



Copyright 2005, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE HETEROGENEIDADES DIAGENÉTICAS E QUALIDADE EM RESERVATÓRIOS CLÁSTICOS

J. Marcelo Ketzer

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Geologia do Petróleo, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre-RS.
jm@ketzer.com.br

Resumo – O presente trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa inovadora que tem por objetivos a predição da distribuição de heterogeneidades diagenéticas e qualidade em reservatórios. Possui, portanto, relevância para a exploração e produção de reservatórios. Foram utilizados para a elaboração de modelos preditivos, estudo de casos de reservatórios e análogos das seguintes unidades: Formação Mullaghmore (Carbonífero Inferior, Irlanda), Membro Ferron Sandstone (Cretáceo Superior, Utah, E.U.A.), Formação Abu-Madi (Mioceno Superior, Delta do Nilo, Egito) e Formação Rio Bonito (Permiano, Brasil). Tais modelos foram elaborados principalmente para arenitos depositados em ambientes transicional e marinho-raso. Resultados da pesquisa indicam que alterações diagenéticas que controlam a qualidade de reservatórios podem ser previstas dentro de um arcabouço de Estratigrafia de Sequências, como por exemplo, ao longo de limites de seqüências e paraseqüências, e tratos de sistemas. Embora os princípios gerais aqui apresentados podem ser utilizados para o desenvolvimento de modelos preditivos para reservatórios de água profunda, novas pesquisas são necessárias para um melhor entendimento da formação de heterogeneidades diagenéticas e previsão de qualidade em reservatórios neste contexto.

Palavras-Chave: heterogeneidade de reservatório; Diagênese; Estratigrafia de Sequências; arenitos

Abstract – The present work presents the results of an innovative research line that aims to predict the distribution of quality and diagenetic heterogeneity in reservoirs. It is, therefore, important for exploration and production. The following study cases were used to elaborate predictive models for sandstone reservoirs deposited in coastal and shallow marine environments: the Mullaghmore Formation (Lower Carboniferous, Ireland), the Ferron Sandstone Member (Upper Cretaceous, Utah, U.S.A.) the Abu-Madi Formation (Upper Miocene, Nile Delta Basin, Egypt), and the Rio Bonito Formation (Permian, Brazil). Results of the research indicate that diagenesis-controlled reservoir quality and heterogeneities might be predicted in a sequence stratigraphic framework, such as along sequence and parasequence boundaries, and systems tracts. Although the principles presented here can be extrapolated to deep water reservoirs, additional research is needed for a more detailed and comprehensive understanding of the formation of diagenetic heterogeneity and reservoirs quality evolution in such context.

Keywords: reservoir heterogeneity, diagenesis, sequence stratigraphy; sandstones

1. Introdução

Modelos preditivos de distribuição de heterogeneidades e qualidade em reservatórios são de fundamental importância para exploração e otimização da produção de campos de petróleo. Atualmente, a grande maioria destes modelos são baseados em estudos estratigráficos e de arquitetura de fácies, que não levam em consideração importantes alterações na qualidade de reservatório que podem ocorrer após a acumulação dos sedimentos. Uma nova metodologia que integra princípios da Estratigrafia de Sequências e da Diagênese permite uma predição da re-distribuição espacial dos processos de geração e destruição de porosidade e permeabilidade, tais como dissolução e cimentação e, portanto, do desenvolvimento de heterogeneidades em reservatórios durante o soterramento. A cimentação controlada pela estratigrafia pode promover a formação de barreiras de fluxo e compartimentalização de reservatórios ao longo de

superfícies estratigráficas chaves, como limites de seqüência e paraseqüência, superfície transgressiva e de inundação máxima (Taylor et al., 1995, 2000, Morad et al., 2000, Ketzer et al. 2002, 2003a).

