

# Contribuições dos estudos paleomagnéticos ao entendimento da abertura do Atlântico

*Contributions to understand the Atlantic opening from Paleomagnetism*

Marcia Ernesto<sup>1</sup>

## resumo

O paleomagnetismo é uma ferramenta essencial para determinar e quantificar os deslocamentos e rotações de blocos continentais. É, também, de grande ajuda para traçar adequadamente a história de abertura do Atlântico Sul, considerando que o longo período (~40 Ma) de polaridade normal, que constitui o Supercron do Cretáceo, dificulta a determinação de pólos de rotação bem datados e baseados em anomalias magnéticas. Para atender

esse objetivo, são necessárias curvas de deriva polar aparente (CDPA) confiáveis para a América do Sul e África, traçadas desde a situação pré-deriva. A CDPA, quando bem calibrada e somada às informações da magnetoestratigrafia, é bastante útil para discriminar “pulsos” de atividade ígnea em províncias magmáticas que precederam ou acompanharam a evolução do Atlântico.

**Palavras-chave:** Atlântico Sul | Paleomagnetismo | Reconstruções | Curva de deriva polar aparente

---

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo. Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. marcia@iag.usp.br

## abstract

*Paleomagnetism is an essential tool to determine and quantify the displacement and rotations of continental blocks. It also facilitates the accurate tracing of the South Atlantic opening history considering that the long (~40 Ma) Cretaceous Normal Superchron quiet period makes it difficult to determine well dated rotation poles based on sea floor magnetic anomalies. To achieve this reliable apparent polar wander paths (APWP) for South America and Africa, traced back to the pre-drift stage, are required. A well calibrated APWP along with magnetostratigraphy information is also useful to discriminate "pulses" of igneous activity within the magmatic province that preceded or accompanied the Atlantic evolution.*

*(Expanded abstract available at the end of the paper).*

**Keywords:** South Atlantic | Paleomagnetism | Reconstructions | Apparent polar wander path

## introdução

Os modelos de abertura do Oceano Atlântico Sul, baseados no mapeamento de anomalias magnéticas do assoalho oceânico, preconizam movimento dos continentes do tipo tesoura, progredindo de sul para norte. Rabinowitz e La Brecque (1979) identificaram a anomalia M12 (138 Ma) como marco do início da abertura. Entretanto, Austin e Uchupi (1982) concluíram que, na realidade, a maior parte das anomalias identificadas por aqueles autores situa-se em crosta continental fina, e que a primeira anomalia em crosta oceânica é a M9 (Valangiano-Hauteriviano; 131 Ma), até a latitude 33°S. Ao norte, a primeira anomalia é a M4 (mid-Hauteriviano, 127 Ma) e, além das cadeias Walvis e São Paulo, a marca situa-se no Aptiano-Albiano (113 Ma).

Vários modelos de evolução foram propostos, a maioria baseada no reconhecimento das anomalias magnéticas e zonas de fratura. Recentemente, novas informações foram adicionadas com o objetivo de melhor definir os pólos de rotação (pólos de Euler) e os ângulos de rotação para cada idade (Eagles, 2007 e referências citadas). Alguns modelos consideram deformações intraplaca, necessárias para resolver questões de ajuste entre a América do Sul e a África

na configuração pré-drift (Unternehr *et al.*, 1988; Eagles, 2007).

Um dos problemas que dificultam as reconstruções paleogeográficas é o longo intervalo sem inversões geomagnéticas, denominado Supercron Normal do Cretáceo (SNC, ~124-84 Ma; Gradstein *et al.*, 1994), caracterizando a anomalia C34 e formando uma faixa, cujas idades são difíceis de determinar. Entretanto, alguns eventos curtos de polaridade reversa foram identificados em rochas continentais e testemunhos do *Deep Sea Drilling Project* entre 120-115 Ma (Vandenberg *et al.*, 1978; Tarduno, 1990; Poornachandra Rao e Mallikharjuna Rao, 1996; Gvirtzman *et al.*, 1996) e ~95 Ma (Irving e Archibald, 1990). Estes eventos não são detectados nas anomalias oceânicas, pois o processo de formação e magnetização da crosta oceânica não permite registros de alta resolução.

Uma alternativa adequada para se investigar a paleogeografia é o método paleomagnético. Este trabalho apresenta uma revisão da base de dados paleomagnéticos desde o Mesozoico, discutindo as propostas de curva de deriva polar aparente para a América do Sul e a África. As reconstruções do Atlântico Sul serão discutidas em função das rotações preconizadas pelos dados paleomagnéticos.

## pólos paleomagnéticos e curvas de deriva polar aparente

O paleomagnetismo constitui-se em uma ferramenta importante para determinar e quantificar os movimentos das placas litosféricas. De modo geral, as rochas adquirem magnetização na época de sua formação através de processos distintos, tratando-se de rochas ígneas ou sedimentares. No primeiro caso, os minerais magnéticos (principalmente magnetita) são permanentemente magnetizados durante o resfriamento da rocha ao atingirem temperaturas menores do que as chamadas temperaturas de bloqueio. Estas temperaturas são ligeiramente menores que as temperaturas de Curie ( $T_c = 580^\circ\text{C}$ , no caso da magnetita pura). Nos sedimentos, a orientação dos grãos magnéticos ocorre durante a deposição (magnetização detrítica) ou, posteriormente, nos estágios iniciais da diagênese, através de processos

químicos. Em qualquer um dos casos, a magnetização é paralela ao campo magnético ambiente, que varia de acordo com o local de amostragem. A magnetização adquirida durante a formação de uma rocha é chamada de magnetização primária; aquela adquirida em qualquer outro momento durante sua história geológica é designada como secundária.

O trabalho paleomagnético envolve a coleta de amostras orientadas e que representem um intervalo de tempo suficientemente longo para registrar as variações do campo geomagnético, com duração da ordem de alguns milhares de anos. Estas variações, chamadas de variações seculares, correspondem ao deslocamento contínuo dos pólos magnéticos terrestres ao redor dos pólos geográficos, completando circuitos de 360°, porém, descrevendo trajetórias irregulares, afastando-se ou aproximando-se dos pólos geográficos. Cada posição instantânea do pólo magnético é chamada de Pólo Geomagnético Virtual (PGV). Uma seção estratigráfica (coluna sedimentar ou série de derrames de lavas), quando amostrada em diferentes níveis, fornece uma série de PGVs, cuja média indica a posição do pólo magnético na época da formação da rocha estudada, se o efeito da variação secular for eliminado. Considerando-se que o modelo de campo magnético adotado em paleomagnetismo é o modelo de dipolo geocêntrico e axial, a diferença entre o pólo paleomagnético calculado e o pólo geográfico é interpretada como deslocamento da placa litosférica.

