

Interrelação entre a fábrica sedimentar, o conteúdo orgânico e o potencial redox do ambiente deposicional, deduzida das litofácies de rampa distal das seqüências deposicionais da Formação Irati, Permiano da Bacia do Paraná

Interrelationship among sedimentary fabric, organic content and redox potential of the depositional environment, deduced from the distal ramp lithofacies of the depositional sequences of the Irati Formation, Permian of the Paraná Basin

Laury Medeiros de Araújo | René Rodrigues | Claiton Marlon dos Santos Scherer

(originais recebidos em 22.09.2004)

Palavras-chave: Bacia do Paraná | Formação Irati | litofácies | fábrica sedimentar | potencial redox

Keywords: Paraná Basin | Irati Formation | lithofacies | sedimentary fabric | redox potential

Entre o Eo e o Neopermiano ocorreu na Bacia do Paraná, em resposta a três ciclos de quarta ordem de variação relativa do nível do mar, a acomodação de três seqüências deposicionais (fig. 1) constituídas exclusivamente de tratos de sistemas transgressivos e de mar alto (Araújo, 2001).

O arcabouço estratigráfico das seqüências, arranjado segundo um padrão de empilhamento retrogradacional, progradacional e agradacional, caracteriza-se por associações de litofácies de rampa interna (rochas evaporíticas e mistas – alternando estratos carbonáticos e siliciclásticos e a mescla composicional de ambos os tipos de rocha), rampa intermediária (litofácies mistas) e rampa distal (litofácies siliciclásticas - folhelhos).

Esta breve comunicação se atém à discussão das litofácies de rampa distal com o objetivo de demonstrar que é possível, através da correlação

entre as características da fábrica sedimentar e o conteúdo orgânico das rochas, deduzir o nível redox do ambiente.

Nas associações de litofácies de rampa distal, descritas nas seqüências deposicionais Irati, as litofácies diferem entre si pelas características díspares da fábrica sedimentar. A litofácies folhelho normal sem estrutura sedimentar e a litofácies folhelho carbonoso, portadora de estrutura primária, sendo definida por laminações.

A ausência de estrutura primária da litofácies folhelho normal (homogênea ou bioturbada) correlaciona-se diretamente à baixa capacidade de preservação orgânica. O grau de preservação do ambiente se traduz pelo pobre conteúdo de carbono orgânico total (COT \ll 1%), pelo reduzido índice de hidrogênio (IH \ll 100 mg HC/g COT) e pelo predomínio de matéria orgânica alóctone, especialmente os fitoclastos.

A destruição da estrutura primária e a intensa degradação da matéria orgânica são elementos diagnósticos da inexistência de estratificação da massa d'água e também do elevado nível de oxigenação reinante na coluna d'água e no substrato deposicional. Deduz-

