

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Características arquiteturais e petrofísicas de arenitos eólicos e suas implicações na qualidade de reservatórios de hidrocarbonetos (Formação Piramboia, Bacia do Paraná, SE Brasil)

AUTORES:

Davi Machado Querubim¹, Áquila Ferreira Mesquita², Giorgio Basilici³

INSTITUIÇÃO:

¹Instituto de Geociências - Universidade Estadual de Campinas (IG-Unicamp)

CARACTERÍSTICAS ARQUITETURAIS E PETROFÍSICAS DE ARENITOS EÓLICOS E SUAS IMPLICAÇÕES NA QUALIDADE DE RESERVATÓRIOS DE HIDROCARBONETOS (FORMAÇÃO PIRAMBOIA, BACIA DO PARANÁ, SE BRASIL)

Resumo

As características petrofísicas de arenitos eólicos geralmente são reconhecidas pelos altos valores de permo-porosidade, as quais contribuem para a geração de excelentes reservatórios de hidrocarbonetos (HC). Entretanto, a complexidade arquitetural e o padrão de distribuição de superfícies limitantes em sucessões eólicas, por exemplo, podem atuar como barreiras de fluxo na rocha. A fim de compreender a relação entre a arquitetura deposicional e qualidade de reservatórios, o presente trabalho estudou arenitos eólicos impregnados com hidrocarboneto da Formação Piramboia. Foi identificado um único elemento arquitetural: sets simples de estratificações cruzadas, interpretados como depósitos de dunas transversais simples. A geometria da arquitetura deposicional e a distribuição de fácies possivelmente atuaram como fatores de controle na distribuição de armazenamento de fluídos de HC na rocha. A concentração de óleo presente nos sets simples é controlada a partir do padrão de distribuição dos estratos de grain-flow, ripples de vento e grain-fall entre os foresets de estratificações cruzadas. Áreas de alta saturação de HC são geralmente caracterizadas pela dominância de depósitos de grain-flow, provavelmente originados em estágios de maiores taxas migração da duna. Em sessões delgadas, esses depósitos apresentam grãos de quartzo média a bem selecionados e, em geral, frouxamente embalados. Essa característica garante a geração de maior espaço poroso. Por outro lado, o menor grau de seleção de grãos dos estratos de ripples de vento e grain-fall garantem um maior empacotamento dos grãos durante a diagênese e, conseqüentemente, a redução do espaço poroso. Nos afloramentos estudados, áreas com predominância dessas características representam zonas de menor saturação de óleo. Além disso, a separação de conjuntos de foresets, de maior e menor concentração de óleo, por superfícies de reativação indicam a instauração de uma importante barreira de fluxo dessas superfícies, provavelmente devido a maior taxa de deposição de cunhas de ripples de vento durante a atividade da duna. Portanto, fatores como o estilo morfodinâmico das dunas e as taxas de acumulação estão diretamente correlacionadas à disposição de superfícies limitantes e aos elementos arquiteturais, os quais podem imprimir importantes zonas de fluxo de fluído. Considerando que em muitas sucessões eólicas a distribuição primária das litofácies tendem a correr de maneira previsível, as observações de pequena escala podem ser utilizadas para caracterização de reservatórios dessa natureza.

Palavras-chave: arenitos eólicos, reservatórios, hidrocarbonetos.

Abstract

The petrophysical characteristics of aeolian sandstone usually are characterised by the high values of perm-porosity, which contributes to generate excellent deposits of hydrocarbons (HC). However, the architecture complexity and the distribution of bounding surfaces in aeolian successions may produce important flow barriers in the rock. To comprehend the relationship between the depositional architecture and the reservoir quality, this paper studied aeolian sandstones impregnated with hydrocarbons of the Piramboia Formation. One architectural element was identified: simple sets of

cross-strata, interpreted as deposits of transversal simple dunes. The geometry and the facies distribution of deposits suggest a set of controlling factors on the distribution of the HC fluids storage in the rock. The oil concentration present in the simple sets is probably controlled by the dispensation of grain-flow, wind ripples and grain-fall strata. Areas of high HC saturation are usually characterised by the dominance of grain-flow deposits, which was originated by simple dunes with high migration rates. In thin sections, these deposits present well-sorted and poorly packed grains. These characteristics ensure the generation of a larger porous space. However, the grain packing and fabric characteristics of wind ripples and grain-fall deposits likely resulted in pore space reduction. In the outcrops studied, these types of deposits have a smaller amount of oil saturation in the rock. Furthermore, foresets with different oil concentrations may be defined by the distribution of the reactivation surfaces, indicating possible flow barriers. This feature is probably linked to the higher rates of deposition of wind ripples in stages of lower sand transport by migrating dunes. Thus, the morphodynamics style and accumulation rates of aeolian dunes are directly correlated to the disposition of bounding surfaces and the architectural elements, which can produce important HC fluid flow zones. Considering that a lot of aeolian successions have a predictable distribution of primary lithofacies, small-scale observations can be used to characterize deposits of that nature on a large-scale.