Pólos paleomagnéticos de um mesmo continente ordenados no tempo descrevem a curva de deriva polar aparente (CDPA). Esta curva representa os deslocamentos do pólo em relação ao pólo de rotação da Terra no momento em que a placa permanece fixa. O deslocamento da placa é quantificado através da distância angular entre esses dois pólos. As CDPA de dois continentes podem ser comparadas ao rotacioná-las entre si, determinando se houve movimento relativo entre elas.

Existem inúmeros pólos paleomagnéticos para a América do Sul e a África, que permitem traçar as respectivas curvas de deriva e investigar a trajetória dessas placas durante o processo de abertura do Atlântico. Entretanto, os pólos disponíveis devem ser selecionados de acordo com os critérios de qualidade aceitos atualmente (e.g. Van der Voo, 1990; McElhinny *et al.*, 2003). Estes critérios envolvem números de sítios de amostragem suficientemente grandes para eliminar os efeitos da variação secular, identificação das componentes de magnetização registradas, utilizando-se

equipamentos e metodologias modernas e estudos sobre a origem (primária ou secundária) dos minerais magnéticos portadores da magnetização. Testes comparativos também são necessários para investigar possíveis remagnetizações de larga escala ocasionadas por eventos termais ou deformacionais, além de datações absolutas de precisão. Desta forma, as CDPA devem ser atualizadas continuamente, à medida que novos pólos de qualidade são obtidos, inclusive, buscando-se o refinamento das trajetórias.

## CDPA da América do Sul e África

As mais recentes compilações de dados e propostas de CDPA para a América do Sul devem-se a Somoza e Zaffarana (2008) e Font *et al.* (2009), ambas incluindo novos dados para o intervalo Albiano-Santoniano. A compilação atualizada é apresentada na tabela 1 e a distribuição dos pólos pode ser vista na figura 1. Para o traçado da CDPA, calcularam-se pólos médios, também incluídos na tabela.

O Cretáceo Inferior é o período que melhor define os estudos paleomagnéticos. Existem vários dados provenientes de rochas ígneas com controle radiométrico eficaz. O magmatismo Serra Geral da Província Magmática do Paraná (PMP) fornece um amplo e coerente conjunto de dados (Ernesto *et al.*, 1990 e 1999; Alva-Valdívia *et al.*, 2003; Mena *et al.*, 2006), relativos a um breve intervalo de tempo (~133-132 Ma) bem controlado por idades radiométricas  $Ar^{39}/Ar^{40}$  (Renne *et al.*, 1992; 1996a e b; Turner *et al.*, 1994; Stewart *et al.*, 1996; Ernesto *et al.*, 1999; Mincato *et al.*, 2003), constituindo-se no melhor marcador da placa Sulamericana nesse período. Um trabalho recente de Thiede e Vasconcelos (2008) confirma a proposta de um curto intervalo de tempo (1-2 Ma) para o magmatismo extrusivo da Bacia do Paraná, excluindo as idades mais antigas citadas na literatura.

Circundando a PMP e com idades mais jovens, um intenso magmatismo intrusivo representado pelos diques toleíticos do Arco de Ponta Grossa (129-131 Ma; Renne *et al.*, 1996b), a Província Alcalina do Paraguai Central (127-130 Ma; Velázquez *et al.*, 1992; Ernesto *et al.*, 1996) e os diques toleíticos da ilha de Santa Catarina e arredores (diques de Florianópolis; 119-129 Ma; Raposo *et al.*, 1998; Deckart *et al.*, 1998) e Província Magmática Serra do Mar

Tabela 1

Pólos paleomagnéticos médios para a América do Sul e África para o período Cretáceo.

Table 1

Mean paleomagnetic poles for South America and Africa for the Cretaceous.

Período	Código	Idade (ma)	Polaridade	Longitude (°E)	Latitude (°S)	N	Parâmetros estatísticos	Pólos de rotação
América do Sul								
Cretáceo Superior	$K_s$	90-65	N/R	345	80	4	$\alpha_{95}=3.9^\circ$ $k=552$	$\lambda=75^\circ E$ $\Delta=10^\circ$
Cretáceo - SRC	$K_{sc}$	110-90	N	53	89	3	$\alpha_{95}=4.8^\circ$ $k=658$	$\lambda=143^\circ E$ $\Delta=1^\circ$
Cretáceo Inferior 2	$K_{i2}$	130-120	N/R	56	87	3	$\alpha_{95}=4.0^\circ$ $k=953$	$\lambda=146^\circ E$ $\Delta=3^\circ$
Cretáceo Inferior 1	$K_{i1}$	145-132	N/R	89	85	3	$\alpha_{95}=2.0^\circ$ $k=3623$	$\lambda=179^\circ E$ $\Delta=5^\circ$
África								
Cretáceo Superior	$K_s$	80-65	N/R	66	77	3	$\alpha_{95}=8.8^\circ$ $k=196$	$\lambda=156^\circ E$ $\Delta=13^\circ$
Cretáceo - SRC	$K_{sc}$	110-80	N	74	63	39	$\alpha_{95}=5.9^\circ$ $k=76$	$\lambda=164^\circ E$ $\Delta=27^\circ$
Cretáceo Inferior	$K_{i1}$	140-110	N/R	84	47	5	$\alpha_{95}=6.1^\circ$ $k=406$	$\lambda=174^\circ E$ $\Delta=43^\circ$