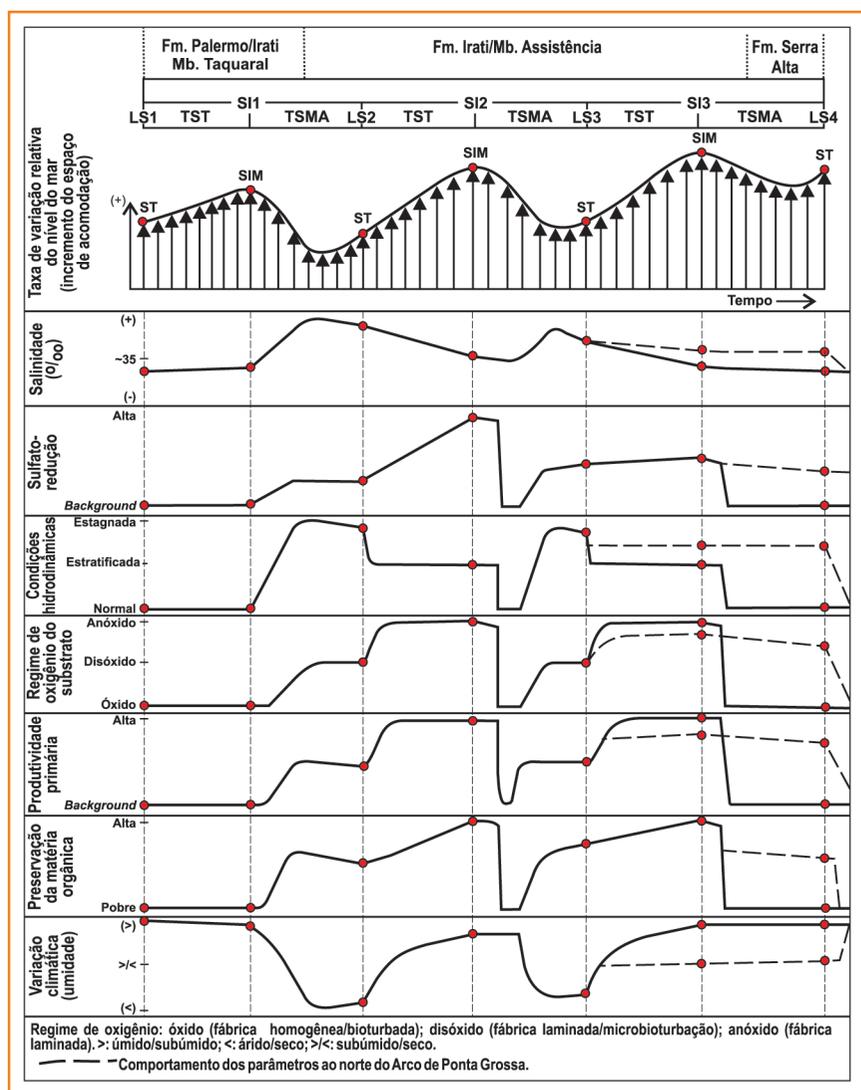


Figura 1
Diagrama esquemático ilustrando a variação dos principais parâmetros ambientais durante a deposição das seqüências Irati.

Figure 1
Schematic diagram showing the main environmental parameters variation during the deposition of Irati sequences.

se, com isso, que o ambiente caracterizava-se por alto potencial redox, com alto nível de oxigênio dissolvido na água (superior a 2 ml O₂/l água). A concentração do enxofre total da rocha (<< 1%) se mostra condizente às condições redox de fundo (fig. 1), haja vista que a conspícua destruição da fábrica sedimentar minimiza a fixação dos sulfetos produzidos no processo de sulfato-redução, devido ao escape de H₂S ao corpo aquoso (Tyson, 1995). As litofácies associadas a um regime redox aeróbico ocorrem nas seqüências Irati 1, anterior ao desenvolvimento da sedimentação mista carbonática-siliciclástica, durante a destruição temporária da estratificação da coluna d'água, na seqüência Irati 2 e ao término da sedimentação mista, na seqüência Irati 3 (fig. 1).

A preservação das estruturas primárias da litofácies folhelho carbonoso, caracteriza-se pelas estruturas laminada, planar e ondulada-lenticular e a ocorrência de esparsas microbioturbações. Estes atributos correlacionam-se diretamente à elevada capacidade de preservação orgânica.

As variações observadas nas litofácies com fábrica estruturada serviram de elementos interpretativos a deduções concernentes ao processo sedimentar, à energia do ambiente e ao potencial redox.

As fábricas finamente laminadas (< 0,5 mm) e as com lâminas espessas (> 0,5 mm) podem apresentar contato planar abrupto nas lâminas siltosas (fig. 2) e também contato irregular, interpretado como feição de microescavação (fig. 3, lâminas no topo da foto). Características como contato abrupto e as microescavações, nas lâminas argilosas, têm sido relacionadas a processo gerado por correntes carreadoras de silte (Stow e Bowen, 1980; Davis e Byers, 1993; Schieber, 1999; O'Brien *et al.* 1998), deslocando-se em baixa velocidade, porém suficientemente alta para gerar erosão no substrato argiloso e gradação à lâmina argilosa (fig. 3 – centro da foto). As lâminas argilosas carbonáceas resultariam, em parte, da precipitação produzida pelo arrefecimento do fluxo das correntes geradas por tempestade ou por turbidez (de baixa densidade) e também pela sedimentação "pelágica" das plumas de suspensão, cessado o evento de fluxo (Schieber, 1990; Walker e Plint, 1992; O'Brien *et al.* 1998).

Determinar se os pares alternados de argila/silte constituem produtos de tempestitos ou de turbiditos distais são hipóteses impossíveis de serem discerníveis, visto que as feições produzidas podem derivar de ambos os processos. Pode-se presumir, para o caso dos folhelhos carbonosos finamente laminados e com laminação espessa, da Formação Irati, que há maior probabilidade à associação com fluxos vinculados a eventos de tempestades. Esta inferência é respaldada pela presença de depósitos proximais com características de tempestitos, explicitadas por estratificações onduladas truncadas e cruzadas de baixo ângulo, observadas em afloramentos, em calcarenito e calcirruditos bioclásticos a peloidal, nos estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul.



Figura 2 - Litofácies folhelho carbonoso finamente laminado.

Figure 2 - Thinly laminated carbonaceous shale lithofacies.

