

GEOMAGNETISMO

RELATÓRIO

1. Introdução

Com este relatório pretende-se fazer um resumo detalhado do estudo de dois conjuntos de amostras, assim como dos princípios teóricos assumidos, métodos utilizados e dos resultados obtidos.

O estudo do movimento das placas tectónicas e as reconstruções paleogeográficas são possíveis devido a estudos paleomagnéticos. Para concretizar tais objectivos é necessário calcular pólos geomagnéticos através da análise de amostras recolhidas em diversas formações rochosas por todo o globo.

Define-se pólo geomagnético como o ponto da superfície terrestre que se melhor aproxima à intersecção do campo magnético terrestre com a superfície do globo. O cálculo de pólos geomagnéticos é feito a partir de pólos geomagnéticos virtuais (VGP), que correspondem aos pontos sobre a superfície terrestre que melhor aproximam a localização do pólo geomagnético verificado na altura em que as rochas adquiriram a sua magnetização remanescente. A magnetização de um dado material corresponde à resultante dos momentos magnéticos por unidade de volume, a magnetização remanescente é o registo que resulta da actuação de campos magnéticos no material.

Os VGPs são calculados para cada amostra, de um conjunto, depois de devidamente orientadas e desmagnetizadas termicamente e em campos alternados, com base nas componentes magnéticas (ChRM-characteristic remanent magnetization). Este trabalho envolveu o cálculo do pólo geomagnético relativo a um conjunto de amostras.

Outros estudos são feitos de modo a determinar direcções de paleocorrentes, devido a deposição de sedimentos, fluxos magmáticos, alterações que as rochas tenham sofrido após a sua génese (migração de fluidos, compactação, intrusões, deformações ou metamorfismos) e mesmo porosidades e permeabilidade.

Este tipo de estudos envolve testes de magnetismo de rocha como o baseado na anisotropia da susceptibilidade magnética (ASM) dos minerais para- e ferromagnéticos, isto é, avaliação da dependência da intensidade de magnetização das rochas com a direcção do campo aplicado. Susceptibilidade magnética é definida como a capacidade de um material ser magnetizado quando sob a acção de um campo magnético.

A medição da anisotropia centra-se nos valores da magnetização segundo três eixos principais, perpendiculares entres si, os minerais podem ser esféricos ($K_1=K_2=K_3$), triaxiais, ($K_1 > K_2 > K_3$), prolatos ($K_1 \approx K_2 > K_3$) ou oblatos ($K_1 > K_2 \approx K_3$). O grau de anisotropia é definido de várias formas na literatura, neste trabalho foi utilizada a relação descrita por Jelinek, 1981. Foi feito uma análise de ASM para um segundo conjunto de amostras.

2. Amostras

A primeira parte do trabalho foi feita com dados paleomagnéticos de um conjunto de amostras provenientes da Província Magmática do Cabo, localizada no nordeste do Brasil. As formações vulcânicas estão datadas com idade cerca de 101 Ma, correspondendo ao Cretácico Médio (Font et al., 2009). (Figura 1a)

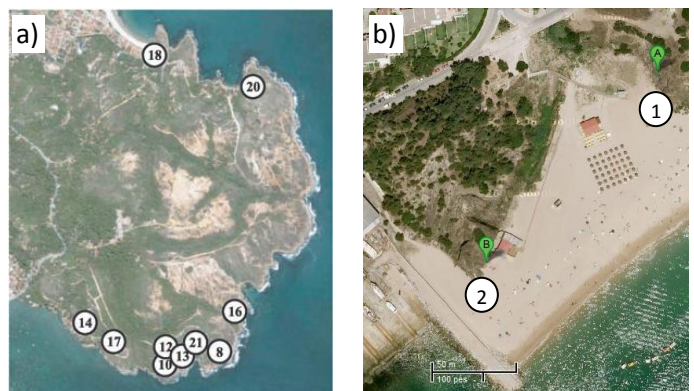


Figura 1. a) Locais de amostragem para o estudo de Paleomagnetismo, Cabo Santo Agostinho Massif, Brasil (Font et al., 2009). b) Locais de amostragem para o estudo de ASM, Praia de Sesimbra.