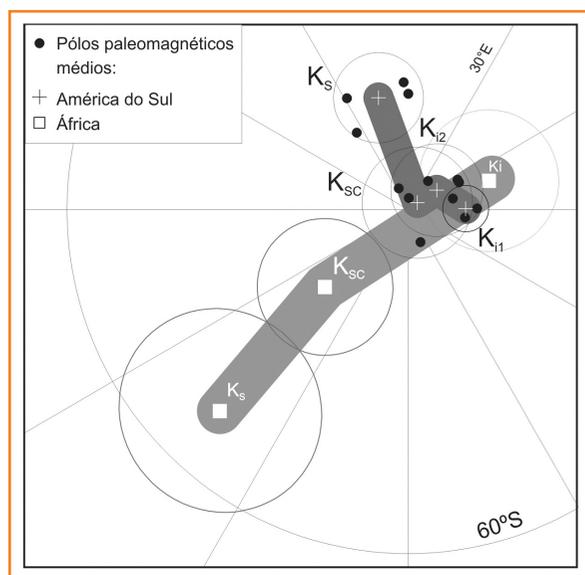
N= número de pólos na média;  $\alpha_{95}$  e k= parâmetros estatísticos de Fisher (1953);  $\lambda$ = longitude;  $\Delta$ = ângulo de rotação

Figura 1

Curvas de deriva polar aparente da América do Sul e África para o Cretáceo. Os pólos médios estão representados com o círculo de confiança  $\alpha_{95}$ . A curva da África foi rotacionada para a América do Sul em relação ao pólo de Euler pré-deriva de Nürnberg e Müller (1991). A distribuição dos pólos paleomagnéticos da América do Sul é indicada pelos círculos cheios, de acordo com a seleção de Font et al. (2009).

Figure 1

Apparent polar wander paths for South America and Africa for the Cretaceous. The mean poles are represented along with the  $\alpha_{95}$  confidence circle. The African curve was rotated to South America using the pre-drift Euler pole from Nürnberg & Müller (1991), the distribution of the South American paleomagnetic poles are indicated by the filled circles, according to the selection of Font et al. (2009).



(Montes-Laur et al., 1995) permitem aumentar a resolução na definição da rotação da placa nos estágios iniciais da separação dos dois continentes. Além desses, pólos paleomagnéticos relativos ao magmatismo mesozoico do Nordeste do Brasil (Bacia do Maranhão, diques Rio Ceará-Mirim e basaltos Lavras da Mangabeira; Ernesto et al., 2002a) e da Patagônia (Butler et al., 1991), em coerência com os anteriores, atestam a validade da CDPA desse período para toda a placa Sulamericana.

Dois pólos paleomagnéticos médios resultam dessa compilação: o mais antigo ( $K_{i1}$ ; 145-132 Ma), conforme indicado na tabela 1, coloca a placa ligeiramente ao norte da posição atual e sem rotação significativa. O pólo médio  $K_{i2}$  (130-120 Ma) indica que, a partir de  $K_{i1}$ , a placa desloca-se ao sul, rotacionando até alinhar seu eixo principal paralelamente à posição atual.

O Cretáceo Superior não é bem definido, com poucos pólos paleomagnéticos, na maioria com datações radiométricas baseadas no método K/Ar e com incertezas de mais de 10 Ma. A mesma avaliação foi expressa por Somoza e Zaffarana (2008) e, a despeito da necessidade de melhorar essa base de dados, ressalta o deslocamento de  $5^\circ$ - $7^\circ$  em direção ao sul, preconizado pelo pólo paleomagnético médio ( $K_s$ ; tabela 1) para esse período. Esse movimento, acompanhado de rotação horária da placa Sulamericana, já foi proposto por Ernesto et al. (2002b). Os novos dados relativos ao período correspondente ao SRC (Geuna et al., 2000; Somoza e Zaffarana, 2008; Font et al., 2009) foram considerados independentemente neste trabalho e definem o pólo médio  $K_{sc}$ , com aproximadamente 100 Ma. O pólo de Font et al. (2009) refere-se à Província Magmática do Cabo, assim designada por Nascimento (2003), e substitui o anteriormente calculado por Schult e Guerreiro (1980), que excluía os granitos e monzonitos.

Lamentavelmente, o mesmo nível de detalhe ainda não existe do lado africano, condição essencial para se produzir reconstruções paleomagnéticas relativas aos intervalos de idade acima definidos. Font *et al.* (2009) subdividiu os pólos africanos em três grupos: Cretáceo Inferior, Superior e “Médio”; este último referindo-se aos pólos com polaridade normal, provavelmente com idades compatíveis ao SRC, devido à grande incerteza nas idades desses dados.

A comparação desses pólos médios com os da América do Sul é vista na figura 1. Os pólos médios da África foram rotacionados para a América do Sul em situação pré-deriva, segundo o ajuste de Nürnberg e Müller (1991). Os pólos foram representados juntamente com os respectivos círculos de confiança  $\alpha_{95}$  (Fisher, 1953). Os pólos médios  $K_{11}$  para a América do Sul e África incluem os pólos da Formação Serra Geral e Kaoko, respectivamente, e representam províncias ígneas contíguas, que se formaram antes da separação dos continentes. Portanto, os pólos médios refletem essa configuração e seus círculos de confiança se sobrepõem. Os demais pólos divergem à medida que as trajetórias continentais tornam-se independentes.

## reconstruções paleomagnéticas

Font *et al.* (2009) analisou os modelos de evolução do Atlântico Sul proposto por diversos autores, comparando rotações resultantes das três famílias de pólos de rotação, representadas pelos pólos de Eagles (2007), Shaw e Cande (1990) e Nürnberg e Müller (1991) e apresentam diferenças significativas. Este último trabalho representa a família de Bullard, assim designado por Eagles (2007) o conjunto de pólos de rotação proposto por diversos autores, baseados na mesma metodologia e divergindo muito pouco entre si. Por fim, estes autores consideraram a reconstrução de Eagles (2007) para o SRC, a que melhor se ajusta aos dados paleomagnéticos.

Devido ao longo período de polaridade constante, a reconstrução para idades inseridas no SRC é a mais difícil de estabelecer, dificultando o controle da velocidade de separação continental. Shaw e Cande (1990) consideraram o fim da anomalia C34 a 84 Ma (C34y) e Eagles (2007), o centro dessa anomalia (C34i), com idade de 100 Ma. Consequentemente, admite-se taxa constante de produção de crosta oceânica em ambos os lados da cadeia meso-atlântica.

Infelizmente, os dados paleomagnéticos disponíveis não permitem, ainda, nenhum refinamento nesse intervalo de idades que contribua para averiguar a confiabilidade da hipótese acima. Entretanto, fornecem uma base independente para avaliar qual a reconstrução mais provável.

