

APLICAÇÃO DE MÉTODOS PALEOMAGNÉTICOS NA ANÁLISE DE COMPLEXOS DE INJEÇÃO DE AREIA NA BACIA DE SAN JOAQUIN, CALIFÓRNIA (EUA)

Caroline Azzolini Pontel^{1*}, Jairo Francisco Savian¹, Ruy Paulo Philipp¹, Gustavo Zvirtes², Matthew John Brett², Andrew Hurst²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

² Universidade de Aberdeen, Aberdeen, Escócia.

*e-mail: caroline.azzolini@ufrgs.br

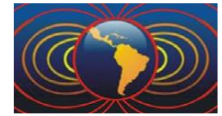
ABSTRACT

Sand injection complexes are crucial targets in hydrocarbon exploration, playing a vital role in facilitating vertical and horizontal connectivity in oil fields, particularly in low-permeability reservoirs. However, due to their complex lithological composition, creating accurate geochronological models poses a challenge. To enhance our understanding of these structures, the main objective of this study is to employ paleomagnetic methods on sedimentary rock samples from the San Joaquin Basin in California, USA. This area encompasses deposits from the Moreno Formation and sand injectites of the Panoche Giant Injection Complex (PGIC), recognized as one of the world's largest exposures of injectites. We carried out hysteresis loops and isothermal remote magnetization acquisition curves (IRM). These analyses provided crucial information for classifying the magnetic domains of the samples, as shown in the Day Plot. The results revealed that the magnetic mineralogy of the sandstone samples is mainly magnetite, while minerals with hematite behavior are also found in the mudstones. These minerals predominantly show structures corresponding to PSD (simple pseudo-domain), which exhibit transitional magnetic properties between having their internal field uniform throughout their structure and multiple magnetic domains. These findings on magnetic mineralogy are fundamental for a more precise interpretation of magnetostratigraphy and the paleoflow of sedimentary layers, aspects that will still be explored in future research.

Keywords: Magnetic mineralogy, Paleomagnetism, Panoche Giant Injection Complex, Fore arc basin

RESUMO

Complexos de injeção de areia são alvos cruciais na exploração de hidrocarbonetos, constituindo um importante fator de aumento da conectividade vertical e horizontal em campos petrolíferos, especialmente em reservatórios de baixa permeabilidade. No entanto, devido à sua complexa composição litológica, a criação de modelos geocronológicos precisos é desafiadora. Visando melhorar a compreensão a respeito de tais estruturas, este estudo tem como principal objetivo avaliar o uso de métodos paleomagnéticos em amostras de rochas sedimentares da Formação Moreno da Bacia de San Joaquin, no estado da Califórnia (EUA), e de arenitos de injeção do Complexo de Injeção Gigante de Panoche (*Panoche Giant Injection Complex*, PGIC), uma das maiores exposições de injetitos de areia no mundo. Utilizando o magnetômetro VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*), obteve-se as curvas de histerese e curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI). Essas análises proporcionaram informações cruciais para a classificação dos domínios magnéticos das amostras, conforme demonstrado no diagrama de Day. Os resultados revelaram que mineralogia magnética das amostras de arenitos apresentam, principalmente, magnetita, enquanto nos lamitos também são encontrados minerais com comportamento de hematita. Esses minerais apresentam um predomínio de estruturas do tipo PSD (*simple pseudo-domain*), que exibem propriedades magnéticas transicionais entre ter seu campo interno uniforme em toda a sua estrutura e múltiplos domínios magnéticos. A definição da mineralogia magnética é fundamental para uma interpretação



mais precisa da magnetoestratigrafia e do paleofluxo das camadas sedimentares, aspectos que ainda serão explorados em pesquisas futuras.