Keywords: aeolian sandstone, reservoir, hydrocarbons.

Introdução

Arenitos eólicos apresentem características petrográficas bem definidas e relativamente homogêneas, tais como regularidade granulométrica, altas taxas de seleção, alta esfericidade e arredondamento dos grãos (BESLY et al., 2018). No geral, essas características são responsáveis por gerar altos valores de permo-porosidade nesses depósitos e, conseqüentemente, gerar excelentes reservatórios de hidrocarbonetos (HC). Apesar de formarem notáveis reservatórios para a extração de hidrocarbonetos e para a captura e armazenamento de carbono, a alta complexidade arquitetural de sucessões dessa natureza podem influenciar no padrão de acumulação de óleo e na formação de barreiras de fluxo no reservatório (ROMAIN & MOUNTNEY, 2014; GROSS et al., 2022). A geometria dos depósitos e a das superfícies limitantes são os principais elementos na arquitetura deposicional, os quais podem influenciar na complexidade de sucessões eólicas (MOUNTNEY, 2006). Alguns fatores de controle durante a deposição podem interferir na distribuição e organização estratigráfica desses elementos, impactando na qualidade do reservatório, por exemplo: (i) morfodinâmica das formas de leito original; (ii) disponibilidade de água e a variação do nível do lençol freático e; (iii) taxas de sedimentação e transporte de areia (MOUNTNEY, 2006; GROSS et al., 2022). Em geral, a combinação destes fatores determina as heterogeneidades em arenitos eólicos e o comportamento do fluido na rocha. Portanto, a fim de entender os processos deposicionais eólicos e sua relação com a disposição de superfícies limitantes, bem como sua implicação na heterogeneidade de reservatórios, o presente trabalho apresenta resultados preliminares acerca de sua influência na migração de fluidos em uma sucessão eólica impregnada em hidrocarbonetos. A Formação Piramboia é uma unidade da Bacia do

Paraná que representa o principal reservatório do sistema petrolífero Irati-Pirambaia/ Rio Bonito e que pode ser utilizado como modelo análogo para o estudo de reservatórios em outras bacias produtoras.

Metodologia

A área de estudo está contida nas adjacências do município de Anhembi, interior do Estado de São Paulo. Geologicamente, está inserida na região centro-oriental da Bacia do Paraná, bacia intracratônica composta por sucessões sedimentares datadas do Triássico e Cretáceo, bem como derrames basálticos do Grupo Serra Geral (SCHNEIDER et al., 1974). Mais especificamente, a área está compreendida pelos arenitos eólicos da Formação Pirambaia, os quais se apresentam impregnados em betume (THOMAZ FILHO, 1982). A aquisição de dados utilizados nesse estudo são baseados nos métodos clássicos de análise de fácies e classificação de superfícies limitantes em sucessões eólicas descrito por BROOKFIELD (1977) e MOUNTNEY (2006). Esse método é resumido por MESQUITA et al. (2021). A descrição de seções delgadas também foi utilizada nessa pesquisa.

Resultados e Discussão

Foi identificado um único elemento arquitetural no afloramento estudado nomeado de: sets simples de estratos cruzados. Essa unidade foi originada pela deposição de dunas eólicas simples e a descrição e interpretação do depósito é feita a seguir:

a) Características arquiteturais

Descrição: Esses depósitos são compostos por sets simples de estratos cruzados com espessuras que variam entre 0,6 e 2,5 metros (Figura 1). Os *foresets* de estratificações cruzadas possuem direção média de mergulho para 130° azimuth. É possível observar que os *foresets* são formados por intercalações sucessivas entre de cunhas de *gran-flow*, *grain-fall* e *wind-ripple laminations*, que podem ser diferenciados em função das espessuras e tamanho dos grãos que os compõem. As cunhas de *grainflow* apresentam espessura entre 20 e 50 milímetros, formadas por camadas finas de areia média que se estendem em até 0,4 metros ao longo dos *foresets*. Esses depósitos são os mais ocorrentes no afloramento estudado. Já as cunhas de *wind-ripple laminations* apresentam espessura entre 4 e 15 milímetros, formadas por areia fina, silte e argila que se estendem em até 70 milímetros ao longo dos *foresets*. Por sua vez, as cunhas de *grain-fall* são formadas pelo emplilhamento de grão de areia fina a muito fina, dificilmente diferenciadas no afloramento estudado. Os sets são limitados por duas ordens de superfícies limitantes. A primeira apresenta superfícies sub-horizontais e baixo ângulo (<10°), geralmente tabulares ou suavemente onduladas, as quais limitam a base e o topo dos sets individuais (Figura 1C). Essas superfícies são reconhecidas como as superfícies limitantes de primeira ordem