Na figura 2, as reconstruções paleomagnéticas foram comparadas àquelas baseadas em feições do assoalho oceânico. O método paleomagnético é insensível às variações de longitude, pois o cálculo dos pólos baseia-se num modelo de campo magnético dipolar, geocêntrico e axial, ou seja, simétrico em relação ao eixo terrestre. Portanto, as rotações detectadas referem-se a rotações “*in situ*”. Nessa figura, tomou-se a posição atual da América do Sul como referência, uma vez que, durante o Cretáceo, o eixo principal do continente sulamericano se manteve similar ao atual.

Em cada idade considerada, a África foi ajustada à América do Sul e cada continente foi rotacionado segundo o respectivo pólo de rotação calculado a partir dos pólos paleomagnéticos médios da tabela 1, excetuando-se  $K_{12}$  que não existe para a África. Essas reconstruções correspondem a:  $K_{11}$  – 136 Ma (Eagles, 2007);  $K_{12}$  – 124 Ma (Eagles, 2007);  $K_{sc}$  – 100 Ma (Eagles, 2007);  $K_s$  – 80 Ma (Nürnberg e Müller, 1991). Nas posições  $K_{sc}$  e  $K_s$ , após a rotação paleomagnética, somou-se 15° às longitudes da África, a fim de produzir a separação preconizada pelo modelo oceânico. Observa-se na figura que a América do Sul descreveu um movimento de rotação anti-horária, desde o Cretáceo Inferior ( $K_{11}$ ) até o Cretáceo “médio” ( $K_{sc}$ ), quando se posicionou paralelamente à configuração atual, porém em outras longitudes. Desde então até o Cretáceo Superior, há uma migração ao sul, acompanhando uma rotação no sentido horário. Este movimento, entretanto, pode estar superestimado, uma vez que o pólo paleomagnético médio cobre um intervalo de tempo longo (pelo menos 20 Ma) e deriva de uma base de dados pouco expressiva. Por outro lado, o ajuste obtido para a África concorda muito bem com o ajuste de 80 Ma de Nürnberg e Müller (1991). Na reconstrução  $K_{sc}$  (~100 Ma; Eagles, 2007), nota-se que para a América do Sul os modelos são coincidentes, mas há uma rotação diferencial para a África. Apesar da incerteza no pólo paleomagnético médio africano, é possível que este represente uma idade ligeiramente diferente daquela admitida para o centro da anomalia C34.

As reconstruções paleomagnéticas em  $K_{11}$  e  $K_{12}$  para a América do Sul são perfeitamente compatíveis com as reconstruções oceânicas equivalentes, diferindo em

pequenas variações de latitude. Vale ressaltar que o ajuste de Eagles (2007) utilizado neste trabalho leva em consideração deformações internas das placas para acomodar a propagação para norte da separação continental. No caso paleomagnético, considerou-se placas rígidas, pois as incertezas dos pólos paleomagnéticos médios não permitem detectar pequenos deslocamentos. Além disso, as deformações propostas representam movimentos que afetam, principalmente, as longitudes, o que não é detectado pelo paleomagnetismo.

Segundo o exposto, conclui-se que o paleomagnetismo oferece um vínculo confiável na determinação das paleolatitudes e rotação das placas. Esse vínculo não deve ser desprezado em detrimento do sistema de referência supostamente oferecido pelo modelo de *hotspots*/plumas do manto.

As tentativas de explicar a origem das províncias magmáticas através do modelo de plumas do manto levaram a várias reconstruções paleogeográficas errôneas, nas quais coloca-se, arbitrariamente, a região afetada pelo magmatismo sobre um *hotspot* (em geral, aquele que mais se aproxima nas coordenadas atuais), sem respeitar qualquer vínculo ou marcador paleogeográfico. No nordeste do Brasil, os basaltos terciários (Almeida, 1986) foram atribuídos à pluma Santa Helena/Ascención (incluindo a montes submarinos Bahia e Pernambuco; O'Connor e Le Roex, 1992) e a Fernando de Noronha (Fodor *et al.*, 1998).

Por outro lado, Courtillot *et al.* (1999) sugeriram que Fernando de Noronha poderia ter originado a Província magmática do Atlântico Central (Hames *et al.*, 2002). Se essas associações, bem como outras encontradas na literatura, forem verdadeiras, então se imagina um sistema de placas fixas e, sob elas, movimentos caóticos de *hotspots* com velocidades variáveis, sendo impossível conciliar os deslocamentos da placa nos tempos requeridos pelas supostas reconstruções.

Na figura 2, estão representadas as ilhas de Tristão da Cunha, Trindade e Fernando de Noronha, em suas coordenadas geográficas atuais e da época em que teriam irrompido como plumas do manto. As linhas tracejadas projetam o centro da pluma mantélica sob os continentes, no modelo de plumas fixas. Como já demonstrado por Ernesto *et al.* (2002b), a pluma de Tristão da Cunha localizava-se a cerca de 1.000km ao sul da província, na época da erupção dos magmas (133-132 Ma) e, mesmo considerando a pluma com diâmetro de 2.000km, como proposto na literatura, o impacto da pluma seria apenas periférico. A pluma de Trindade, por sua vez, teria originado as Províncias Serra do Mar, Iporá e Alto Paranaíba, de acordo com Gibson *et al.* (1995) e Thompson *et al.* (1998). Porém, ela se localiza bem ao norte dessas áreas, mesmo considerando um período de incubação de ~20 Ma, portanto, ainda no Cretáceo médio ( $K_{sc}$ ). Da mesma forma, Fernando de Noronha não se coloca nas latitudes da Província