A integração entre Estratigrafia de Seq ncias e da Diagênese está baseada no princípio de que informações sobre a geoquímica dos fluídos intersticiais, a composição detrítica dos reservatórios, o tempo de residência dos sedimentos sob condições geoquímicas específicas, grau de bioturbação, e a presença de matéria orgânica, entre outras, podem ser extraídas da análise estratigráfica e utilizadas para a predição dos processos diagenéticos (Ketzer, 2002). A integração da Estratigrafia de Seq ncias e Diagênese, que vem sendo utilizada com sucesso em seq ncias carbonáticas, está sendo agora aplicada de forma inovadora em seq ncias clásticas de diversas bacias do mundo. Os resultados alcançados demonstram o enorme potencial dessa metodologia integrada na redução de riscos exploratórios e otimização da produção. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação desta ferramenta pelo autor em seq ncias clásticas que são reservatórios ou análogos, como a Formação Mullaghmore (Carbonífero, Irlanda), Membro Ferron Sandstone (Cretáceo Superior, Utah, E.U.A.), Formação Abu-Madi (Mioceno Superior, Delta do Nilo, Egito) e Formação Rio Bonito (Permiano, Brasil).

2. Qualidade de Reservatório e Distribuição de Heterogeneidades Diagenéticas em um Contexto Estratigráfico

2.1. Limites de Seq ncia

Durante períodos de rebaixamento relativo do nível do mar e formação de limites de seq ncia, uma significativa por  o da plataforma é exposta e, sob condições de clima úmido, os poros dos sedimentos anteriormente saturados com água do mar, são invadidos por água meteórica. A percolação de água meteórica nestes sedimentos causa tipicamente a dissolução de feldspatos e micas (eventualmente grãos carbonáticos), produzindo porosidade intragranular e caulinita, abaixo do limite de seq ncia (Ketzer et al., 2003b). Além destes constituintes, cimentos carbonáticos de origem marinha são parcial ou totalmente dissolvidos gerando porosidade intergranular. Esta zona de alteração meteórica abaixo dos limites de seq ncia constitui principalmente uma zona de aumento de porosidade (secundária). Para que ocorra igualmente um aumento na permeabilidade nesta zona, no entanto,   necessário que os poros secundários aumentem de forma significativa a conectividade da rede porosa. A espessura da zona de alteração meteórica abaixo do limite de seq ncia será maior, quanto maior for a permeabilidade dos depósitos e o tempo de exposição subárea.

Sob condições de clima semi- rido, a infiltração de água meteórica nos depósitos da plataforma exposta   limitada, fazendo com que a principal alteração diagenética encontrada seja a infiltração mecânica de argilas (Moraes e De Ros, 1990; Ketzer et al., 2003b). Tal alteração tipicamente reduz a porosidade e a permeabilidade dos depósitos sob o limite de seq ncia, os quais podem, durante a diagênese, constituir uma heterogeneidade e potencial barreira de fluxo de fluídos (Jiao e Surdam, 1997).

2.2. Limites de Parase ncia

Os limites de parase ncia e demais superfícies de inundação marinha podem formar importantes heterogeneidades em reservatórios associados a depósitos de ambiente marinho raso. Os limites de parase ncia marcados por depósitos de *shoreface* sobre *backshore* podem conter *lags* transgressivos formados pelo retrabalhamento pelas ondas do substrato, durante a inundação. Estes *lags* possuem volume significativo de intraclastos lamosos provenientes da erosão do substrato lagunar (*backshore*). Tais intraclastos lamosos são transformados em pseudomatrix durante a compactação mecânica das rochas, formando níveis de baixa porosidade e permeabilidade ao longo dos limites de parase ncia, a exemplo do que ocorre no Membro Ferron Sandstone (Ketzer, 2002). Em porções mais distais, os *lags* transgressivos associados a limites de parase ncias são comumente ricos em bioclastos carbonáticos. A presença de bioclastos carbonáticos nestes *lags* facilita a nucleação de cimento carbonático (calcita, dolomita e/ou siderita), formando níveis cimentados ao longo dos limites de parase ncia. A ciment  o carbonática ao longo destes níveis é comumente pervasiva, a exemplo do verificado nas formações Mullaghmore (Ketzer et al., 2002) e Rio Bonito (Ketzer et al., 2003a). Desta forma, os limites de parase ncia que possuem *lags* transgressivos associados constituem importante heterogeneidade diagenética, com alto potencial para compartimentalização de reservatórios de duas parase ncias adjacentes.