O estudo de ASM foi efectuado para um conjunto de amostras recolhidas em Sesimbra (Figura 1b). As amostras terão características e idade semelhantes às estudadas por Neres et al., 2012 provenientes da Foz da Fonte que pertencem à Bacia Lusitana, portanto terão idade próxima de 94 Ma.

3. Metodologia

No estudo de paleomagnetismo, o primeiro passo consistiu numa análise de componentes principais de cada amostra. Foi utilizado o software *Remasoft30*, onde, em primeiro lugar, foram inseridos os valores de orientação para cada amostra. De seguida, calculou-se as componentes médias para cada sítio de modo a se calcular o pólo geomagnético virtual (VGP) correspondente a cada sítio, utilizando as coordenadas geográficas de cada local. Utilizaram-se médias por sítio uma vez que são recolhidos vários cilindros em cada local de amostragem e cada cilindro é cortado em várias amostras, considerou-se, portanto, cada conjunto de cilindros como um sítio.

O pólo geomagnético foi calculado de duas formas: a partir da media dos sítios e a partir da média dos VGPs. Podia ter sido ainda calculado a partir da componente média de todas amostras.

Finalmente, procedeu-se à comparação do pólo geomagnético calculado a partir da média dos sítios com a curva de deriva polar aparente global (GAPWP) em coordenadas africanas (Eagles, 2007) numa projecção centrada no pólo Sul geográfico, representando o pólo final calculado rodado com o pólo de Euler que permite transladar a América do Sul em direcção a África (Font et al., 2009; Eagles, 2007).

Na segunda parte do trabalho, os cilindros recolhidos em Sesimbra primeiro forma orientados e cortados em cilindros mais pequenos com um tamanho padrão. As medições de susceptibilidade magnéticas em três direcções foram feitas no equipamento MFK1-FA (Agico) para cada amostra e analisadas com o software *Anisoft*. Comparou-se o parâmetro de forma com o grau de anisotropia.

4. Resultados

4.1. Paleomagnetismo

4.1.1. Magnetização remanescente característica

Na análise de componentes principais obteve-se a uma representação como a apresentada na Figura 5 para cada amostra. Apenas foi determinada a primeira componente em cada amostra, sendo que a tarefa, em alguns casos se mostrou ser complicado devido aos valores do perfil de desmagnetização (Figura 5b) de algumas amostras serem baixos. As componentes determinadas para cada amostra encontram-se representadas na Figura 2, nota-se que apesar de existir alguma dispersão nos pontos, estes apresentam inclinação entre 50 e 80° e declinação entre 340 e 15°.

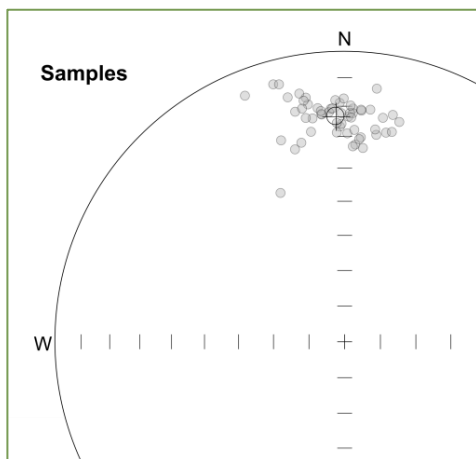


Figura 3. Representação estereográfica das componentes de todas as amostras e ponto médio.

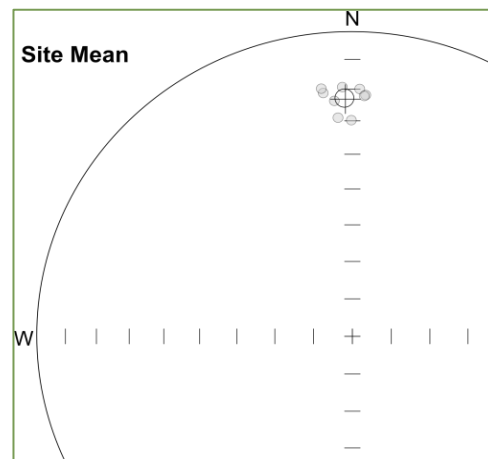


Figura 2. Representação estereográfica das componentes médias por sítio e ponto médio.