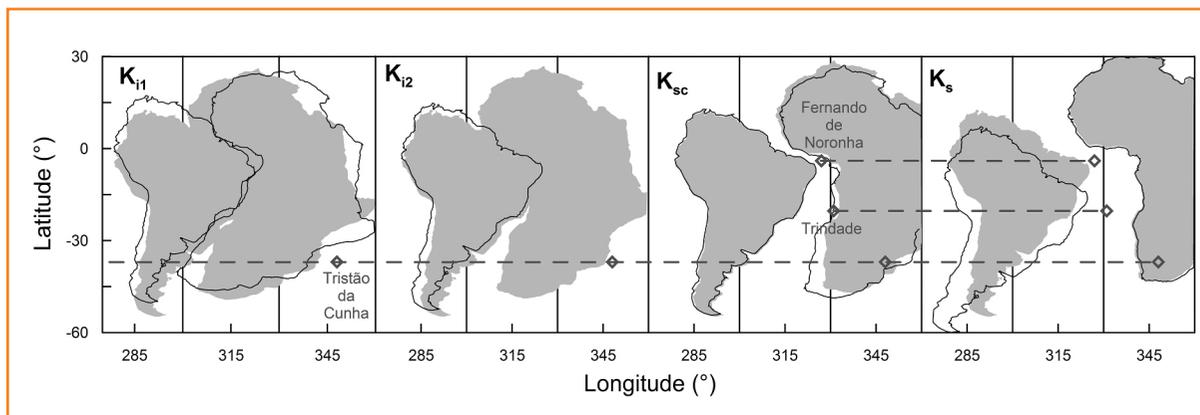


Figura 2 – Reconstruções paleomagnéticas (contorno vazado) superpostas às reconstruções baseadas em feições do assoalho oceânico (cinza):  $K_{11}$  – pré-*drift* (Nürnberg e Müller, 1991);  $K_{12}$  – 124 Ma (Eagles, 2007);  $K_{sc}$  – 100 Ma (Eagles, 2007);  $K_s$  – 80 Ma (Nürnberg e Müller, 1991). Em todos os casos efetuou-se a rotação paleomagnética nos continentes ajustados em condição pré-*drift*. Quando necessário as longitudes foram ajustadas às reconstruções oceânicas ( $K_{sc}$  = 5°;  $K_s$  = 15°). As ilhas oceânicas estão representadas em suas coordenadas atuais e a partir da época em que podem ter representado plumas do manto.

Figure 2 – Paleomagnetic reconstructions (unfilled contours) superposed to the reconstructions based on the sea floor features (gray):  $K_{11}$  – pre-*drift* (Nürnberg & Müller, 1991);  $K_{12}$  – 124Ma (Eagles, 2007);  $K_{sc}$  – 100Ma (Eagles, 2007);  $K_s$  – 80Ma (Nürnberg & Müller, 1991). In all cases the paleomagnetic rotation was applied to the continents after fitting them to the pre-*drift* situation. When necessary, longitudes were adjusted to the sea floor reconstructions (5° for  $K_{sc}$  and 15° for  $K_s$ ). The oceanic islands are represented in the present coordinates, and starting from the time they may have represented mantle plumes.

Magmática do Cabo, como sugerido por Nascimento (2003), e foi descartada como pluma geradora da Província do Atlântico Central por outros argumentos (De Min *et al.*, 2003).

## conclusão

O processo de abertura do Atlântico foi acompanhado por intenso magmatismo desde o Triássico, na região equatorial, e a partir do Neocomiano, na região sul, quando o rifte do Atlântico sul atingiu latitudes da Bacia de Pelotas, de acordo com Thomaz Filho *et al.* (1990), baseado em compilação de idades K/Ar. Entretanto, alguns dados recentes apontam para a ocorrência de atividade intrusiva do Jurássico Inferior na Região Sudeste (Guedes *et al.*, 2005). Trata-se de diques cortando o embasamento da Bacia de Santos no interior da plataforma continental (Província Magmática Serra do Mar) e que foram datados pelo método  $Ar^{40}/Ar^{39}$ . Diques dessa idade também foram identificados pelo paleomagnetismo em áreas próximas (dados inéditos) e o pólo paleomagnético (SM2) correspondente pode ser visto na figura 3, comparado ao pólo do Cretáceo Inferior, calculado com os demais diques da região (SM1) e ao pólo de ~200 Ma, fornecido por Nomade *et al.* (2000) para os diques da Guiana Francesa.

No extremo nordeste do Brasil, o conjunto de diques do Rio Ceará-Mirim tem sido descrito como de idade Cretáceo Inferior (Oliveira, 1992). Esses diques colocam-se segundo lineamentos paralelos, sendo designados de diques I a IV de norte ao sul (Sial, 1976). Entretanto, Ernesto *et al.* (2002a) identificaram conjuntos de diques com idades discrepantes e atribuíram idade Jurássica ao lineamento IV, por concordar com as direções magnéticas do magmatismo jurássico Mosquito, ao oeste na Bacia do Parnaíba e Lavras da Mangabeira, sudeste do Ceará, ambos datados entre 175-198 Ma (De Min *et al.*, 2002). Ao norte, o conjunto de diques mais expressivo forma o lineamento II que também apresentaram direções de magnetização diferente dos demais. Estes diques fornecem um pólo paleomagnético (CM II) comparável com pólos Permo-Triássicos de polaridade reversa (fig. 3).

Ernesto *et al.* (2002a) atribuíram a discrepância entre as idades radiométricas e a datação paleomagnética ao efeito do processo magmático continuado que afetou a região. A remanência magnética não é