(*sensu* BROOKFIELD, 1977). O segundo tipo de superfície observada são superfícies concavas e inclinadas entre 20° e 18°, delimitando conjuntos de *foresets* com direções de mergulho oblíquas entre si (~8°). Superfícies dessa natureza são intersectadas, no topo e na base, pelas superfícies de primeira ordem e foram hierarquizadas como superfícies de terceira ordem de BOOKFIELD (1977) (Figura 1C). Os depósitos são caracterizados por zonas de média a alta saturação de hidrocarbonetos, como é possível identificar visualmente no afloramento da figura 1A. Os arenitos de média impregnação apresentam um odor característico de betume e coincidem com zonas com predominância de depósitos de *grain-flow*.

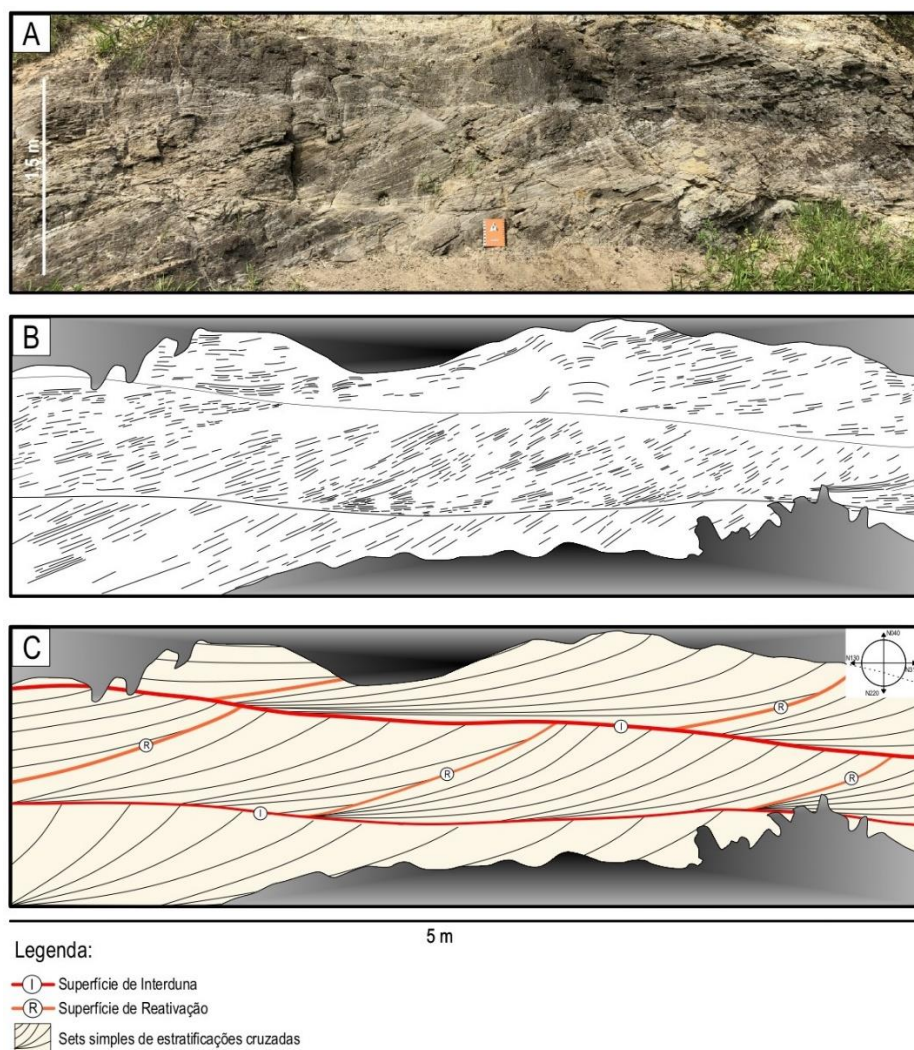


Figura 1: A) Fotomosaico. B) Sketch. C) Interpretação da arquitetura deposicional de sucessão eólica presente na região do município de Anhembi (SP), contendo sets simples de estratificações cruzadas.