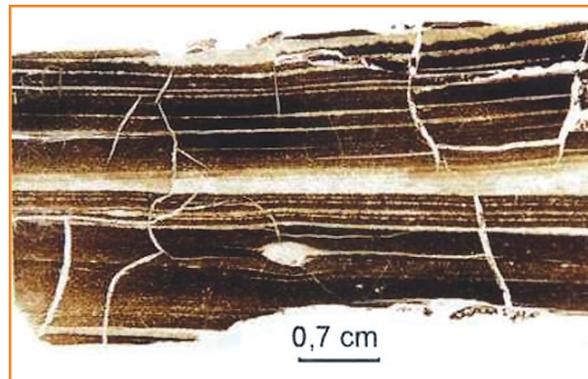


Figura 3 - Litofácies folhelho carbonoso com lâminas espessas.

Figure 3 - Thickly laminated carbonaceous shale lithofacies.

Apesar destas presumíveis evidências, não pode ser eliminada a hipótese de que parte dos pares com gradação sistemática de silte para argila possam ser produtos de correntes de turbidez de baixa densidade, desencadeadas por tempestades. Este padrão de repetição, observado, por exemplo, na figura 2, associa-se mais comumente à corrente de turbidez do que à de tempestade (Wignall, 1994). A quase completa ausência de bioturbação e as dimensões reduzidas dos esparsos traços-fósseis constituem elementos diagnósticos de que o oxigênio dissolvido nas águas dos poros do substrato deposicional tenha sido suprimido para níveis insignificantes, entre 0,1 e 0,3 ml O₂/l água (Wignall, 1994) ou inferior a concentrações de 0,5 ml O₂/l água, considerado inóspito a praticamente toda atividade microfaunal (Tyson e Pearson, 1991).

Com o decréscimo da concentração de oxigênio do fundo deposicional alcançando o regime de anoxia (O₂ ≅ zero), assume-se que o limite da zona anoxogênica tenha se ampliado à coluna d'água, com o desenvolvimento do processo de sulfato-redução acima da interface sedimento-água. A minimização do escape de H₂S reflete-se no enriquecimento notável do conteúdo de sulfato da rocha, ultrapassando valores superiores a 8% (fig. 1). O teor de carbono orgânico total de 6% na litofácies folhelho carbonoso finamente laminadas (fig. 2) e de 4% na litofácies folhelho com laminação espessa, ambas portadoras de matéria orgânica amorfa, condiz com o baixo

potencial redox do ambiente. Em termos de preservação da matéria orgânica, se tem observado que o conteúdo de carbono orgânico quando ocorre em níveis superiores a 4%, em geral, coincide com o indicativo de outros elementos diagnósticos ambientais (elementos-traço, fábrica sedimentar e enxofre) que sugerem a deposição em um regime redox anóxico (Tyson, 1995).

As litofácies folhelhos carbonosos também apresentam fábrica laminada espessa (> 0,5 mm), caracterizada por lâminas irregulares onduladas-lenticulares (fig. 4) de silte, com contatos basal e superior abruptos e também ausência de gradação interna. Presume-se que as lâminas irregulares onduladas-lenticulares de silte, pobres em matéria orgânica, tenham sido produzidas pelo retrabalhamento episódico das lentes siltosas por correntes fracas de fundo que, neste caso, promoveram também ligeira reoxigenação do substrato deposicional. A maioria dos autores tem relacionado sua gênese ao retrabalhamento episódico das lentes siltosas por correntes fracas de fundo (Schieber, 1991; Kuehl *et al.* 1991; Shanmugam *et al.* 1993).

O contato superior abrupto, ondulado e a ausência de gradação (fig. 4) são feições que não combinam com a deposição destas lentes sobre lâminas argilosas em ambiente de baixa energia (Schieber, 1991). O mecanismo advogado pelos autores pressupõe que corrente com capacidade para transporte de silte, com velocidade de algumas dezenas de centímetros por segundo, seria

capaz de migrar lentes siltosas, cavalgando sobre o substrato argiloso, produzindo espessamento, adelgaçamento laminar, e conseqüente ondulação, formação de lentes e microestratificação cruzada (fig. 4). Nesta litofácies, existe um aumento relativo de traços-fósseis com reduzida dimensão. Embora estas microbioturbações não perturbem expressivamente a estrutura da fábrica sedimentar, presume-se um sutil aumento do conteúdo de oxigênio dissolvido nas águas dos poros, provavelmente no limiar entre a passagem de um regime anóxico para disóxico ($> 0,5 \text{ ml O}_2/\text{l água}$).

Figura 4

Litofácies folhelho carbonoso com lâminas onduladas-lenticulares.

Figure 4

Wavy-lenticular laminated carbonaceous shale lithofacies.



