



REORIENTAÇÃO DE TESTEMUNHO A PARTIR DA MAGNETIZAÇÃO VISCOSA E DA ANISOTROPIA MAGNÉTICA

Janine A. Carmo^{1*}, Ricardo I. F. Trindade¹, Elder Yokoyama²

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, Brasil.

²Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Brasil.

*e-mail: janine.carmo@iag.usp.br

ABSTRACT

The orientation of borehole cores is critical to the analysis of the spatial variability of structural elements and petrophysical parameters. This work describes and test a new technique completely based on the reorientation of two magnetic elements obtained independently - viscous magnetization vector (VRM) and the minimum axis of anisotropy of magnetic susceptibility. The method was applied to a core collected in the Recôncavo Basin, Northeast Brazil, which cut shale of the Candeias Formation (Lower Cretaceous). The specimens were subjected to alternating field (AF) demagnetization for determining components of magnetic remanence, and their anisotropy of magnetic susceptibility was measured to define the magnetic fabric of the rock.

Keywords: Paleomagnetism, Core reorientation, Viscous magnetization.

RESUMO

A orientação de testemunhos de rocha é fundamental para a análise da variabilidade espacial de elementos estruturais e parâmetros petrofísicos. Neste trabalho será descrita e testada uma nova técnica de reorientação magnética baseada em dois elementos obtidos de forma independente – o vetor de magnetização viscosa (MRV) e a orientação dos eixos de anisotropia magnética. O método foi aplicado a um testemunho coletado na Bacia do Recôncavo, que corta folhelhos da Formação Candeias (Cretáceo Inferior). Os espécimes foram submetidos à desmagnetização por campos alternados para a determinação de componentes magnéticas e medidas de anisotropia de susceptibilidade para definir a trama magnética.

Palavras Chave: Paleomagnetismo, Reorientação de testemunho, Magnetização viscosa.

1. Introdução

Testemunhos de rocha são fundamentais na descrição e modelagem de reservatórios de hidrocarbonetos. A orientação de testemunhos é necessária para viabilizar a análise de propriedades direcionais desses reservatórios, como elementos estruturais e parâmetros petrofísicos anisotrópicos (Davison e Haszeldine, 1984; Nelson *et al.*, 1987). Diversas técnicas são utilizadas para a orientação de testemunhos, sendo as técnicas de orientação em *in-situ* as mais aplicadas (Eastman-Whipstock, 1982; Kulander *et al.* 1990). Essas técnicas podem ser feitas a partir da marcação do próprio testemunho ou envolvendo o emprego de métodos indiretos que se utilizam da orientação por imageamento (*e.g.*, Mathis *et al.*, 1995; Palsen *et al.*, 2000; Payenberg *et al.*, 2000; Paulsen *et al.*, 2002). Todavia, esses são métodos caros e que demandam muito tempo de execução. Além disso, muitas vezes esses métodos não passam por controle de qualidade gerando incertezas quanto à orientação, além de não permitir reorientar testemunhos que já foram coletados e encontram-se armazenados (Nelson *et al.*, 1987; Hailwood e Ding, 1995; Shipton *et al.* 2001).



O emprego de outros métodos indiretos, como paleomagnetismo, tem sido descritos em alguns trabalhos (e.g., McWilliams e Pinto, 1988; Rolph *et al.*, 1995; Weinberger *et al.*, 1995; Didenko, 1996; Paulsen *et al.*, 2000). A maioria deles utiliza a orientação de uma componente de magnetização característica (vetor de magnetização primária), que deve ser comparado com o vetor de referencia da mesma idade da rocha. Porém, a técnica acaba sendo invalidada caso a rocha tenha sido remagnetizada ou caso haja rotação dos blocos no local amostrado. Para minimizar estes problemas, duas abordagens foram tentadas: (1) o uso da magnetização remanente viscosa, que aponta necessariamente para o norte magnético recente (Rolph *et al.* 1995; Didenko, 1996), e (2) a inclusão de um elemento estrutural evidente do testemunho que acusaria eventuais rotações de blocos (Weinberg *et al.* 1995).

Neste trabalho será descrita o desenvolvimento de uma nova técnica de reorientação magnética baseada em dois elementos obtidos de forma independente – o vetor de magnetização viscosa e a orientação dos eixos de anisotropia magnética.