Na Figura 3 estão representadas as componentes médias por sítio, verifica-se que a dispersão dos pontos é bastante mais reduzida e que a inclinação está entre 60 e 70° e a declinação entre 355 e 5°.

Os valores obtidos para a ChRM, por sítio, média das amostras e média por sítio, encontram-se resumidos na Tabela 1. Foram utilizadas um total de 57 amostras e o parâmetro de dispersão α_{95} , está abaixo de 16, pelo que se poderá ter alguma confiança no estudo feito, embora fosse preciso garantir mais alguns critérios de qualidade (Van der Voo, 1990).

4.1.2. Pólo geomagnético virtual

Os pólos geomagnéticos virtuais (VGPs) correspondentes a cada média por sítio calculados, assim como os parâmetros de dispersão dp , dm e A_{95} (calculado como a média dos outros dois) encontram-se descritos na Tabela 1. Os valores apresentados referem-se à localização dos VGPs no hemisfério norte, pelo que depois de introduzidos no software *Geomap* foram calculados os valores correspondentes às localizações no pólo sul, de modo a obter uma representação gráfica dos mesmos numa projecção centrada no pólo sul geográfico.

Tabela 1. Componentes magnéticas características das rochas do CMP e VGPs correspondentes; D (°) - Declinação; I (°) - Inclinação; N - número de amostras por média; e α_{95} (A_{95}) e k (K) são parâmetros estatísticos para as direcções médias (VGPs).

Sítios	Magnetização Característica (ChRM)						Pólos Geomagnéticos Virtuais (VGPs)				
	N	D (°)	I (°)	α_{95}	k	R	Long (°E)	Lat (°N)	dp	dm	A_{95}
EC8	4	353.6	-21.1	6.7	189.3	4.0	-147.8	83.2	3.7	7.0	5.4
EC10	4	356.6	-29.2	6.0	232.1	4.0	169.7	82.0	3.7	6.7	5.2
EC12	7	0.0	-30.1	6.4	90.1	6.9	144.9	82.2	3.9	7.1	5.5
EC13	5	358.0	-19.6	2.8	755.3	5.0	-166.3	87.3	1.5	2.9	2.2
EC16	4	1.9	-20.2	7.2	165.5	4.0	103.0	87.2	3.9	7.5	5.7
EC17	5	3.3	-22.1	5.6	185.2	5.0	99.3	85.5	3.2	6.0	4.6
EC18	15	356.0	-23.9	5.9	43.1	14.7	-172.2	84.3	3.4	6.3	4.9
EC20	8	353.3	-19.6	8.8	40.3	7.8	-140.3	83.2	4.8	9.2	7.0
EC21	4	3.0	-22.4	9.0	104.6	4.0	102.9	85.6	5.1	9.6	7.4
Média das amostras	57	357.8	-23.5	2.4	64.0	56.1	173.3	85.5	1.3	2.5	1.9
Média por sítio	9	358.4	-23.4	4.4	232.4	9.0	167.8	86.0	1.9	3.6	2.8

A representação gráfica dos VGPs encontra-se na Figura 4 e estão também representadas graficamente as elipses de erro associadas. Os VGPs correspondentes à média das amostras e à média por sítio situam-se, aproximadamente, no centro do círculo limitado pelos VGPs de cada sítio, como era esperado.

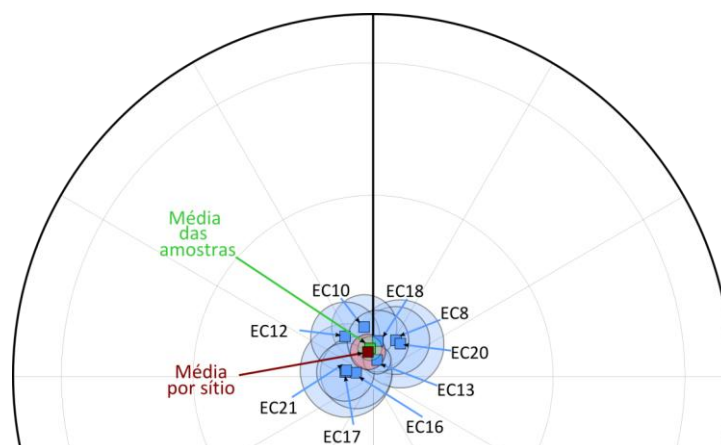


Figura 4. Representação dos VGPs para cada sítio (azul), para a média por sítio (vermelho) e para as médias das amostras (verde). Projecção centrada no pólo sul, o traço preto a cheio representa o meridiano de Greenwich.

