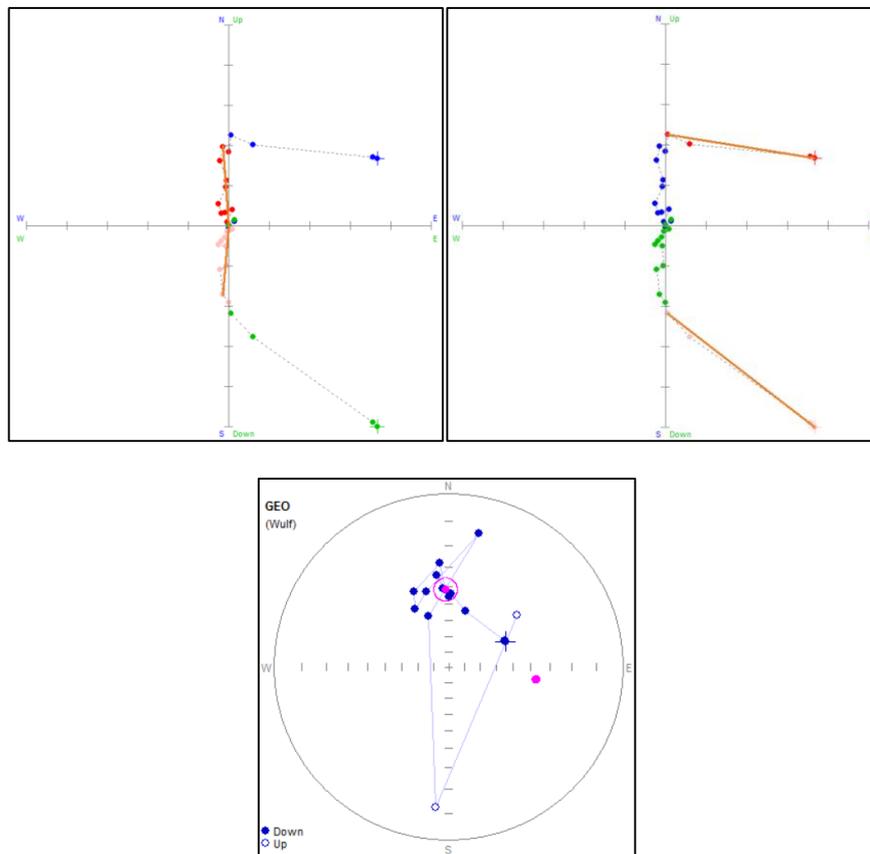


Figura 9 – Análise em componentes principais da amostra LP10A1, em diagramas de Zijderveld e em representação estereográfica.

Com a análise de componentes principais realizadas para todas as amostras, foi então calculado um vector médio, com declinação de 347.0°, inclinação de 44.4°, que correspondem aos do campo magnético terrestre na altura da formação da rocha. Esta estatística, com cinco amostras (N = 5), resultou num α_{95} de 5.8°, um k de 172.18 e um R de 4.98.

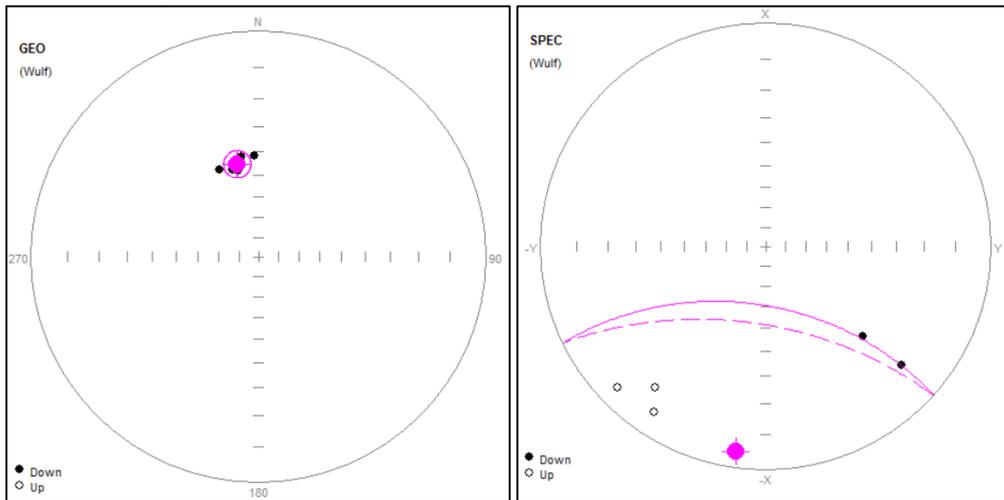


Figura 10 - Vector médio das componentes principais das amostras. Com e sem a influência da declinação e da inclinação geográficas da amostra, para comparação.