2. Teoria

Os testemunhos são normalmente orientados quanto ao topo ou a base do poço, mas raramente apresentam orientação com relação ao referencial geográfico. As técnicas de reorientação são utilizadas para transpor os elementos direcionais do testemunho (direções de magnetização, fraturas, falhas, estrias, plano de acamamento, etc.) do referencial local para o referencial geográfico. Para tal, utiliza-se o conceito de mudança de base, que consiste em calcular as coordenadas de vetores em diferentes direções, ou seja, deve-se utilizar uma matriz mudança de base (M) para expressar o vetor de coordenadas $[x, y, z]$ em uma nova coordenada $[x', y', z']$, exemplificado pela equação (1):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (1)$$

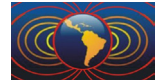
Para construir a matriz mudança de base, expressamos a fórmula geral de rotação em torno dos eixos O_z , O_x e O_y para trazer a direção dos elementos magnéticos, estruturais e petrofísicos no referencial do testemunho, para o referencial geográfico. A combinação das três matrizes de rotação (O_z , O_x , O_y) aplicada à equação (1) resulta na reorientação do sistema de coordenadas nos três eixos de rotação, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M_\theta M_\beta M_\gamma \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

na qual a Matriz de Rotação resultante é descrita por:

$$M_\theta M_\beta M_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \gamma - \sin \theta \cos \beta \sin \gamma & \sin \theta \cos \gamma + \cos \theta \cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma \\ -\cos \theta \sin \gamma - \sin \theta \cos \beta \cos \gamma & -\sin \theta \sin \gamma + \cos \theta \cos \beta \cos \gamma & \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \beta \sin \gamma & -\cos \theta \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Qualquer parâmetro direcional pode ser reorientado de acordo com a equação (1). Aqui propomos para aplicar em dois elementos magnéticos que estão intrinsecamente gravados em qualquer rocha: a magnetização remanente (um vetor) e a anisotropia de susceptibilidade magnética (um tensor). Normalmente, rochas contêm uma magnetização natural remanente (MRN) adquirida durante a sua formação (remanência primária) ou mais tarde na história geológica da rocha como resultado de metamorfismo (remanência secundária). Sobrepondo-se a MRN as rochas adquirem uma magnetização remanete viscosa (MRV), que resulta a partir do decaimento exponencial da remanência original na presença de um campo ambiente. Na presença do campo magnético da terra, a remanência viscosa vai se alinhar com o Norte magnético,



proporcionando assim uma referência absoluta para a orientação da rocha (Butler *et al.*, 1992).

3. Materiais e métodos

O método desenvolvido aqui foi aplicado a um testemunho de rocha que atravessa folhelhos lacustres cinza-escuros intercalados com camadas delgadas de calcário do membro Gomo (Formação Candeias), que compreende parte do intervalo Cretáceo Inferior da Bacia do Recôncavo (Nordeste do Brasil) (Viana *et al.*, 1971; Silva *et al.*, 2007). Foram utilizados neste estudo um total de 95 fragmentos do núcleo entre as profundidades 2098.05 e 2457.55 m do poço 7-C-208-BA (lat. 12°41'55.3" S; long. 38°31'17.95" W). No laboratório, primeiramente marcamos a orientação de topo em cada um dos fragmentos do testemunho de modo que esta informação não fosse perdida durante o processo de corte (Figs. 1a e 1b). Após a marcação, os fragmentos foram cortados em amostras de cerca de 2x2x2 cm (Figs. 1c e 1d). O número de amostras