Além do desenvolvimento de heterogeneidades diagenéticas relacionadas com *lags* transgressivos, arenitos associados aos limites de parase ncia marcados por depósitos de *shoreface* sobre carvão, possuem grande potencial para ciment  o tipo *stratabound* de calcita (até 3 m de espessura) e concreções de pirita (Ketzer et al., 2003a). Tal ciment  o está relacionada com a diagênese da matéria orgânica dos depósitos de carvão subjacente ao limite de parase ncia, e pode ser reconhecida em perfis elétricos de resistividade (Ketzer et al., 2003a). Este tipo de ciment  o não ocorre nas extensões mais proximais, onde os limites de parase ncias são marcados por depósitos continentais sobre carvão.

2.3. Tratos de Sistemas de Mar Baixo, Transgressivo e Mar Alto

Diferentes tipos de alterações diagenéticas são potencialmente encontradas em tratos de sistemas específicos. Arenitos do Trato de Sistemas de Mar Baixo (TSMB), por exemplo, depositados sob condições de clima úmido,

comumente contém uma quantidade significativa de porosidade secundária e caulinita, devido a uma maior interação com fluidos meteóricos. Esta interação é favorecida durante o nível de mar baixo pela presença de uma ampla área da plataforma exposta, a qual aumenta a área para influxo meteórico. Durante este período, não apenas os depósitos de plataforma estão sujeitos a diagênese meteórica, como por exemplo, os depósitos fluviais de vales incisos da Formação Abu-Madi, no Egito (Salem et al., *in press*), mas também depósitos turbidíticos, como os da Bacia de Campos (Carvalho et al., 1995). Os depósitos fluviais de vales incisos, em particular, possuem potencialmente intraclastos lamosos, notadamente na base dos vales e na base de cada canal fluvial (Ketzer et al., 2003b). Estes intraclastos são transformados em pseudomatrix durante a compactação mecânica, formando heterogeneidades que podem comprometer a comunicação hidráulica entre os corpos arenosos que preenchem o vale inciso, e entre estes e arenitos situados logo abaixo do vale inciso. A formação de pseudomatrix é potencialmente mais comum nos depósitos turbidíticos tipo *channel-levee* (Carvalho et al., 1995), associados ao final do TSMB, do que em turbiditos que formam leques de assoalho de bacia, associados ao TSMB inicial.

Os arenitos de *shoreface* do trato de sistemas transgressivo (TST), por sua vez, possuem maior potencial para o desenvolvimento de extensa cimentação carbonática, devido a maior probabilidade de conterem bioclastos carbonáticos em seu arcabouço, a exemplo da Formação Mullaghmore (Ketzer et al., 2002). A maior concentração deste nos arenitos do TST ocorre devido redução de aporte clástico para a bacia durante o TST, e maior retrabalhamento dos sedimentos na plataforma e conseqüente incorporação dos bioclastos no arcabouço dos depósitos, com formação de depósitos costeiros dominados pela ação de ondas. Os depósitos marinho-rasos do trato de sistemas de mar alto (TSMA), por sua vez, tendem a serem caracterizados por deltas dominados por rios, como conseqüência da retomada da diminuição da taxa de elevação relativa do nível do mar (Emery e Myers, 1996). Sob condições favoráveis (cf. Odin e Matter, 1981; Hornibrook e Longstaffe, 1996) estes depósitos deltácos potencialmente formarão cutículas de bertierina ao redor dos grãos, as quais serão transformadas em franjas de clorita durante a diagênese avançada. A presença destas franjas de clorita inibe a cimentação de quartzo, preservando a porosidade dos arenitos do TSMA em relação aos do TST, a exemplo do verificado na Formação Mullaghmore (Ketzer et al., 2002).