Interpretação: As características litológicas e a presença de sets simples de estratificações cruzadas indicam sedimentos depositados pela migração de dunas em um sistema eólico seco (KOCUREK, 1981; MOUNTNEY, 2006). Já o padrão unidirecional presente no arranjo de

estratificações cruzadas sugere um paleoambiente composto por dunas transversais (MOUNTNEY, 2006), com alturas superiores à 10 m de acordo com a relação estabelecida entre as espessuras médias de cunhas de *grain-flow* e cunhas de *wind- ripple laminations* (ROMAIN & MOUNTNEY, 2014). A predominância de depósitos de *grain-flow* entre os *foresets* de estratificações cruzadas sugerem dunas com alta velocidade de migração e, conseqüentemente, alta competência de transporte pelo vento e disponibilidade de sedimentos (MOUNTNEY, 2006; MESQUITA et al., 2020). As superfícies de primeira ordem são interpretadas como superfícies de interdunas e a de terceira ordem como superfícies de reativação (KOCUREK, 1981).

b) Características petrofísicas

Os arenitos são compostos predominantemente por quartzo microcristalino (~90%), seguido de plagiocásio (~6%), microclínio (~3%) e minerais acessórios (muscovita e turmanila – 1%). Os depósitos de *grain-flow* são caracterizados por grãos bem selecionados, de baixo arredodamento e de media angulosidade. Em geral, não apresentam organização interna entre os grãos e são frouxamente empacotados (Figura 3A). Esses depósitos apresentam uma maior quantidade de espaços porosos e os grãos são majoritariamente envolvidos por uma capa de óleo (Figura 3A). Petrograficamente, as cunhas de *grain-flow* são formadas por ~40% de arcabouço, ~35% de matriz (HC) e ~25% de porosidade livre.

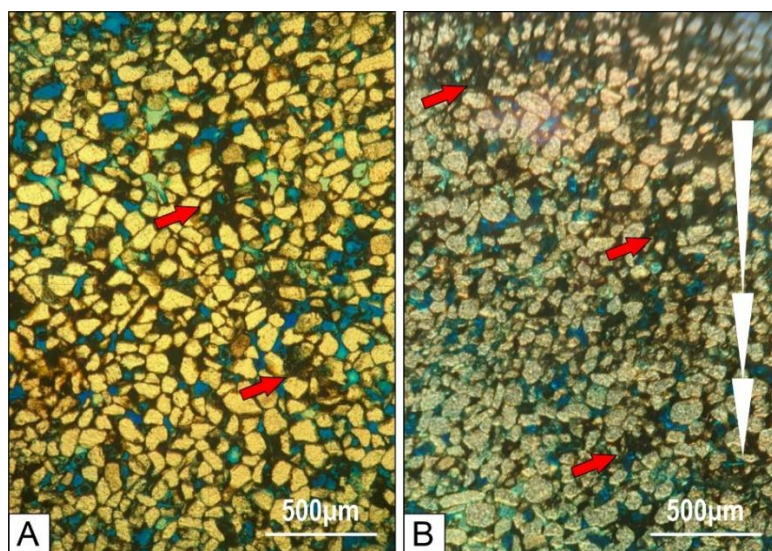


Figura 3: Fotomicrografias sob luz natural. Os espaços em azul representam poros não preenchidos por óleo. As setas vermelhas indicam concentrações de óleo na rocha A) Arenito de média saturação de HC representado por cunhas de *grain-flow*. B) Arenito de baixa saturação de HC por cunhas de *wind-ripple laminations*.

Por sua vez, as cunhas de *wind-ripple laminations* são formados por grãos de baixa seleção, apresnetenando uma gradação inversa ao topo e que são características de depósitos gerados pela

migração de ripples de vento (Figura 3B). Foi possível observar uma menor quantidade de espaços vazios e os grãos nem sempre são envolvidos por uma fina capa de HC (Figura 3B). A notória organização interna entre os sedimentos e seu alto empacotamento provavelmente interferiram na boa percolação e acumulação de fluídos de HC nesses depósitos. O arcabouço é representado por ~60% do total da rocha, seguido por ~20% de matriz (HC) e ~20 de espaço poroso.