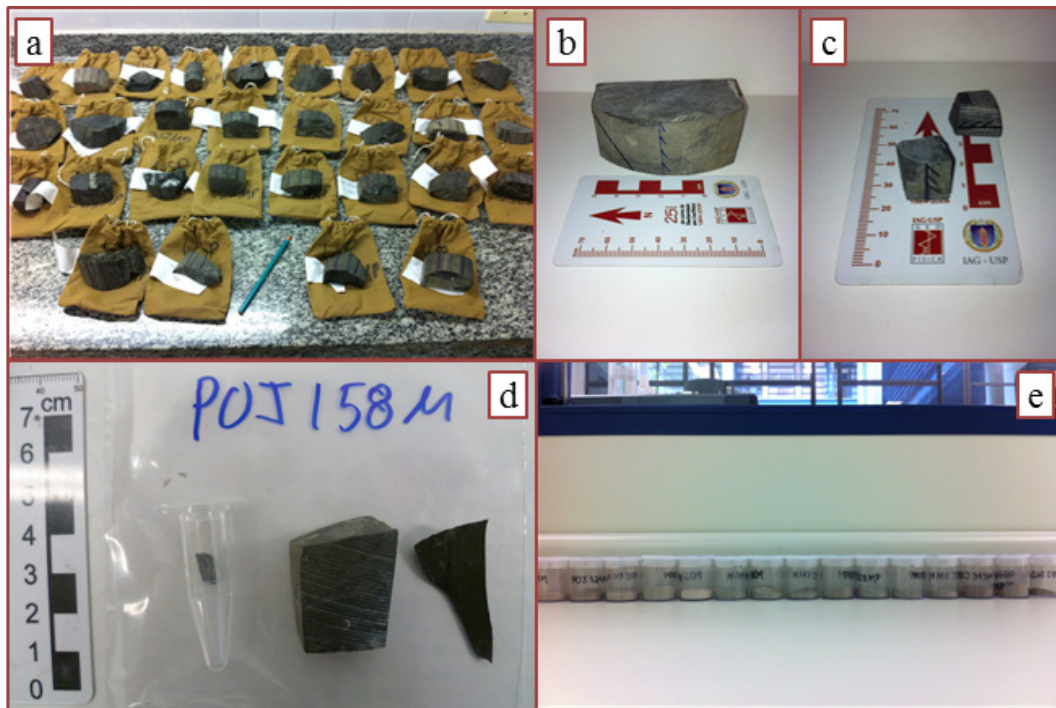


Figura 1. Preparação das amostras. Em (a) fragmentos de rocha coletados do testemunho 7C-208-BA. Em (b) fragmento no detalhe com marcação de topo/base, em (c) e (d) amostras após o preparo, e em (e) amostras após pulverização.

por fragmento variaram de um a sete, dependendo da quantidade e do estado do material disponível. Uma fração da amostra foi pulverizada para aquisição de curvas termomagnéticas (Fig. 1e).

Todas as medidas foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP). As medidas de anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) foram obtidas utilizando o equipamento Kappabridge (modelo MFK1-FA, AGICO Ltd.), ajustado na frequência de 976 Hz, com a intensidade do campo magnético em 200 A/m (Dearing *et al.*, 1996). O tratamento dos dados de ASM foi efetuado através do software Anisoft 4.2 (AGICO Ltd.), onde se calculou o elipsoide de anisotropia, incluindo os parâmetros anisotrópicos e os erros estatísticos (Jelinek, 1977). Para determinar o vetor de magnetização remanente natural (MRN) optamos pelo procedimento de desmagnetização por campo alternados (AF), foram feitas medidas no magnetômetro 2G-Enterprises do tipo SQUID (Superconduction Quantum Interference Device) acomodado em uma sala magneticamente isolada (magnetically shielded room), com campo magnético interno inferior a 500 nT.



O protocolo escolhido consistiu em 46 passos de desmagnetização, desta maneira foi possível isolar com maior precisão a componente de remanência viscosa, registrada nas frações de baixa coercividade. Os dados de MRN foram tratados através do software Remasoft 3.0 (AGICO Ltd.), onde as componentes magnéticas são identificadas através de projeção ortogonal (Zijderveld, 1967) e calculadas utilizando-se a análise de componentes principais desenvolvida por Kirschvink (1980).

4. Resultados e Análises

Para a reorientação dos diferentes fragmentos do testemunho 7-C-208-BA será utilizada uma rotina que combina: (1) a rotação ao longo de um eixo vertical de modo a levar o vetor de MRV médio de cada fragmento para a declinação prevista pelo IGRF (International Geomagnetic Reference Field), $D = 336.7^\circ$ e $I = -23.2^\circ$, (2) a rotação em torno de um eixo horizontal paralelo a direção da foliação magnética, de modo a levá-la para a horizontal ou, de forma equivalente, levar o para a vertical. Os dois parâmetros, MRV e k_3 , são obtidos de forma independente e estão relacionados a elementos diferentes da mineralogia magnética da rocha (Fig. 2).

