



## Anisotropia magnética e análise de imagens em diques clásticos

Edgard L. Catelani, Ricardo I. F. Trindade, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo

### Abstract

We have investigated the internal fabric of clastic dikes from the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin) through the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and the shape preferred orientation (SPO) of the grains. Results indicate that AMS ellipsoids are strongly influenced by compaction that reached ~30% in the studied outcrops. Conversely, SPO ellipsoids seem to recover the primary fabric, with foliation parallel to the dike walls and lineation with moderate to shallow inclination. Differences in fabric orientation derived from these two techniques are related to the carriers of anisotropy in each case. The AMS is carried by clay minerals within rock matrix that are strongly susceptible to mechanical re-orientation during compaction, whereas SPO is directly obtained from the more stable grain framework of the rock.

### Introdução

Os diques clásticos são potenciais indicadores de paleo-esforço e paleossismicidade. Entretanto, essas estruturas podem ser formadas tanto pela injeção de material durante atividade sísmica, quanto pelo preenchimento passivo de fraturas pré-existentes.

Diques clásticos sísmicamente induzidos dispõem-se preferencialmente em orientações paralelas ao eixo de tensão horizontal máximo (e.g., Bohem & Moore, 2002), tendo sua gênese relacionada ao desenvolvimento de fraturas tipo T que são preenchidas pelos sedimentos remobilizados. Portanto, essas estruturas podem ser utilizadas como registros do campo de tensões vigente durante a sua formação, desde que o mecanismo de formação dos diques seja determinado.

Recentemente, Levi et al. (2006) sugeriram que a análise da orientação da trama magnética no interior dos diques clásticos poderia ser utilizada para discriminar entre preenchimento "passivo" e "ativo". A anisotropia de susceptibilidade magnética é um indicador robusto da orientação preferencial dos grãos magnéticos (Tarling & Hrouda, 1993). Os diques com preenchimento passivo seriam caracterizados por foliações magnéticas horizontais, enquanto os diques com preenchimento ativo tenderiam a apresentar foliações magnéticas verticais, paralelas às paredes dos diques. Resultados obtidos em diques Pleistocênicos da planície de Amí'az, com baixa compactação pós-deposicional, na Bacia do Mar Morto, corroboram esse modelo. Entretanto, embora o método pareça promissor, ele necessita de validação em outros contextos.

Sendo assim, estudou-se os enxames de diques clásticos interpretados como sismitos na Formação Corumbataí e unidades cronocorrelatas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo (Riccomini et al., 1992). Três ocorrências expressivas são conhecidas na região de Piracicaba-Limeira e já foram alvo de estudos de detalhe (Riccomini, 1995; Turra, 2005). Esse estudo serve também como estudo-piloto para a investigação de estruturas sedimentares em geral por meio de técnicas magnéticas e imageamento do arcabouço, um projeto recém-iniciado em nosso laboratório.

### Metodologia/ Problema Investigado

A orientação preferencial dos grãos dos diques clásticos foi estudada por duas técnicas: (i) anisotropia de susceptibilidade magnética e (ii) anisotropia de forma (AFO) a partir de análise de imagens.

As medidas de ASM são efetuadas em amostras cilíndricas, coletadas com perfuratriz portátil e broca diamantada ao longo dos diques. Os cilindros são orientados no campo com bússola magnética e solar. No laboratório, os cilindros são seccionados em amostras-padrão de 2,2 x 2,54 cm para as medidas. As medidas de ASM são efetuadas em um susceptômetro KLY4 da Agico. Os tensores de anisotropia são estimados a partir de rotinas de ajuste por mínimos quadrados (Hext, 1963) e as médias das orientações dos eixos principais de anisotropia ( $k_1 > k_2 > k_3$ ) são obtidas a partir do método *bootstrap* (Constable e Tauxe, 1990). Para estes cálculos foi utilizado o programa Anisoft 3.1.

A anisotropia de forma a partir de análise de imagens é definida por um conjunto de pixels adjacentes contendo um mesmo código numérico (Figura 1A). Em uma grade reticulada, dois pixels são considerados adjacentes se eles apresentam pelo menos duas arestas em comum. A forma de um objeto 2-D é, na maioria das vezes, anisotrópica e mais ou menos convexa, podendo então ser representada por uma elipse (Figura 1B).

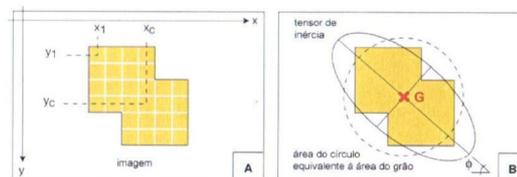


Figura 1 – A) Conjunto de pixels adjacentes definindo um objeto (grão, em amarelo); B) Tensor de inércia do grão representado por uma elipse com orientação ( $\theta$ ) do eixo maior (G: centro de massa do objeto). (Archanjo et. al. 2006).