Palavras Chave: mineralogia magnética, paleomagnetismo, Complexo de Injeção Gigante de Panoche, Bacia de Ante Arco

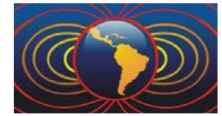
Introdução

Na Bacia de San Joaquin, no estado da Califórnia (EUA), encontra-se o Complexo de Injeção Gigante de Panoche (*Panoche Giant Injection Complex*, PGIG), uma das maiores exposições de injetitos de areia no mundo. Trata-se de uma sucessão sedimentar exposta de maneira descontínua ao longo do flanco leste da cordilheira Coast Range. As rochas fazem parte do *Great Valley Group* (GVG) (Ingersoll, 1982), sucessão depositada como uma bacia sin-orogênica de forearc associada a orogenia Nevadiana, com deposição entre o Jurássico Superior e o Oligoceno (Dickinson, 1981; Ingersoll, 2008). A Bacia de San Joaquin foi desenvolvida em uma margem convergente de estilo andino (Graham, 1987) com um sistema de trincheira de arco criado pela subducção da crosta oceânica (Oceano Farallon), sob a placa continental norte-americana para o leste (*e.g.* Atwater, 1970; Atwater, Stock, 1998), gerando as suítes graníticas do Batólito de Sierra Nevada e as rochas metamórficas do Complexo Franciscano, representando as unidades do prisma acrescionário, desenvolvidos a leste e oeste da bacia, respectivamente.

As rochas Maastrichtianas à Danianas do *Great Valley Group* correspondem à Formação Moreno, a qual registra a transição de um ambiente marinho profundo para um ambiente plataformar (Payne, 1951; McGuire, 1988), sendo constituída pelos membros Dosados, Tierra Loma, Marca e Dos Palos. Este último é foco deste estudo, especialmente devido à presença da camada Cima Lentil em sua estratigrafia, constituída por um arenito siltoso interpretado como produto de extrusão de areia de fundo marinho durante a colocação do PGIC (*e.g.* Vigorito *et al.*, 2008; Vigorito, Hurst, 2010), embora também se tenha evidências de entrada deposicional (Hurst *et al.*, 2017). Quando o paleofundo oceânico foi rompido por hidrofraturas, múltiplas fraturas ocorreram, sendo preenchidas por areia extrudida no fundo do mar. Posteriormente, as areias se agregaram em fácies de extruditos (Hurst *et al.*, 2006), resultando em bolsões de grande continuidade lateral (Vigorito *et al.*, 2022).

Os complexos de injeção de areia constituem alvos para exploração de hidrocarbonetos, fornecendo excelentes unidades de fluxo intra-reservatório que criam comunicação vertical e lateral em todo o campo petrolífero dentro de unidades de baixa permeabilidade (Hurst, Cartwright, 2007). A rápida migração de fluidos em depósitos de areia também pode causar aumento repentino da pressão dos poros, iniciando a fluidização e injeção da areia (Hurst *et al.*, 2011). De tal modo, a ocorrência de injetitos têm sido uma característica cada vez mais estudada e vinculada a reservatórios de hidrocarbonetos, em particular em sistemas clásticos de águas profundas, onde eles são conhecidos por influenciar a distribuição e recuperação de reservas formando expressivos reservatórios de hidrocarbonetos, como exemplificado por diversos campos de óleo no Mar do Norte (*e.g.* Huuse, Mickelson, 2004; Huuse *et al.*, 2007; Hurst, Cartwright, 2007; Hurst *et al.*, 2016).

No entanto, estabelecer modelos geocronológicos precisos é desafiador devido à complexidade dos estratos e à composição litológica. Visando aprimorar a compreensão dessas estruturas, este estudo emprega métodos paleomagnéticos em uma seção da Formação Moreno para obter informações como a mineralogia magnética, o paleofluxo e a magnetoestratigrafia de suas rochas sedimentares. A análise de minerais magnéticos permite a compreensão da natureza e possível origem desses minerais por meio de suas propriedades magnéticas.