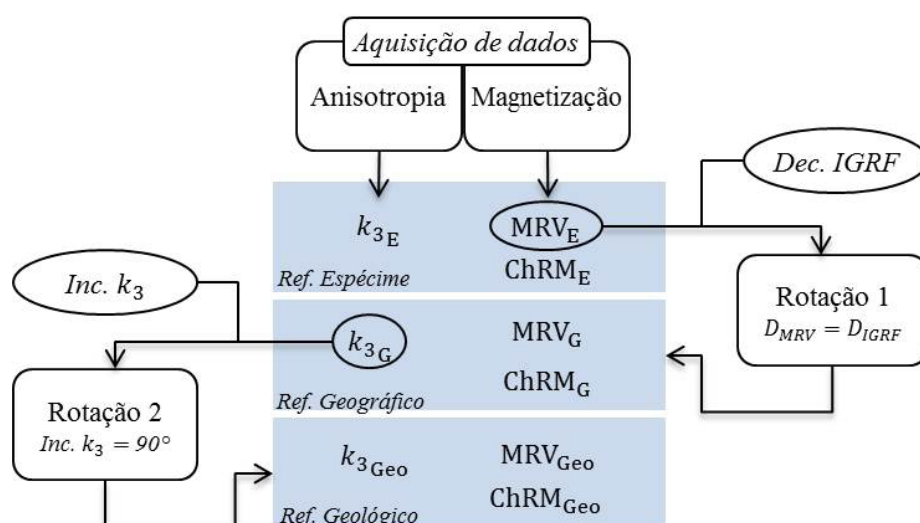


Figura. 2. Fluxograma com os passos utilizados para a reorientação e obtenção da ChRM no referencial geológico. (1) Foram obtidos os dados de anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM), a fim de determinar k_3 , e dados de magnetização para determinar as direções da componente viscosa (MRV) e da componente primária (ChMR) – Referencial de espécime. (2) Rotação ao longo de um eixo vertical de modo a levar o vetor de MRV médio de cada fragmento para a declinação prevista pelo IGRF – Referencial geográfico. (3) Rotação em todo de um eixo horizontal paralelo ao strike da foliação magnética para levar o k_3 para a vertical – Referencial geológico.

A componente viscosa foi isolada entre 0 e 10 mT para 71 amostras, correspondendo a 75% das amostras analisadas. Calculamos a média das inclinações a partir da rotina de Arason e Levi (2010), implementada em um template Excel© por Begnini (2012). A inclinação média da componente viscosa calculada foi -21.5° , com um $\alpha_{95} = 9.8^\circ$. Este valor se superpõe, dentro do erro, àqueles esperados do campo recente para a posição em que o testemunho foi recuperado, seja o campo dipolar para a latitude do testemunho ($D = 0^\circ$ e $I = -23.2^\circ$), seja o campo definido pelo IGRF ($D = 336.7^\circ$ e $I = -30.5^\circ$), Figura 3.

O método de reorientação de testemunho proposto neste trabalho obedece essencialmente duas premissas. A primeira é que a MRV pode ser identificada através do processo de desmagnetizações parciais sucessivas bastante detalhadas e é paralela ao campo magnético recente, representado aqui pelo IGRF. A segunda premissa adotada refere-se à posição original do acamamento, que foi a horizontal, e também o fato que a trama magnética reflete com fidelidade a trama mineral da rocha.