O elipsóide que descreve a anisotropia de forma dos elementos analisados (grãos ou poros) pode ser obtido a partir do método dos interceptos (Launeau e Robin, 2002) que determina a anisotropia de uma malha 2-D. Esse método caracteriza um objeto de forma 2-D pela contagem de pontos que constitui a sua forma geométrica, ou seja, pela quantidade de vezes que uma reta L com ângulo  $\alpha$  "escapa" dos limites do corpo (Figura 2).

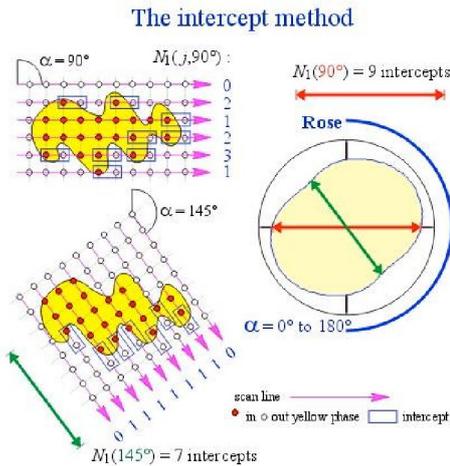


Figura 2 – Exemplos de utilização do método dos interceptos usando um gride com  $\alpha=90^\circ$  (acima) e um gride com  $\alpha=145^\circ$  (abaixo) no objeto amarelo de área X.

**Resultados**

Os dados de susceptibilidade magnética indicam valores de susceptibilidade fracos, variando entre  $20 \times 10^{-6}$  e  $150 \times 10^{-6}$  SI. Para todos os sítios, os elipsóides de ASM apresentaram baixo grau de anisotropia ( $P = k1/k3$ ), sempre inferior a 10%. Os elipsóides possuem formato oblato, com valores de grau de foliação ( $F = k2/k3$ ) significativamente maiores que os valores de grau de lineação ( $L = k1/k2$ ).

O comportamento da ASM para todos os diques foi bastante semelhante. As medidas forneceram eixos  $k1$  (lineação magnética) e  $k2$  horizontais e eixo  $k3$  (pólo da foliação) vertical, revelando uma foliação magnética horizontal, perpendicular ao plano dos diques. Na Figura 3, os resultados de medidas de anisotropia magnética do dique 1 (ED1) são apresentados. Note o forte agrupamento dos eixos  $k3$  (círculos) próximo da vertical e a distribuição em guirlanda dos eixos  $k1$  (quadrados) característica de uma trama do tipo oblata ( $F > L$ ).

Foram efetuadas análises de imagem para dois elementos das rochas que constituem os diques clásticos: os grãos (em tamanho silte a areia fina) e a matriz. Os

dados obtidos para os grãos e a matriz dos diques ED1 e ED3 são apresentados na Figura 4.

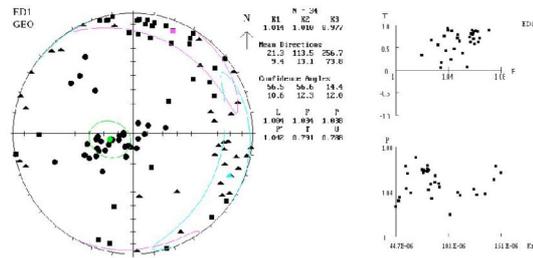


Figure 3 – Estereograma com os resultados da ASM do dique ED1 (a esquerda), síntese dos valores encontrados pelo método (centro), gráfico de T x P mostra características da forma do grão se é oblato ou prolato (a direita superior) e o gráfico P x Km (parte inferior a direita) mostra a correlação entre o grau de anisotropia e a susceptibilidade magnética.

Nos dois casos estudados a foliação definida pelos grãos e pela matriz tem orientação vertical e concordante com a orientação das paredes dos diques, seja ele orientado NE-SW (dique ED1) ou NW-SE (dique ED3). Nos dois diques a lineação tem inclinação horizontal a intermediária.