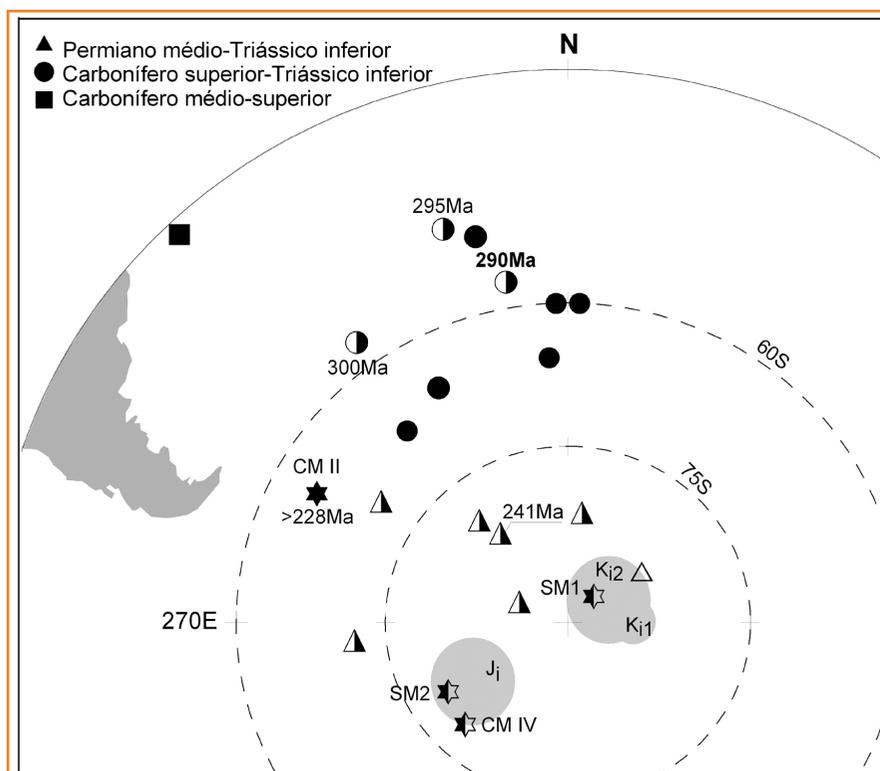


Figura 3 – Comparação dos pólos paleomagnéticos do dique II e IV do enxame Rio Ceará-Mirim (CM II e IV; Ernesto *et al.*, 2002) e da Província Serra do Mar (SM1 e SM2) com pólos do Paleozoico Superior (Brandt *et al.*, 2009) e pólos médios do Cretáceo Inferior ( $K_{11}$  e  $K_{12}$ ; este trabalho) e do Jurássico Inferior ( $J_1$ ; Nomade *et al.*, 2000). Símbolos cheios, vazios e semi-cheios indicam polaridade reversa, normal e mista, respectivamente.

Figure 3 – Comparison of the paleomagnetic poles from dikes II and IV of the Rio Ceará-Mirim swarm (CM II and IV; Ernesto *et al.*, 2002), and from the Serra do Mar Province (SM1 and SM2) with Late Paleozoic (Brandt *et al.*, 2009), and Early Cretaceous ( $K_{11}$  and  $K_{12}$ ; this work) and Early Jurassic ( $J_1$ ; Nomade *et al.*, 2000) mean poles. Filled, open and half-filled symbols indicate reversed, normal and mixed polarities, respectively.

facilmente alterável com a elevação de temperatura. Além disso, nas rochas consideradas mais antigas, também identificou-se a componente de magnetização secundária relativa ao campo magnético do Cretáceo, que magnetizou as rochas mais jovens.

Os resultados acima sugerem que muito antes do início da abertura efetiva do Atlântico Sul, os processos extensionais já estavam ocorrendo.

## referências bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, n. 16, p.325-349, 1986

- ALVA-VALDIVIA L. M.; GOGUITCHAICHVILI, A.; UR-  
RUTIA-FUCUGAUCHI, J.; RIISAGER, J.; RIISAGER, P.;  
LOPES, O. F. Paleomagnetic poles and paleosecular  
variation of basalts from Paraná Magmatic Province,  
Brazil: geomagnetic and geodynamic implications.  
**Physics of the Earth and Planetary Interiors**,  
v. 38, n. 3-4, p. 183-196, ago. 2003.
- AUSTIN, J. A.; UCHUPI, E.; Continental-ocean  
crustal transition off Southwest Africa. **American  
Association of Petroleum Geologists**, n. 66,  
p. 1328-1347, 1982.
- BRANDT, D.; ERNESTO, M.; ROCHA-CAMPOS, A. C.;  
DOS SANTOS, P. R. Paleomagnetism of the Santa Fé  
Group, central Brazil: implications for the Late Paleo-  
zoic APWP for South America. **Journal of Geophy-  
sical Research**, v. 114, p. 2-19, 2009.
- BUTLER, R. F.; HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; BECK, M.  
E.; BURMESTER, R. F.; OVIEDO, E. S. Paleomagnetism  
of the Patagonian plateau basalts, southern Chile  
and Argentina. **Journal of Geophysical Research**,  
v. 96, p. 6023-6034, 1991.
- COURTILLOT, V.; JAUPART, C.; MANIGHETTI, P.;  
TAPONIER, P.; BESSE, J. On causal links between  
flood basalts and continental breakup. **Earth and  
Planetary Science Letters**, n. 166, p. 177-195,  
1999.
- DECKART, K.; FÉRAUD, G.; MARQUES, L. S.; BER-  
TRAND, H. New time constraints on dyke swarms  
related to the Paraná-Etendeka magmatic province,  
and subsequent South Atlantic opening, southeastern  
Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal  
Research**, n. 80, p. 67-83, 1998.
- DE MIN, A.; PICCIRILLO, E. M.; MARZOLI, A.; BELLINI,  
G.; RENNE, P. R.; ERNESTO, M.; MARQUES, L.S. The  
Central Atlantic magmatic Province (CAMP) in Brazil:  
petrology, geochemistry,  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  ages, paleomag-  
netism and geodynamic implications. In: HAMES,  
W.; MCHONE, J.G.; RENNE, P.R.; RUPPEL, C. (Eds.).  
**The Central Atlantic Magmatic Province, AGU  
Geophysical**. Washington: American Geophysical  
Union, 2003. p. 91-128.
- EAGLES, G. New angles on South Atlantic opening.  
**Geophysical Journal International**, v. 168, n. 1,  
p. 353-361, 2007.
- ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; HIODO, F. Y.; NARDY, A.  
J. R. Paleomagnetism of the mesozoic Serra general  
formation, Southern Brazil, **Physics of the Earth and  
Planetary Interiors**, v. 64, n. 2-4, p. 153-175, 1990.
- ERNESTO, M.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES,  
C. B.; PICCIRILLO, E. M.; CASTILLO, A. M. C.; VE-  
LÁZQUEZ, J. C. Paleomagnetic data from the Central  
Alkaline province, Eastern Paraguay, In: Comin-Chiara-  
monti, P. e Gomes, C. B. (Eds). **Alkaline magmatism  
in Central-Eastern Paraguay. Relationships with  
coeval magmatism in Brazil**. São Paulo: Edusp/  
Fapesp, 1996, p. 85-102.
- ERNESTO, M.; RAPOSO, M. I. B.; MARQUES, L. S.;  
RENNE, P. R.; DIOGO, L. A.; A. DE MIN. Paleomag-  
netism, geochemistry and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  dating of the  
North-eastern Paraná Magmatic province: tectonic  
implications. **Journal of Geodynamics**, v. 28,  
n. 4-5, p. 321-340, nov. 1999.
- ERNESTO, M.; BELLINI, G.; PICCIRILLO, E.M.; MAR-  
QUES, L. S.; DE MIN, A.; PACCA I. G.; MARTINS, G.;  
MACEDO, J. W. P. Paleomagnetic, geochronological  
and geochemical constraints on time and duration  
of the Mesozoic igneous activity in northeastern  
Brazil. **AGU Geophysical Monograph**, v. 136,  
p. 128-151, 2002a. (The Central Atlantic Magmatic  
Province, 129-149).
- ERNESTO M.; MARQUES L. S.; PICCIRILLO E. M.;  
MOLINA E. C.; USSAMI N.; COMIN-CHIARAMONTI,  
P.; BELLINI, G. Paraná magmatic Province Tristan  
da Cunha plume system: fixed versus mobile plume,  
petrogenetic considerations and alternative heat  
sources. **Journal of Volcanology and Geothermal  
Research**. v. 118, n. 1-2, p. 15-36, nov. 2002.
- FISHER, R. Dispersion on a sphere. **Proceedings  
of the Royal Society**, London, v. 217, n. 1130,  
p. 295-305, 1953.
- FODOR, R. V.; MUKASA, S. B.; SIAL, A. N. Isotopic  
and trace-element indications of lithospheric and as-  
thenospheric components in Tertiary alkalic basalts,  
northeastern Brazil. **Lithos**, v. 43, n. 4, p. 197-217,  
set. 1998.
- FONT, E.; ERNESTO, M.; SILVA, P. F.; CORREIA,  
P. B.; NASCIMENTO, M. A. L. Paleomagnetism,  
rock magnetism, and AMS of the cabo magmatic