3. Conclusões

Estudos integrados entre Estratigrafia de Sequências e Diagênese constituem uma nova ferramenta com alto potencial para a previsão da distribuição de heterogeneidades diagenéticas em reservatórios e, portanto, são importantes para a exploração e produção de petróleo. Os resultados aqui apresentados indicam que zonas de baixa porosidade e permeabilidade devido a cimentação e formação de pseudomatrix, podem ocorrer em *lags* transgressivos e arenitos associados aos limites de sequência e parasequência. Arenitos subjacentes a limites de sequência podem, sob determinadas condições, conter zonas de com porosidade secundária. Com relação aos tratos de sistemas, os arenitos do TSNB possuem maior potencial para o desenvolvimento de porosidade secundária em relação aos dos demais tratos. Os arenitos depositados em ambiente marinho-raso do TST, por sua vez, possuem maior chance para a formação de cimentação carbonática. O desenvolvimento potencial de cutículas de bertierina, as quais evoluem para franjas de clorita durante a diagênese avançada nos arenitos do TSMA auxiliam na preservação da porosidade destes, pois inibem a formação de cimento de quartzo. Embora a integração entre Estratigrafia de Sequências e Diagênese aqui apresentada seja aplicada a reservatórios depositados em ambiente marinho-raso, é provável que tal metodologia possa ser adaptada para depósitos de água profunda.

4. Agradecimentos

J.M. Ketzer agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Agência Nacional do Petróleo (ANP).

5. Referências

- CARVALHO, M.V.F., DE ROS, L.F., GOMES, N.S. Carbonate cementation patterns and diagenetic reservoir facies in the Campos Basin Cretaceous turbidites, offshore eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 12, p. 741-758, 1995.
- EMERY, D., MYERS, K.J. *Sequence Stratigraphy*. London: Blackwell Science, 1996.
- HORNIBROOK, E.R.C., LONGSTAFFE, F.J. Berthierine from the Lower Cretaceous Clearwater Formation, Alberta, Canada. *Clays and Clay Minerals*, v. 44, p. 1-21, 1996.
- JIAO, Z.S., SURDAM, R.C. Clay diagenesis and sealing capacities of sequence boundaries in the Cretaceous section in Laramide basins. In: *American Association of Petroleum Geologists and Society for Sedimentary Geology Annual Meeting Abstracts* 6, p. 56, 1997.

- KETZER, J.M. Diagenesis and sequence stratigraphy: An integrated approach to constrain evolution of reservoir quality in sandstones. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*, v. 762, 30 p., 2002.
- KETZER, J.M., HOLZ, M., S. MORAD, AL-AASM, I. Sequence stratigraphic distribution of diagenetic alterations in coal-bearing, paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (Early Permian), southern Brazil. *Sedimentology*, v. 50, p. 855-877, 2003a.
- KETZER, J. M., S. MORAD, AMOROSI, A. Predictive diagenetic clay-mineral distribution in siliciclastic rocks within a sequence stratigraphic framework. In: *Clay Mineral Cementation in Sandstones*, ed.: WORDEN, R. & MORAD, S., Special Publication of the International Association of Sedimentologists, v. 34, p. 42-59, 2003b.
- KETZER, J. M., S. MORAD, EVANS, R., AL-AASM, I. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (carboniferous), NW Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, v. 72, p.760-774, 2002.
- MORAD, S., KETZER, J. M., DE ROS, L. F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, v. 47, Suppl.1, p.95-120, 2000.
- MORAES, M., DE ROS, L.F., Infiltrated clays in Jurassic fluvial sandstones of Recôncavo Basin, Northeastern Brazil. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 60, p. 809-819.
- ODIN, G.S., MATTER, A. De glauconiarum origine. *Sedimentology*, v. 28, p. 611-641, 1981.
- SALEM, A.M., KETZER, J.M., MORAD, S., RIZK, R.R., AL-AASM, I.S. Diagenesis and Reservoir-Quality Evolution of Incised-Valley Sandstones: Evidence from the Abu-Madi Gas Reservoirs (Upper Miocene), The Nile Delta Basin, Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, in press.
- TAYLOR, K.G., GAWTHORPE, R.L., CURTIS, C.D., MARSHALL, J.D., AWWILLER, D.N. Carbonate cementation in a sequence stratigraphic framework: Upper Cretaceous sandstones, Book Cliffs, Utah-Colorado. *Journal of Sedimentary Research*, v. 70, p. 360-372, 2000.
- TAYLOR, K.G., GAWTHORPE, R.L., VAN WAGONER, J.C. Stratigraphic control on laterally persistent cementation, Book Cliff, Utah. *Journal of Geological Society*, vol. 69, p. 225-228, 1995.