Curvas de histerese e curvas de magnetização remanente isotérmica (MRI) podem ser aplicadas em estudos relacionados a rochas sedimentares, enquanto outros métodos paleomagnéticos, como a anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM), fornecem informações adicionais sobre a magnetização adquirida pelos materiais magnéticos presentes nas sequências sedimentares de reservatórios.

A magnetoestratigrafia é uma técnica cronoestratigráfica que possibilita a datação de sequências sedimentares através da determinação da polaridade do campo magnético terrestre no momento da deposição das camadas. Essa ferramenta já foi aplicada com sucesso na área de óleo e gás (*e.g.* Hauger, Van Veen, 1995; Turner, Bryant, 1995; Hailwood *et al.*, 2010), facilitando a interpretação dos processos sedimentares que levaram à formação das sequências sedimentares estudadas e complementando as informações obtidas pela bioestratigrafia.

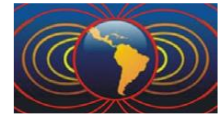
Materiais e Métodos

Foram coletados 59 cilindros de amostras de arenitos e lamitos pertencentes à Formação Moreno, constituindo a seção denominada Bob Cat Canon. As amostras foram cortadas em 198 espécimes padrões. Optou-se por analisar um exemplar de cada cilindro, além de 11 amostras representativas de camadas mais espessas, no Laboratório de Paleomagnetismo e Magnetismo de Rochas da Universidade de São Paulo (USPMag). A mineralogia magnética foi avaliada com o magnetômetro de amostra vibrante MicroMag 3900 (VSM, *Princeton Measurements Corp*), onde foram obtidas curvas de histerese e curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI) para caracterizar os minerais portadores de magnetização nas amostras. Com o processamento dos dados foi possível gerar a representação gráfica das curvas e a categorização das amostras em diferentes domínios, através de um diagrama de Day.

Resultados Preliminares

As curvas de histerese magnética exibem, em sua maioria, valores de coercividade (H_c) entre 25,4 e 5,78 mT. A coercividade determinada através deste método permite indicar o caráter do material, mas não é capaz de restringir a mineralogia das amostras, visto que os minerais magnéticos apresentam uma ampla faixa de coercividade. Todas as curvas foram corrigidas por sua massa e com a correção paramagnética. A maior parte dos loops de histerese apresentam cintura fina, pouco reversiva, como a da amostra de arenito BCC040L (Fig.1a), destacando baixos valores de H_c geral dos portadores magnéticos nesses litotipos, que possivelmente estejam associados à presença de magnetitas multidomínio (MD) ou pseudo-domínio simples (PSD). A histerese da amostra BCC028A (Fig.1b), de um lamito, apresenta um padrão do tipo “cintura de vespa”, podendo indicar a presença de mistura de minerais magnéticos contrastantes (Roberts *et al.*, 1995), que pode ser devido a diferentes minerais ou pelo mesmo mineral com diferentes estruturas de domínio. O lamito da amostra BCC031A (Fig.1c) apresenta comportamento distinto, com características de cintura mais larga, podendo se tratar de um mineral de maior coercividade.

As curvas de IRM das amostras analisadas frequentemente revelaram um rápido aumento em campos inferiores a 0,1 T (Fig.1d), sugerindo a presença de minerais de baixa coercividade, como o caso da amostra BCC040L. Dunlop e Ozdemir (1997) confirmaram a notável linearidade entre a magnetização de saturação e a coercividade, observando que é raro encontrar uma assembleia de magnetitas MD com valores de H_c acima de 10 mT. No entanto, também há casos, como da amostra BCC031A cuja saturação não ocorre em campos de até 1 T, o que, juntamente com seu elevado H_c , sugere a possível presença de hematita nas amostras.