c) discussões

As análises arquiteturais e petrográficas efetuadas no elemento arquitetural, permitiram inferir que os controles atuantes no armazenamento de fluídos do reservatório estão relacionados com a geometria da arquitetura deposicional, bem como com a distribuição de fácies de *grain-flow*, *grain-fall* e *wind-ripple laminations*. A formação desses depósitos em sistema de dunas simples está diretamente vinculada ao estilo morfodinâmico da duna. Ou seja, em ambientes com altas taxas de transporte e sedimentação, como em sistemas eólicos secos, as cunhas de *grain-flow* são potencialmente geradas. O empacotamento frouxo nessa sessão resultou em maior espaço poroso e, portanto, se apresentou mais favorável à concentração de fluídos. Logo, os depósitos gerados podem apresentar uma melhor qualidade em termos de reservatórios de hidrocarbonetos (ROMAIN & MOUNTNEY, 2014). Em condições de baixa disponibilidade de sedimentos e baixas taxas de transporte das dunas, cunhas de *wind-ripple laminations* são melhor distribuídas nos depósitos gerados, o que pode afetar a permeabilidade da rocha e implicar na qualidade do reservatório (ROMAIN & MOUNTNEY, 2014; BESLY et al., 2018). O menor grau de seleção dos grãos condicionou o maior grau de empacotamento durante a diagênese, resultando em menor espaço poroso, sendo assim, se apresentam como barreira migratória para o fluxo de fluído. Além disso, é possível inferir que as superfícies limitantes de terceira ordem também representam importantes barreiras de fluxo, visto que são elas que separam *foresets* de maior e menor concentração de óleo. Isso se deve, possivelmente, a maior taxa de deposição de cunhas de *wind-ripple laminations* durante a atividade da duna na geração desse tipo de superfície.

Conclusões

De acordo com as análises faciológicas e petrográficas efetuadas neste trabalho, é possível concluir que os controles atuantes no armazenamento de hidrocarbonetos em arenitos eólicos estão relacionados com a distribuição de fácies e com a arquitetura deposicional. Sendo assim, depósitos com espessas fácies de *grain-flow* apresentam alta qualidade em termos de reservatórios de hidrocarbonetos. Por outro lado, fácies de *grain-fall* e *wind-ripple laminations* apresentam baixa qualidade e, portanto, podem se comportar como barreiras de fluxo. Além disso, superfícies limitantes de terceira ordem também pode representar importantes barreiras de fluxo em reservatórios dessa natureza.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela concessão de recursos para a elaboração deste trabalho através do Programa de Formação de Recursos Humanos em Exploração Petrolífera e Geologia de Reservatórios (PRH-ANP 19.1).

Referências Bibliográficas

BESLY, B.; ROMAIN, H. G.; MOUNTNEY, N. P. Reconstruction of linear dunes from ancient aeolian sucessions using subsurface data: Permian Auk Formation, Central North Sea, UK. *Marine and Petroleum Geology* 91, 1 – 18. 2018.

BROKFIELD, M. E. The origin of bounding surfaces in ancient eolian sandstones. *Sedimentology* 24, 303-332. 1977

GROSS, Evan C.; CARR, Mary; JOBE, Zane R. Three-dimensional bounding surface architecture and lateral facies heterogeneity of a wet aeolian system: Entrada Sandstone, Utah. *Sedimentology*. 2022

KOCUREK, G. Significance of interdune deposits and bounding surfaces in aeolian dune sands. *Sedimentology* 28, 753-780. 1981

MESQUITA, A. F.; BASILICI, G.; SOARES, M. V. T.; GARCIA, R. G. V. Morphology, accumulation and preservation of draa systems in a Precambrian erg (Galho do Miguel Formation, SE Brazil). *Sedimentary Geology* 412, 105807. 2021. MILANI, E. J. 2004.

MOUNTNEY, N.P. Eolian facies models. In: Posamentier, H.W., Walker, R.G. (Eds.), *Facies models revisited: Society for Sedimentary Geology Special Publication* 84, 19–83. 2006

ROMAIN, H.; MOUNTNEY, N. P. Reconstruction of three-dimensional eolian dune architecture from one-dimensional core data through adoption of analog data from outcrop. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 98, 1-22. 2014

SCHNEIDER R.L., MÜHLMANN H., TOMMASI E., MEDEIROS R.A., DAEMON R.F., NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1:41-65. 1974

THOMAZ FILHO, A. Ocorrência de arenito betuminoso em Anhembi (SP) – cubagem e condicionamento geológico. *Congresso Brasileiro Geologia*, 32. 1982