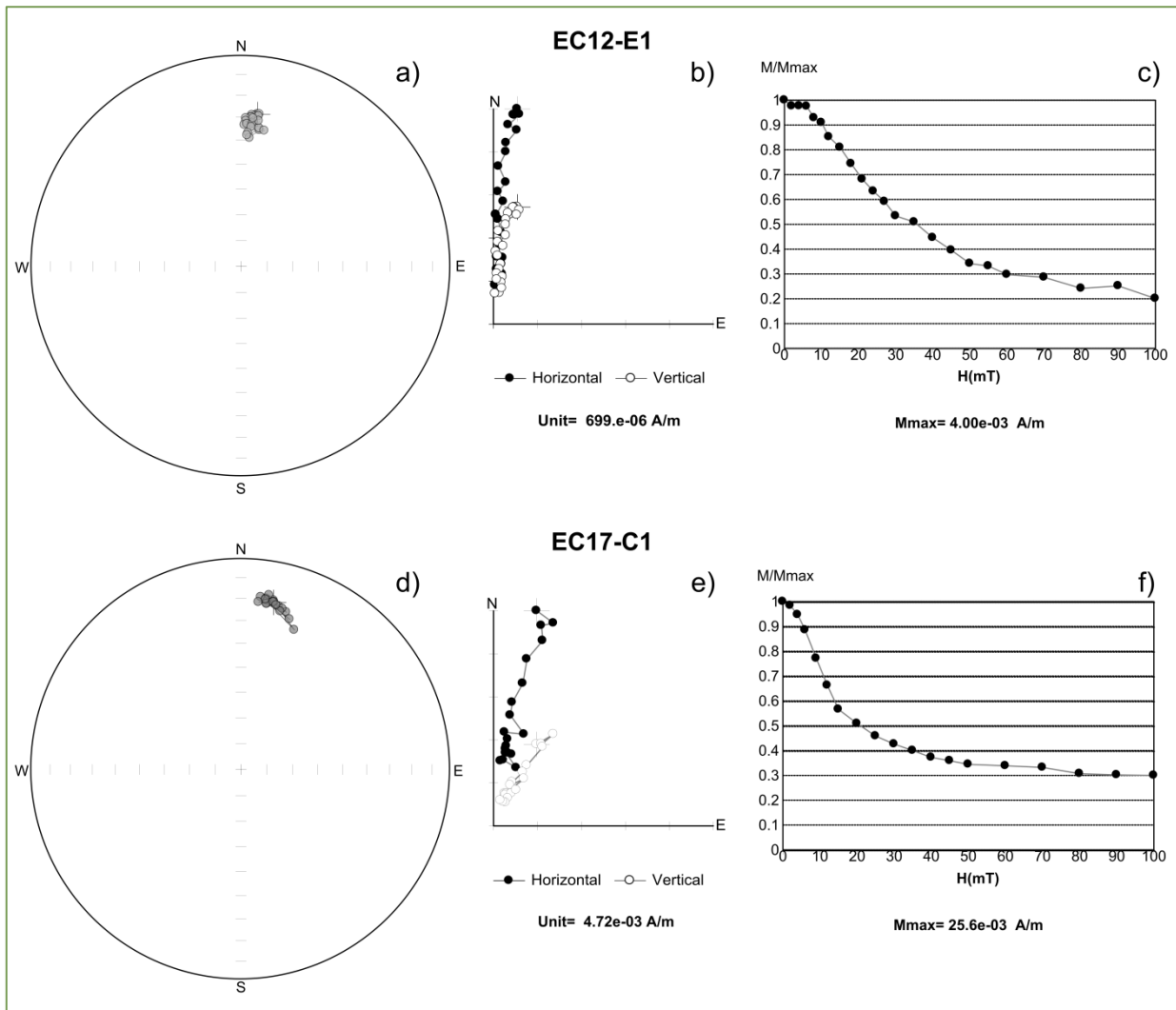


Figura 5. Exemplos de amostras: na linha de cima EC12-E1 e na linha de baixo EC17-C1; a) e d) referem-se à projecção estereográfica, b) e e) à projecção ortogonal e c) e f) ao gráfico da magnetização em função com campo magnético aplicado.