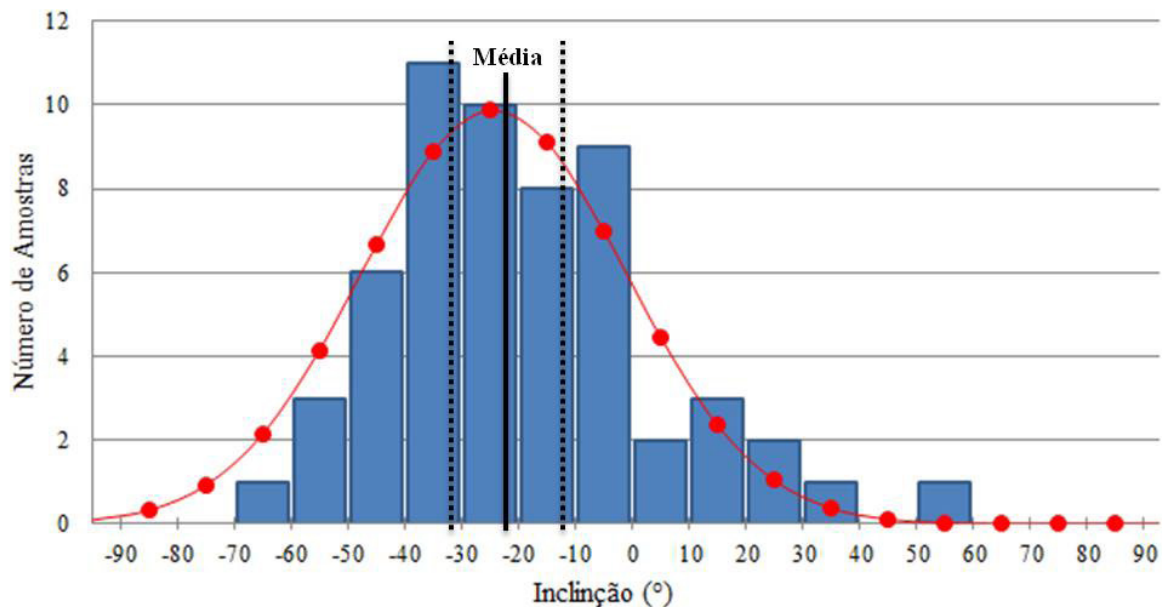
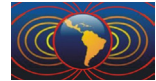


Figura. 3. Distribuição das inclinações da componente de magnetização remanente viscosa (MRV). O valor médio das inclinações obtido foi -21.5° , com um $\alpha_{05} = 9.8^\circ$

A anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) de 80 espécimes foi medida com o objetivo de determinar a orientação da trama magnética das amostras. O grau de anisotropia $P = k_1/k_3$ é baixo, e varia de 1.013 a 1.092, com valor médio de 1.05. O diagrama mostra a variação do fator de forma, contra o grau de anisotropia. Existe uma predominância de amostras com comportamento oblato, indicando que a foliação magnética é mais bem definida do que a lineação magnética. De fato, em ambientes sedimentares onde a deposição ocorre essencialmente por decantação os autovetores k_1 e k_3 distribuem-se ao longo de um plano que coincide com o plano de acamamento, que deve ser bastante próximo da horizontal. Como o k_3 é perpendicular a este plano, espera-se que tenha inclinação vertical.

Sabendo que as amostras obedecem às premissas propostas neste trabalho, resolvemos testar o método em dois fragmentos de testemunhos (sítios: POJ328 e POJ331). Após obter a MRV para cada sítio (Fig. 4a), rotacionamos as amostras para que a declinação da MRV coincidissem com a direção obtida pelo IGRF ($D = 336.7^\circ$), como é mostrado na Figura 4b. Aplicamos a mesma correção feita para orientar os vetores da componente viscosa, aos dados de ASM para reorientar o elipsoide de anisotropia (Figs. 4c e 4d). Notamos que a correção acarretou numa definição da componente, com a inclinação média de k_3 é possível calcular a correção necessária para a acomodação da foliação magnética no plano horizontal, como era de se esperar numa sucessão sedimentar de ambiente lacustre.

5. Conclusões

Neste trabalho estudamos a possibilidade de reorientar de testemunhos a partir da magnetização viscosa e da anisotropia magnética, o método mostrou-se razoavelmente eficaz e se baseia em duas premissas: (1) o vetor de Magnetização Remanente Viscosa (MRV) apresenta direção paralela ao campo magnético ambiente durante coleta das amostras, (2) as unidades depositadas possuem acamamento horizontal, que pode ser traçado pela anisotropia magnética. Os testes efetuados em 95 amostras sugeriram que o testemunho pode ser reorientado, já que 70% das amostras atendem os critérios propostos nas premissas..