Razões obtidas a partir dos parâmetros de histerese foram usadas para construir o diagrama de Day (Day *et al.*, 1977), seguindo os limites por ele definidos (Fig. 2). Por meio desse diagrama, foi possível caracterizar os minerais magnéticos quanto à sua estrutura de domínio, que pode ser domínio simples (SD), pseudo-domínio simples (PSD) e multi-domínio (MD). Grãos de magnetização estável (SD) são extremamente pequenos e demandam considerável energia para alterar sua orientação magnética. Os grãos com comportamento de transição (PSD), predominantes nas amostras analisadas neste estudo, encontram-se entre os grãos pequenos SD e os grãos maiores MD, que possuem um número reduzido de domínios magnéticos, mas podem apresentar um momento magnético significativo. Os grãos de maior tamanho (MD) contêm dois ou mais domínios magnéticos e se subdividem internamente em domínios para minimizar a energia magnetoestática.

Conclusões

Nesta fase inicial da pesquisa foram avaliados quais os minerais que adquiriram magnetização nas rochas sedimentares da Formação Moreno, sendo elas possivelmente magnetita e hematita predominantemente em estado PSD. Outros métodos paleomagnéticos, como a ASM e os dados de desmagnetização AF serão analisados futuramente, podendo fornecer mais informações sobre a magnetização adquirida, como o paleofluxo das unidades estudadas. Além disso, a magnetoestratigrafia da seção deve ser obtida para obter um modelo de idade preciso, baseado nas reversões do campo paleomagnético.

Agradecimentos

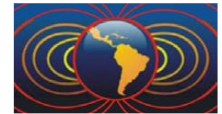
Este trabalho é desenvolvido com o apoio da Agência Nacional de Petróleo (ANP), através do Programa de Geologia do Petróleo da UFRGS (PRH 14.1), do Grupo de Pesquisa de Injeção de Areia (SIRG) da Universidade de Aberdeen e do Laboratório de Paleomagnetismo e Magnetismo de Rochas (USPMag) da Universidade de São Paulo (USP).

Figura 1. Exemplos representativos de curvas de histerese e IRM encontradas nas análises das amostras. a) Curva de histerese de cintura fina (amostra BCC040L). b) Curva de histerese de cintura de vespa (amostra BCC028A). c) Curva de histerese de cintura larga. d) Curva IRM correspondente à amostra BCC040L. e) Curva IRM correspondente à amostra BCC031A.

Figura 2. Diagrama de Day com todas as amostras analisadas.

Referências

- Atwater, T., 1970. Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America. *GSA Bulletin*, 81, 3513-3536.
- Atwater, T., Stock, J., 1998. Pacific-north america plate tectonics of the neogene southwestern united states: An update. *International Geology Review*, 40, 375-402.
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, 260-267.
- Dickinson, W.R., 1981. Plate tectonics and the continental margin of California. In: Ernst, W. G. (ed) The geotectonic development of California. *Englewood Cliffs, Prentice-Hall*, 1-28.



Dunlop, J., Özdemir, O., 1997. Rock Magnetism: Fundamentals and frontiers. Cambridge University Press., New York, 573 pp.

Graham, S.A., 1987. Tectonic controls on petroleum occurrence in central California. In: Ingersoll, R.V., Ernst, W.G. (eds.), Cenozoic Basin Development of Coastal California. Rubey, *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, 6, 47-63.

Hailwood, E., Montgomery, P., Szurlies, M., Karloukovski, V., Urvat, M., 2010. Magnetostratigraphy and source dispersal directions in the Late Triassic Mungaroo Formation, Gorgon Field, Offshore NW Australia. Determined by magnetic methods. *APPEA Journal 50th Anniversary Issue*, 37, 388 pp.

Hauger, E., Van Veen, P., 1995 Application of magnetostratigraphy to Brent Group reservoir zonation in the Visund Field. *Geological Society - Special Publications, Londres*, 98, 187-204.

Hurst, A., Cartwright, J. A., Huuse, M., and Duranti, D., 2006, Extrusive sandstones (extrudites): a new class of stratigraphic trap? in Allen, M. R., Goffey, G. P., Morgan, R. K., and Walker, I. M., editors, The Deliberate Search for the Stratigraphic Trap: *Geological Society of London, Special Publications*, 254, 289-300.