Verifica-se ainda que há pouca diferença entre o VGP calculado pela média das amostras e o calculado pela média por sítio.

4.1.3. Pólo geomagnético e comparação com a curva de deriva polar

O pólo geomagnético final corresponde ao pólo calculado com a média por sítio apresentado acima, na Tabela 1. Na Figura 6 encontra-se a representada a sua localização geográfica, tendo em conta a configuração actual dos continentes. Para se verificar a posição do pólo há 100 Ma atrás (idade estimada das amostras) procedeu-se à sua rotação através do pólo de Euler, Tabela 2, que permite a rotação do continente sul-americano em direcção a África, encontrado na literatura (Eagles, 2007). Nota-se claramente a diferença entre a posição do pólo geomagnético calculado e o pólo depois de rodado para a idade correspondente.

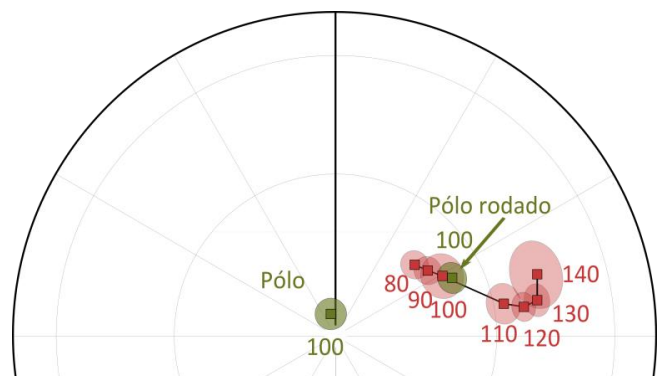


Figura 6. Representação do pólo geomagnético calculado, do pólo obtido após rotação com o pólo de Euler e da curva GAPWP entre 80 e 140 Ma (Torsvik et al., 2008). Projecção centrada no pólo sul, o traço preto a cheio representa o meridiano de Greenwich.

Representou-se a curva de deriva polar aparente global (GAPWP) entre as idades de 80 a 140 Ma para em coordenadas do sul de África, isto é, para um

referencial onde o continente africano é fixo, os valores utilizados estão descritos na Tabela 3. O resultado está, também, ilustrado na Figura 6 e verifica-se claramente boa concordância entre a idade do pólo estimado e a idade correspondente na curva GAPWP.

Fez-se a representação geográfica dos pólos, da curva GAPWP e com a configuração actual dos continentes, assim como do continente sul-americano rodado com o mesmo ângulo de rotação utilizado para relocalizar o pólo geomagnético calculado final, Figura 7. Note-se que esta representação apenas permite concluir acerca da posição da América do Sul há cerca de 100 Ma, pois considerou-se o continente africano fixo no referencial.

Tabela 2. Parâmetros de rotação da América do Sul relativamente a África. [Eagles, 2007]

Idade (Ma)	Lat	Long	Ângulo
~100	59	-37	41.3

Tabela 3. Curva de deriva polar aparente global em coordenadas de sul de África. (Torsvik et al., 2008)

SAFR			
Idade (Ma)	A ₉₅	Lat	Long
80	2.6	-70.8	48.1
90	2.6	-69.5	54.7
100	4.1	-67.9	60.8
110	3.6	-57.9	79.2
120	2.6	-53.8	81.3
130	2.9	-50.6	80.0
140	6.1	-49.2	73.1

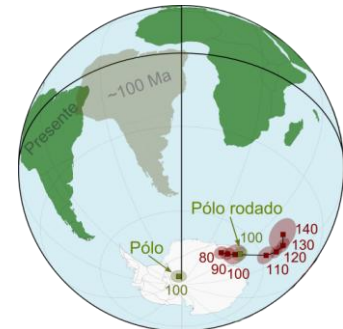


Figura 7. Pólos geomagnéticos – calculado e rodado com o pólo de Euler. Curva GAPWP (Torsvik et al., 2008). Configuração actual dos continentes. Rotação da América do Sul com o mesmo pólo de Euler.