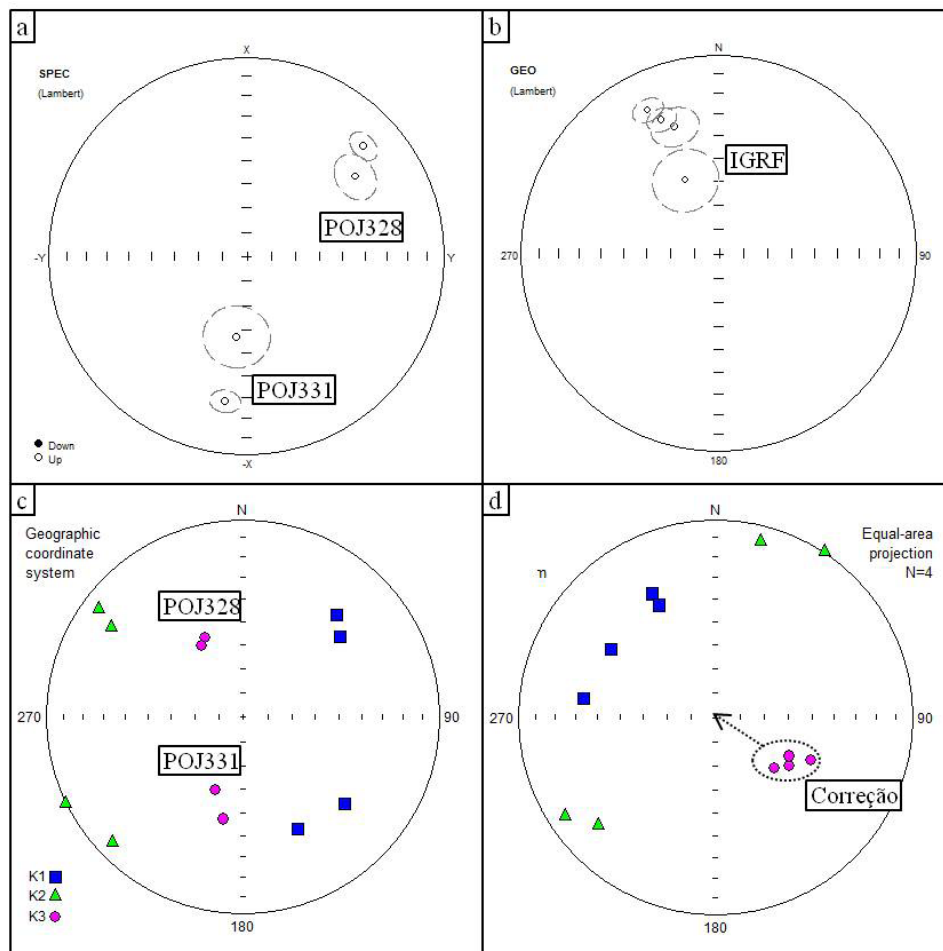
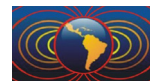


Figura. 4. Rotação dos fragmentos POJ328 e POJ331. Em (a) direções de magnetização remanente viscosa (MRV) para os dois sítios. Em (b) rotação das componentes viscosa para que a declinação da MRV coincidissem com a direção obtida pelo IGRF. Em (c) dados de anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) para os dois sítios, antes da correção – Referencial de espécime. E, em (d) dados de ASM após a correção pela MRV – Referencial geográfico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras S.A. pelo suporte financeiro e a autorização para divulgar estes resultados. Nós também agradecemos Daniele Brandt, Plínio Jaqueto e GiovanniMoreira pela assistência.

Referências

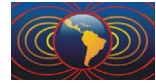
Arason, P., Levi, S., 2010. Maximum likelihood solution for inclination-only data in paleomagnetism. *Geophysical Journal International*, 182 (2), 753-771.

Begnini, G. S., 2012. Determinação de inclinação magnética em tijolos e datação arqueomagnética no Engenho Central de Piracicaba, São Paulo. Trabalho de Graduação, USP, Brasil, 34 p.

Butler, R. F., 1992. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes. Blackwell Scientific Publications, Boston, 319 p.