Hurst, A., Huuse, M., Duranti, D., Vigorito, M., Jameson, E., and Schwab, A., 2016, Application of outcrop analogues in successful exploration of a sand injection complex, Volund Field, Norwegian North Sea, in Bowman, M., Smyth, H. R., Good, T. R., Passey, S. R., Hirst, J. P. P., and Jordan, C. J., editors, The value of outcrop studies in reducing subsurface uncertainty and risk in hydrocarbon exploration and production: *Geological Society, London, Special Publications*, 436, 75-92.

Hurst, A., Morton, A., Scott, A., Vigorito, M., and Frei, D., 2017, Heavy-mineral assemblages in sandstone intrusions: Panoche Giant Injection Complex, California, U.S.A: *Journal of Sedimentary Research*, 87, 4, 388-405.

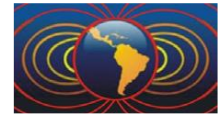
Hurst, A., Cartwright, J., 2007. Relevance of Sand Injectites to Hydrocarbon Exploration and Production. In: Hurst, A. & Cartwright, J. (eds) Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production. *AAPG Memoir*, 87, 1-19.

Huuse, M., Mickelson, M., 2004. Eocene sandstone intrusions in the Tampen Spur area (Norwegian North Sea Quad 34) imaged by 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 21, 141-155.

Huuse, M., Cartwright, J., Hurst, A., Steinland, N., 2007. Seismic characterization of large-scale sandstone intrusions. In: Hurst, A. & Cartwright, J. (Eds.), Sand Injectites: Implications for Hydrocarbon Exploration and Production, *AAPG Memoir*, 87, 21-35.

Ingersoll R.V., 2008. Subduction-Related Sedimentary Basins of the USA Cordillera. *Sedimentary Basins of the World*, 5, 395-428.

Ingersoll, R.V., 1982. Initiation and evolution of the Great Valley forearc basin of northern and central California. In: LEGGETT, J. K. (ed), Trench-forearc geology: sedimentation and tectonics on modern and ancient active plate margins. *Geological Society of London - Special Publications*, 10, 459-467.



McGuire, D.J., 1988. Stratigraphy, depositional history, and hydrocarbon source-rock potential of the Upper Cretaceous–Lower Tertiary Moreno Formation, Central San Joaquin basin, California. Tese de doutorado, Universidade de Stanford, Califórnia – EUA.

Payne, M.B., 1951. Type Moreno Formation and overlying Eocene strata on the west side of the San Joaquin Valley, Fresno and Merced Counties. São Francisco: California Division of Mines, Geological Special Report, 9.

Roberts, A. P., 1995. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe₃S₄). *Earth and Planetary Science Letters*, 134, 3, 227-236.

Turner, G.M., Bryant, I.D., 1995. Application of a palaeomagnetic reversal stratigraphy to constrain well correlation and sequence stratigraphic interpretation of the Eocene C1 Sands, Maui Field, New Zealand. *Geological Society - Special Publications, Londres*, 98, 205-221.

Vigorito, M., Hurst, A., 2010, Regional sand injectite architecture as a record of pore-pressure evolution and sand redistribution in the shallow crust: insights from the Panoche Giant Injection Complex, California: *Journal of the Geological Society*, 167, 889-904.

Vigorito, M., Hurst, A., Cartwright, J., Scott, A., 2008, Regional-scale subsurface crustal sediment remobilization: geometry and architecture: *Journal of the Geological Societ*, 165, 3, 609-612.

Vigorito, M., Hurst, A., Scott, A.J.S., Stanzione, O., Grippa, A., 2022. A Giant San Injection Complex: Processes and Implications for Basin Evolution and Subsurface fluid flow. *American Journal of Science*, 322, 6, 729-794.