4.2. Anisotropia de susceptibilidade magnética

Os resultados de ASM para as amostras originárias de Sesimbra encontrar-se representados na Figura 8. Nota-se que os eixos têm orientações, aproximadamente, semelhantes para todas as amostras e que diferem bastante uns dos outros, isto significa que as amostras recolhidas apresentam forte dependência direccional na magnetização.

Verifica-se que para algumas amostras os eixos K1 e K2 (quadrados e os triângulos, respectivamente, ilustrados na Figura 8a) parecem confundir-se, tal pode dever-se a erros na medição ou na orientação da amostra, por exemplo se a amostra não for posicionada correctamente no aparelho de medição pode

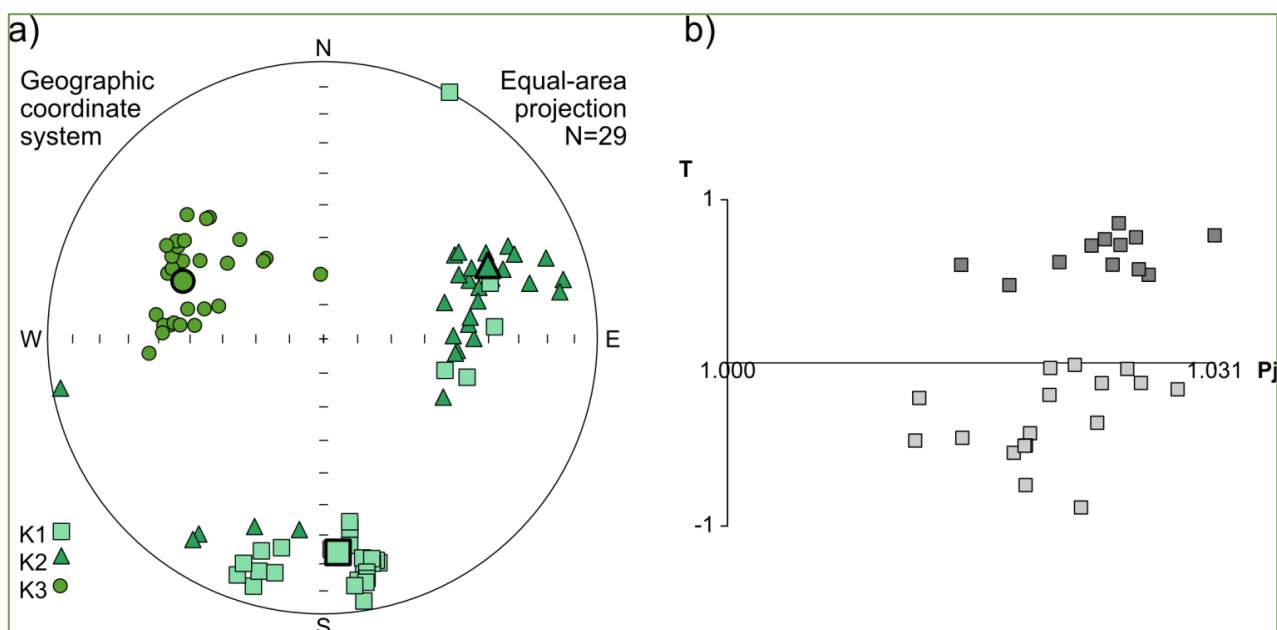


Figura 8. Anisotropia de susceptibilidade magnética das amostras de Sesimbra. a) Projecção estereográfica dos eixos de susceptibilidade magnética; os valores médios estão representados por um símbolo maior. b) Diagrama dos parâmetros de forma, cinza claro corresponde ao sítio 1 e a cinza escura às amostras do sítio 2.

resultar na medição com sinal oposto ao real. Pode ainda acontecer que os valores da susceptibilidade magnética segundo os eixos K1 e K2 sejam parecidos e por isso não haver uma distinção clara entre eles. Os minerais presentes nas amostras serão entre triaxiais e oblatos.