Davison, I., Haszeldine, R. S., 1984. Orienting conventional cores for geological purposes: a review of methods. *Journal of Petroleum Geology*, 7 (4), 461-466.

Dearing, J. A., Dann, R. J. L., Hay, K., Lees, J. A., Loveland, P. J., Maher, B. A., O’Grady, K., 1996.



- Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124 (1), 228-240.
- Didenko, A. N., 1996. Modification of the borehole core orientation method with the use of viscous magnetization. *Physics of the solid Earth - English Translation*, 31 (10), 879-884.
- Eastman Whipstock, 1982. Eastman Whipstock Inc., general catalog, 51 p.
- Hailwood, E. A., Ding, F., 1995. Paleomagnetic reorientation of cores and the magnetic fabric of hydrocarbon reservoir sands. In Turner, P. & Turner, A. (eds) "Paleomagnetic applications in Hydrocarbon Exploration and Production". *Geological Society Special Publications*, 98, 245-258.
- Jelinek, V., 1977. The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and its application. *Geofyzika*, Brno, 88 p.
- Kirschvink, J. L., 1980. The least-squares lines and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62 (3), 699-718.
- Kulander, B. R., Dean, S. L., Ward, B. J., Jr., 1990. Fractured core analysis: interpretation, logging, and use of the natural and induced fractures core. American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration, University of Michigan, 88 p.
- Mathis, B., Haller, D., Ganem, H., Stander, E., 1995. Orientation and calibration of core and borehole image data. Society of Professional Well Log Analysts 36th Annual Logging Symposium, 262, Paris, France, 26-29 June.
- McWilliams, M., Pinto, M. J., 1988. Paleomagnetic results from granitic basement rocks in the Cajon Pass Scientific Drillhole. *Geophysical Research Letters*, 15 (9), 1069-1072.
- Nelson, R. A., Lenox, L. C., Ward, B.J., 1987. Oriented Core: Its use, error, and uncertainty. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71 (4), 357-367.
- Paulsen, T. S., Jarrard, R. D., Wilson, T. J., 2002. A simple method for orienting drill core by correlating features in whole-core scans and oriented borehole-wall imagery. *Journal of Structural Geology*, 24 (8), 1233-1238.
- Paulsen, T. S., Wilson, T. J., Moos, D., Jarrard, R. D., Wilson, G. S., 2000. Orientation of CRP-2A core, Victoria Land Basin, Antarctica. *Terra Antartica*, 7 (3), 271-278.
- Payenberg, T. H. D., Lang, S. C., Koch, R., 2000. A simple method for orienting conventional core using microresistivity (FMS) images and a mechanical goniometer to measure directional structures on cores. *Journal of Sedimentary Research*, 70 (2), 419-422.
- Rolph, T. C., Shaw, J., Harper, T.R., Hagan, J.T., 1995. Viscous remanent magnetization: a tool for orientation of drill cores. In Turner, P. & Turner, A. (eds) "Paleomagnetic applications in Hydrocarbon Exploration and Production". *Geological Society Special Publications*, 98, 239-243.
- Shipton, Z.K., Evans, J.P., Robeson, K.R., Forster, C.B., Snelgrove, S., 2001. Structural heterogeneity and permeability in aeolian sandstone: implications for subsurface modelling of faults. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86 (5), 863-883.
- Silva, O.B., Caixeta, J.M., Milhomen, P.S., Kosin, M. D., 2007. Bacia do Recôncavo. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15 (2), 423-451.
- Viana, C. F., Gama, E. G, Jr., Simões, I. A., Fonseca, J. R., Alves, R. J., 1971. Revista estratigráfica da Bacia do Recôncavo. *Boletim técnico da Petrobrás*, 14, 3/4, 157-192.
- Weinberger, R., Amotz, A., Ron, H., Garfunkel, Z., 1995. Rotation about an inclined axis: three dimensional matrices for reconstructing paleomagnetic and structural data. *Journal of structure Geology*, 17 (6), 777-782.
- Zijderveld, J. D. A., 1967. A.C. Demagnetization of rocks. In: D.W. Collinson, K.M. Creer and S.K. Runcorn (eds) "Methods in Paleomagnetism". Elsevier, 256-286.