Utilizando geometria esférica e a lei dos cosenos, é então possível obter o valor da posição do pólo paleomagnético relativamente ao pólo actual:

VGP											
Site Lat	<input type="text" value="38.8937"/>	Site Lon	<input type="text" value="-9.438251"/>	<input type="button" value="Recalculate"/>							
Pole Lat	73.2°	Pole Lon	-145.2°	PaleoLat	26.1°	dp	4.6°	dm	7.4°	ASD	7.3
	-73.2°		34.8°		-26.1°			Name	<input type="text"/>	<input type="button" value="Save"/>	

Figura 11 - Posição do palepólo virtual utilizando as coordenadas da Lomba dos Pianos.

Para se poder estabelecer a idade da amostra, é agora necessário comparar a sua posição, que se admite ser semelhante à de toda a Península Iberica, com a base de dados internacional, que mostra a posição da mesma placa ao longo do tempo. Como esta está projectada no plano equatorial como visto do Pólo Sul, é também necessário representar o nosso pólo paleomagnético nessa projecção. Para isso, foi utilizado o programa GEMAP2012, onde se introduziram as coordenadas dadas na segunda linha da figura 11, latitude de -73.2° e longitude de 34.8°, respectivas ao Pólo Sul, e a elipse de confiança é dada por uma longitude dp de 4.6° e uma latitude dm de 7.4°. Para o intervalo de confiança, α_{95} , foi considerada a média de ambos esses parâmetros, ficando então com um valor de 6°.

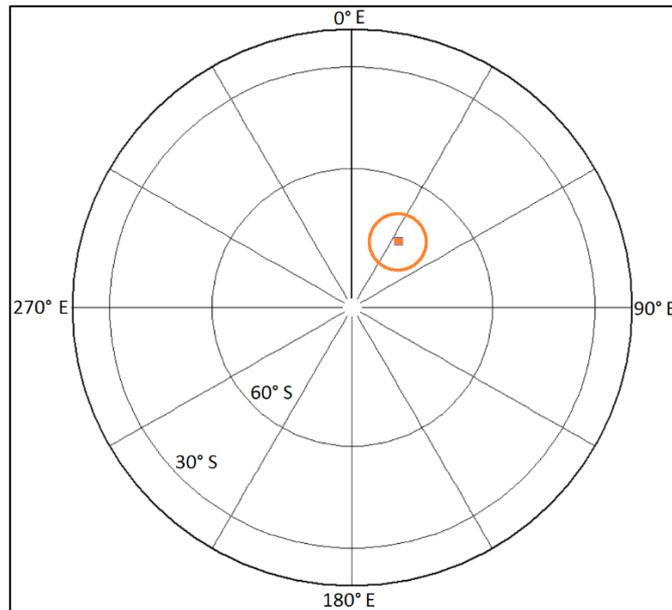


Figura 12 - Posição do pólo paleomagnético virtual da Lomba dos Pianos.

Os dados utilizados para comparação foram fornecidos, tratando-se de uma grande quantidade de pólos paleomagnéticos da Península Ibérica obtidos em estudos feitos em vários locais, formando assim uma curva da deriva polar da Ibéria. Sobrepondo o pólo de Lomba dos Pianos a estes, podemos já ter uma ideia da idade do *sill*, de cerca de 90 Ma. De notar que, tratando-se da mesma placa, não foi necessário proceder a uma rotação de Euler.

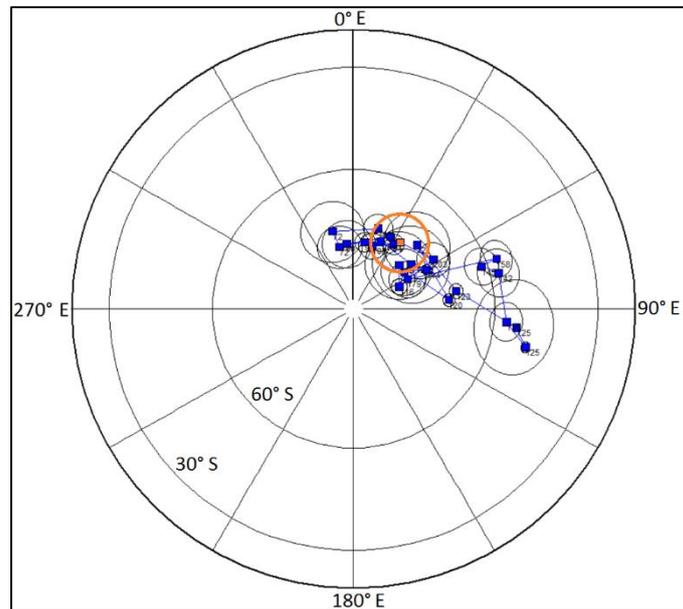


Figura 13 - Pólo paleomagnético da Lomba dos Pianos (laranja) e os vários pólos da Ibéria.