A Figura 8b ilustra o diagrama dos parâmetros de forma. Comparou-se o parâmetro de forma T com o grau de anisotropia P_j , definidos por Jelinek, 1981. Os valores de T positivos correspondem às amostras recolhidas no sítio 1 (Figura 1b) e indicam claramente que os minerais são oblatos, por outro lado, as amostras do sítio 2 apresentam parâmetro de forma negativo, e possuem minerais que variam entre tri-axial e prolato, embora na Figura 8a não seja perceptível a existência de minerais prolatos.

5. Discussão de resultados

O estudo de Paleomagnetismo feito mostra resultados concordantes com os descritos por Font et al., 2009, tal como era esperado, pois foram utilizados os mesmos dados paleomagnéticos. A comparação entre os dois pólos finais está ilustrada na Figura 9. Nota-se um ligeiro desvio entre os dois pólos, mas essa diferença pode ser justificada pelo facto do presente trabalho ter sido feito com um número de amostras e de sítios mais reduzido.

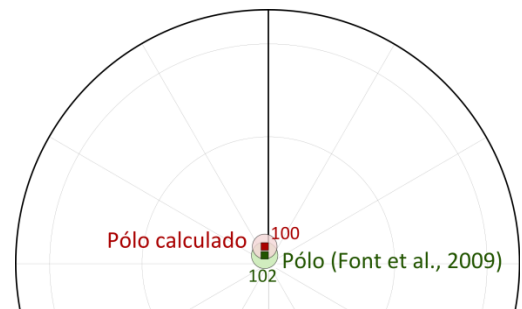


Figura 9. Comparação entre o pólo geomagnético calculado e o pólo de Font et al., 2009 para as mesmas amostras. Projecção centrada no pólo sul, o traço preto a cheio representa o meridiano de Greenwich.

A idade das amostras também se mostra coerente quando se compara o pólo final com a curva de deriva polar aparente global. Apesar de ligeiramente desviado, o pólo calculado está bastante próximo do pólo da curva GAPWP para os 100 Ma (Figura 6).

A análise de magnetismo de rocha feita ao segundo conjunto de amostras mostra uma orientação preferencial dos minerais, na Tabela 4 encontram-se os valores da orientação das médias dos três eixos principais, os valores foram lidos da representação gráfica (Figura 8).

Tabela 4. Orientação das médias dos três eixos principais da magnetização dos minerais.

	D(°)	I(°)
K1	175	65
K2	70	50
K3	290	45

6. Conclusões

Para o conjunto de amostras da Província do Cabo no nordeste brasileiro, os estudos paleomagnéticos permitiram determinar a localização do pólo geomagnético, no pólo sul geográfico, da altura em que as rochas analisadas adquiriram a sua magnetização remanescente com coordenadas 86°S 347.8°E e parâmetro A_{95} 2.8, e após rotação com o pólo de Euler, 66.18°S 63.61°E. O pólo geomagnético determinado por Font et al., 2009 tem coordenadas 87.9°S 335.9°E e parâmetro A_{95} 3, para uma idade cerca de 102 Ma. O estudo feito permitiu, então, também confirmar a idade das amostras.

Finalmente, a análise de ASM das amostras recolhidas em Sesimbra permitiu determinar que os minerais presentes têm uma orientação preferencial, o que será vantajoso para determinar o fluxo que provocou a intrusão magmática.

7. Referências

Eagles, G. (2007). New angles on South Atlantic opening. *Geophys. J. Int.* , 168(1), 353–361.

Font, E., Ernesto, M., Silva, P. F., Correia, P. B., & Nascimento, A. L. (2009). Palaeomagnetism, rock magnetism and AMS of the Cabo Magmatic Province, NE Brazil, and the opening of South Atlantic. *Geophys. J. Int.* , 179(2), 905–922.

Jelinek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* , 79, 3-4.

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

Torsvik, T. H., Mueller, R. D., van der Voo, R., Steinberger, B., & Gaina, C. (2008). Global plate motion frames: Toward a unified model. *Rev. Geophys.* , 46.

Van Der Voo, R. (1990). The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics* , 184(1), 1-9.