province, NE Brazil, and the opening of South Atlantic. **Geophysical Journal International**, v. 179, n. 2, p. 905-922, nov. 2009.

GEUNA, S. E.; SOMOZA, R.; VIZAN, H.; FIGARI, E. G.; RINALDI, C. A. Paleomagnetism of jurassic and cretaceous rocks in central Patagonia: a key to constrain the timing of rotations during the breakup of southwestern Gondwana? **Earth and Planetary Science Letters**, v.181, n.1-2, p.145-160, ago. 2000.

GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; LEONARDOS, O. H.; DICKIN, A. P.; MITCHELL, J. G. The late cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. **Journal of Petrology**, v. 36, p. 189-229, 1995.

GUEDES E.; HEILBRON, M.; VASCONCELOS, P. M.; VALERIANO, C. M.; ALMEIDA J. C. H.; TEIXEIRA, W.; THOMAZ FILHO, A. K-Ar and 40Ar/39Ar ages of dikes emplaced in the onshore basement of the Santos Basin, Resende area, SE Brazil: implications for the south Atlantic opening and Tertiary reactivation. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 18, n. 3-4, p. 371-382, 2005.

GVIRTZMAN, G.; WEISSBROD, T.; BAER, G.; BRENNER, G. J. The age of the aptian stage and its magnetic events: new Ar-Ar ages and paleomagnetic data from the Negev, Israel. **Cretaceous Research**, v. 17, p. 293-310, 1996.

HAMES, W. E.; MCHONE, J. G.; RENNE, P. R.; RUPPEL, C. The central atlantic magmatic province: insights from fragments of Pangea. **Geophysical Monograph Series**, v. 136, p.128-151, 2002.

IRVING, E.; ARCHIBALD, D. A. Bathozonal tilt corrections to paleomagnetic data from Mid-cretaceous Plutonic Rocks: examples from the Omineca Belt, British-Columbia, **Journal Geophysical Research**, v. 95, n. 4, p. 4579-4585, 1990.

MCELHINNY, M. W.; POWELL, C. M.; PISAREVSKY, S. A. Paleozoic terranes of eastern Australia and the drift history of Gondwana. **Tectonophysics**, v. 362, n. 1-4, p. 41-65, 2003.

MENA M.; ORGEIRA M. J.; LAGORIO, S. Paleomagnetism, rock-magnetism and geochemical aspects

of early cretaceous basalts of the Paraná magmatic province, Misiones, Argentina. **Earth Planets Space**, v. 58, p. 1283-1293, 2006.

MINCATO, R. L.; ENZWEILER, J.; SCHRANK A. Novas idades 40Ar-39Ar e implicações na metalogênese dos depósitos de sulfetos magmáticos de Ni-Cu-EGP na província Ígnea Continental do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOQUÍMICA, 9., v. 1, 2003. Belém, Pará. **Anais...** Belém, 2003.

MONTES-LAUAR, C. R.; PACCA, I. G.; MELFI, A. J.; KAWASHITA, K. Late cretaceous alkaline complexes, southeastern Brazil: paleomagnetism and geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 134, p. 425-440,1995.

NASCIMENTO, M. A. L. **Geologia, geocronologia, geoquímica e petrôgenese das rochas ígneas cretácicas da província Magmática do Cabo e sua relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco (NE Brasil)**. 2003. 233 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

NOMADE, S.; THÉVENIAUT, H.; CHEN, Y.; POUCKET A.; RIGOLLET, C. Paleomagnetic study of French Guyana early Jurassic dolerites: hypothesis of a multistage magmatic event. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 184, n. 1, p. 155-168, 2000.

NÜRNBERG, G. D.; MÜLLER, R. D. The tectonic evolution of the South-Atlantic from Late Jurassic to Present. **Tectonophysics**, v. 191, n. 1-2, p.27-53, 1991.

O'CONNOR, J. M.; LE ROEX, A. P. South Atlantic hot spot-plume system: 1. Distribution of volcanism in time and space. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 113, p. 343-364, 1992.

OLIVEIRA, D. C. **O papel do enxame de diques Rio Ceará Mirim na evolução tectônica do Nordeste oriental (Brasil)**: implicações na formação do rifte Potiguar. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 1992.

POORNACHANDRA RAO, G. V. S.; MALLIKHARJUNA RAO, J. Palaeomagnetism of the Rajmahal Traps of India: Implication to the reversal in the Cretaceous Normal Superchron. **Journal Geomag Geoelectricity**, v. 48, n. 7, p. 993-1000, 1996.