Para uma comparação visual melhor, foi também usada uma representação de vários pólos paleomagnéticos da Ibéria que consiste em criar seis classes e calcular a média da posição dos pólos ao redor de um centro.

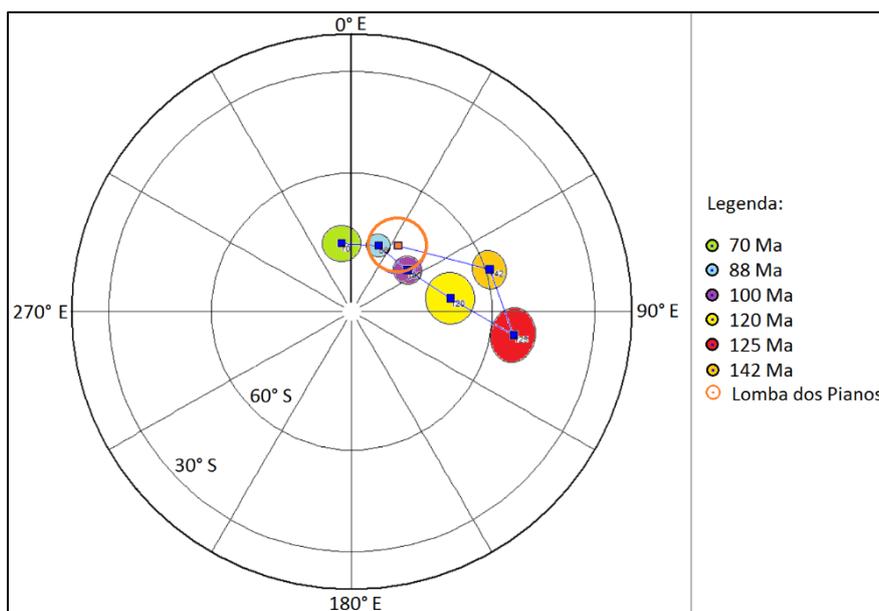


Figura 14 - Representação dos pólos paleomagnéticos da Ibéria e da Lomba dos Pianos.

Conclusões

Olhando para os critérios de qualidade estabelecidos por Van der Voo, podemos concluir que:

1. Idade bem definida da rocha e presunção de que a magnetização é da mesma idade.

Presumimos que a magnetização é da mesma idade que a rocha, e também que a sua idade, determinada por outros métodos, é suficientemente aceitável para validar o nosso trabalho.

2. Quantidade suficiente de amostras: $N > 24$, $k \geq 10$ e $\alpha_{95} \leq 16$.

O número de amostras não foi suficiente, com $N = 5$, k é bastante elevado, 172.18, e α_{95} é menor que 16, de 5.8° . Este critério não é então completamente preenchido.

3. Desmagnetização adequada incluindo a análise em componentes principais.

Foi cumprido o protocolo experimental de análise e desmagnetização necessário, embora não com todo o rigor, o que pode explicar algum erro na análise.

4. Testes de consistência que constriam a idade da magnetização.

Estes não foram realizados, pelo que não se cumpriu este critério.

5. Controlo estrutural e coerência tectónica com o craton ou os blocos envolvidos.

Não há grande deformação visível no *sill* e não foi necessário fazer *bedding correction*. Assume-se que toda a estrutura é coerente.

6. Presença de inversões

Não foram feitos testes sobre este assunto, pelo que não podemos dizer se houveram ou não inversões que afectaram a rocha. No entanto, na altura da sua formação, há cerca de 90 Ma, o campo magnético terrestre não sofreu inversões durante cerca de 30 Ma.

7. Não ter similaridades com pólos de idade mais recentes.

O pólo da Lomba dos Pianos está situado aproximadamente nos 90 Ma, não havendo similaridade com o pólo de há 72 Ma, pelo que não terá havido influência do campo magnético terrestre posterior à formação da rocha.

Assim, considerando que preenchemos quatro dos sete critérios de qualidade, e que o resultado obtido é coerente com a idade pré-estabelecida, podemos dizer que o trabalho está razoavelmente aceitável.

Referências

Apresentações de Power Point das aulas de Geomagnetismo de 2013, por Eric Font.

Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes by R.B. Butler (1992)

Neres, M., E. Font, J. M. Miranda, P. Camps, P. Terrinha, and J. Mirão (2012), Reconciling Cretaceous paleomagnetic and marine magnetic data for Iberia: New Iberian paleomagnetic poles, *J. Geophys. Res.*, 117, B06102, doi:10.1029/2011JB009067.

Introdução ao Geomagnetismo, J.M. Miranda (2011)

Van Der Voo, R. (1990). The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 184(1),