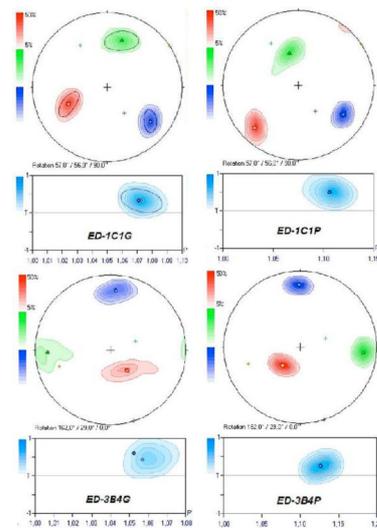


Figura 4 – Orientação dos elipsóides de forma obtidos por análise de imagens em amostras dos diques ED1 (acima) e ED3 (abaixo). Os diagramas abaixo dos estereogramas indicam o parâmetro de forma T contra o grau de anisotropia P. São representados nesses gráficos os resultados obtidos para os grãos (G) e para a matriz (P) em duas amostras de cada dique. Em azul: eixo mínimo, em verde: eixo intermediário e em vermelho: eixo máximo. O eixo mínimo corresponde ao pólo da foliação e o eixo máximo corresponde a lineação.

## Discussão e Conclusões

Os resultados obtidos nesse estudo revelam um comportamento contrastante entre a anisotropia magnética e a anisotropia de forma dos grãos de quartzo e dos interstícios. A anisotropia magnética, que é controlada predominantemente pela argila que ocupa os espaços entre os grãos de quartzo, fornece foliações horizontais e elipsóides fortemente oblatos, onde a orientação da lineação não pode ser determinada com precisão. Esse comportamento foi descrito por Levi et al. (2006) como típico de diques netunianos, formados pelo preenchimento passivo de uma fratura pré-existente. No entanto, diversas estruturas nos diques da Formação Corumbataí, dentre as quais as extrusões de areia e a inflexão das camadas nas paredes dos diques, demonstram que esses diques foram formados por injeção. A anisotropia de forma, por outro lado, mostra foliação fortemente inclinada e concordante com a orientação do plano dos diques analisados. Com essa técnica foi possível também discriminar uma lineação, que apresenta inclinação baixa a moderada.

O comportamento da ASM é interpretado como resultado da forte compactação sofrida pelos diques (cerca de 30%). Nesse caso, os minerais de argila, que controlam a anisotropia de susceptibilidade, rapidamente orientam-se perpendicularmente ao eixo de compressão, fornecendo uma foliação horizontal, enquanto os grãos de quartzo possuem um comportamento mais robusto e preservam em boa parte a orientação original. Esse comportamento, sugere cautela no uso da técnica de ASM como ferramenta de reconhecimento de diques clásticos, especialmente nos casos onde houver forte compactação.

## Agradecimentos

Aos professores Carlos J. Archanjo Renato P. Almeida, C. Riccomini e ao aluno de Mestrado Bruno Turra, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho, ao IAG e IGc pelo uso dos equipamentos essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa e à FAPESP que parcialmente financiou esta pesquisa, por meio de uma bolsa de Iniciação Científica.

## Referências

- Archanjo, C.J., Gomes, M.S., Castro, J., Launeau, P., Trindade, R.I.F., Macedo, J.W.P., 2006. AMS and grain shape fabric of the Late Paleozoic diamictites of Southeastern Paraná basin, Brazil. *Journal of the Geological Society of London*, 163: 95-106.
- Boehm, A. e Moore, J.C., 2002. Fluidized sandstone intrusions as an indicator of Paleostress orientation, Santa Cruz, California. *Geofluids*, vol. 2: 147-161.
- Constable, C. e Tauxe, L., 1990. The bootstrap for magnetic susceptibility tensors. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B6): 8383-8395.
- Hext, G.R., 1963. The estimation of second order tensors with related tests and design. *Biometrika*, 60: 353-373.
- Launeau P., Robin P.-Y.F., 1996. Fabric analysis using the intercept method. *UFR des sciences et des Techniques, Université de Nantes, Tectonophysics*, 267 : 91-119.
- Levi, T., Weinberger, R., Aifa, T., Eyal, Y., Marco, S., 2006. Earthquake-induced clastic dikes detected by anisotropy of magnetic susceptibility. *Geology*, 34: 6-72.
- Riccomini, C.; Chamani, M.A.C.; Agena, S.S.; Fambri, G.L.; Fairchild, T.R.; Coimbra, A.M., 1992. Earthquake-induced liquefaction features in the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin, Brazil) and the dynamics of Gondwana. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 64:210.
- Riccomini, C.; ALMEIDA, R.P.; Turra, B.B.; Chamiani, M.A.C.; Fairchild, T.R.; Hachiro, J., 2005. Reativação de falha do embasamento causa sismicidade no Permian da Bacia do Paraná. In: X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos e IV International Symposium on Tectonics of the Brazilian Geological Society, Curitiba, PR. *Boletim de Resumos Expandidos*, Curitiba, PR, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Paraná, p.18-20.
- Tarling, D.H. e Hrouda, F., 1993. *The magnetic Anisotropy of Rocks*. London, Chapman and Hall. 217p.
- Turra, B.B., 2005. *Sismos Permianos da Borda Leste da Bacia do Paraná*. Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 48p.