- RABINOWITZ, P. D.; LA BRECQUE, J. The mesozoic South Atlantic ocean and evolution of its continental margins. **Journal Geophysical Research**, v. 84, p. 5973-6002, 1979.
- RAPOSO, M. I. B.; ERNESTO, M.; RENNE, P. R. Paleomagnetic and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data on the Early Cretaceous dyke swarm from the Santa Catarina Island, Southern Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 144, p. 199-211, 1998.
- RENNE, P. R.; ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; COE, R. S.; GLEN, J. M.; PREVOT, M.; PERRIN, M. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science**, v. 258, p. 975-979, 1992.
- RENNE, P. R.; GLEN, J. M.; MILNER, S. C.; DUNCAN, A. R. Etendeka flood volcanism age and associated intrusions in southwestern Africa. **Geology**, v. 24, p. 659-662, 1996a.
- RENNE, P. R.; DECKART, K.; ERNESTO, M.; FÉRAUD, G.; PICCIRILLO, E. M. Ponta Grossa dike swarm age (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 144, p. 199-211, 1996b.
- SCHULT, A.; GUERREIRO, S. D. C. Paleomagnetism of upper cretaceous volcanic-rocks from Cabo-de-Santo-Agostinho, Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 50 n. 1, p. 311-315, 1980.
- SHAW, P. R.; CANDE, S. C. High-resolution inversion for South-Atlantic plate kinematics using joint altimeter and magnetic anomaly data. **Journal Geophysical Research**, v. 95, n. 3, p. 2625-2644, 1990.
- SIAL, A. N. The post-Paleozoic volcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48, p. 299-311, 1976. Suplemento.
- SOMOZA, R.; ZAFFARANA, C. B. Mid-cretaceous polar standstill of South America, motion of the Atlantic hotspots and the birth of the Andean Cordillera. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 271, n. 1-4, p. 267-277, 2008.
- STEWART K.; TURNER S.; KELLEY S.; HAWKESWORTH C.J.; KIRSTEIN L.; MANTOVANI, M. S. M. 3-D  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology in the Paraná flood basalt province. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 143, p. 95-110, 1996.
- TARDUNO, J. A. Brief reversed polarity interval during the cretaceous normal polarity superchron. **Geology**, v. 18, n. 8, p. 683-686, 1990.
- THIEDE, D. S.; VASCONCELOS, P. M. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis supported by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  results. In: CONGRESSO BRASILEIRO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., Curitiba, Parana. **Anais...** Curitiba, 2008. p. 563.
- THOMPSON, R. N.; GIBSON, S. A.; MITCHELL, J. G.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H.; BROD, J. A.; GREENWOOD, J. C. Migrating cetaceous-ecene magmatism in the Serra do Mar Alkaline province, SE Brazil: Melts from the deflected Trindade Mantle Plume? **Journal of Petrology**, v. 39, n. 1, p. 493-1526, 1998.
- TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, p. 333-348, 1994.
- UNTERNEHR, P.; CURIE, D.; OLIVET, J. L.; GOSLIN, J.; BEUZART, P. South Atlantic fits and intraplate boundaries in Africa and South America. **Tectonophysics**, v.155, n. 1-4, p. 169-179, 1988.
- VANDENBERG, J.; KLOOTWIJK, C. T.; WONDERS, A. A. H. The late mesozoic and cenozoic movements of the Umbrian Peninsula: further paleomagnetic data from the Umbrian sequence. **Geology Society of America Bulletin**, v. 89, p. 133-150, 1978.
- VAN DER VOO, R. The reliability of paleomagnetic data. **Tectonophysics**, v. 184, n. 1, p. 1-9, 1990.
- VELÁZQUEZ, V. F.; GOMES, C. B.; CAPALDI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; ERNESTO, M.; KAWASHITA, K.; PETRINI, R.; PICCIRILLO, E. M. Magmatismo alcalino mesozoico na porção centro-oriental do Paraguai: aspectos geocronológicos. **Geochimica Brasiliensis**, v. 6, p. 23-35, 1992.

## expanded abstract

Paleomagnetism is an essential tool for determining and quantifying displacement and rotations of continental blocks. It is also a great help in tracing properly the South Atlantic opening history considering that the long (~40 Ma) quiet period of the Cretaceous Normal Superchron (CNS) hampers the determination of well dated rotation poles based on sea floor magnetic anomalies. For this purpose, reliable apparent polar wander paths (APWP) for South America and Africa, traced back to the pre-drift stage, are required. A well calibrated APWP along with information on magneostratigraphy is also useful in discriminating "pulses" of igneous activity within magmatic province that preceded or accompanied the Atlantic evolution. Paleomagnetic and radiometric evidence indicate that the igneous activity probably started during the Permo-Triassic in Northeastern Brazil (Ceará-Mirim dyke swarm), and in the Early Jurassic in the Southeastern area (Serra do Mar Magmatic Province).

The intensive Mesozoic magmatic activity that affected the South American plate facilitated the projection of a well calibrated APWP especially for the Early Cretaceous (fig. 1). Using the pole compilation presented by Font et al. (2009) for both South America and Africa, paleomagnetic reconstructions (fig. 2) were produced for the ages  $K_{11}$  (pre-drift),  $K_{12}$  (124Ma),  $K_{sc}$  (CNS; 100Ma) and  $K_5$  (80 Ma). The relative positions of the continents were then tested by comparing them with the reconstructions based on the sea floor features using the rotation poles given by Nürnberg and Müller (1991) for  $K_{11}$  and  $K_5$  ages, and by Eagles (2007) for  $K_{12}$  and  $K_{sc}$  ages. These Euler poles were chosen based on the analysis presented by Font et al. (op. cit.). In all cases the paleomagnetic rotation was applied to the continents after fitting them to the pre-drift situation. As paleomagnetism is insensitive to longitude variations, continents were moved apart at  $K_{sc}$  and  $K_5$  by 5° and 15°, respectively, in order to produce an oceanic overview as predicted in the oceanic reconstructions.

The oceanic islands usually interpreted as former mantle plumes (Tristan da Cunha, Trindade and Fernando de Noronha) in the current literature are also represented in figure 2 at their present coordinates. If they represent hotspots fixed to the mantle, their latitudes have been invariant throughout time, and did not coincide with the areas where the magmatic provinces developed. The paleomagnetic and the

oceanic reconstructions are in good agreement confirming that paleomagnetism may offer reliable constraints in fixing rotations and paleolatitudes of the lithospheric plates, which should not be dismissed in favor of the supposed constraints given by the hotspot/plume reference frame.

Paleomagnetic and radiometric evidence for older than Early Cretaceous (fig. 3) magmatism on the North and Southeastern Brazilian coast suggest that the extensional processes that led to the opening of the South Atlantic may have begun earlier than is supposed in the present models.