As flutuações no nível de oxigenação, explicitadas pelas microbioturbações, coadunam-se melhor à hipótese dos que apregoam a existência de breves eventos de oxigenação causados por tempestades freqüentes, de menor intensidade (Sageman, 1989), ou dos que consideram ocorrer variações sazonais na estratificação (Tyson e Pearson, 1991; Tyson, 1996). Contrapõe-se ao pressuposto acima os que sugerem a instalação permanente e

generalizada da anoxia causada pela estratificação da água (Wignall, 1994). O conteúdo orgânico desta litofácies, da ordem de 3,5%, é coerente com o grau de preservação de regime redox disóxico próximo à passagem para um regime anóxico.

As litofácies folhelhos carbonosos também são caracterizadas pelas presenças de laminações cruzadas de baixo ângulo e ondulações truncadas (fig. 5), verificadas nos folhelhos com lâminas espessas siltosas (até 2 mm). Estas feições sugerem a atuação episódica de correntes de fluxos oscilatórios, corroboradas pela orientação bidirecional dos truncamentos (Aigner, 1985; Cheel e Leckie, 1993; Krassay, 1994). A redução do conteúdo orgânico nestas litofácies para teor de 1,6%, neste caso, reflete muito mais um aumento da energia do sistema (explicitado pelo domínio das lâminas siltosas) do que um aumento do potencial redox, visto que as microbioturbações se resumem a esparsas ocorrências.

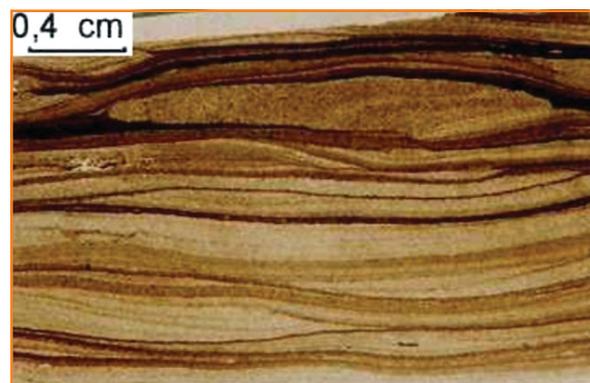


Figura 5 - Litofácies folhelho carbonoso com lâminas cruzadas e ondulações truncadas.

Figure 5 - Cross laminated carbonaceous shale lithofacies.

As litofácies associadas ao regime redox disaeróbico/anaeróbico ocorrem nas seqüências Irati 1, 2 e 3 (fig. 1), durante a implantação das fases de estagnação e estratificação ambiental, nos tratos de sistemas transgressivo e de mar alto.

agradecimentos

A Edison José Milani pela revisão e sugestões recomendadas.

referências bibliográficas

AIGNER, T. **Storm depositional systems**. Berlin: Springer, 1985. 174 p. (Lecture notes in earth sciences, 3).

ARAÚJO, L. A. **Análise da expressão estratigráfica dos parâmetros de geoquímica orgânica e inorgânica nas seqüências deposicionais Irati**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 307 p. Tese (Doutorado).

CHEEL, R. J.; LECKIE, D. A. Hummocky cross-stratification. In: WRIGHT, V. P. (Ed.). **Sedimentology review**. London: Blackwell Scientific, 1993. p. 103-122.

DAVIS, H. R.; BYERS, C. W. The role of bottom currents and pelagic settling in the deposition of shale in an oxygen-stratified basin: case study of the Mowry Shale (Cretaceous) of Wyoming. In: CALDWELL, W. G. E.; KAUFFMAN, E. G. (Ed.). **Evolution of the western interior basin**. Newfoundland: Geological Association of Canada, 1993. p. 177-188. (Geological Association of Canada. Special paper, 39).

KRASSAY, A. A. Storm features of siliciclastic shelf sedimentation in the mid-Cretaceous epeiric seaway of northern Australia. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 89, n. 3/4, p. 241-264, 1994.

KUEHL, S. A.; HARIU, T. M.; SANFORD, M. W.; NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D. J. Millimeter-scale sedimentary structure of fine-grained sediments: examples from continental margin environments. In: BENNETT, R. H.; BRYANT, W. R.; HULBERT, M. H. (Ed.). **Microstructure of fine-grained sediments**. Berlin: Springer, 1991. p. 33-45.

O'BRIEN, N. R.; BRETT, C. E.; WOODARD, M. J. Shale fabric as a Clue to sedimentary processes. In: SCHIEBER, J.; ZIMMERLE, W.; SETHI, P. S. (Ed.). **Shales and mudstone: petrography, petrophysics, geochemistry, and economic geology**. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1998. v. 2, p. 55-66.

SAGEMAN, B. B. The benthic boundary biofacies model: Hartland Shale Member, Greenhorn Formation

(Cenomanian), Western Interior, North America. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 49, n. 1/2, p. 87-110, 1989.

SCHIEBER, J. Significance of styles of epicontinental shale sedimentation in the Belt Basin, Mid-Proterozoic of Montana, U.S.A. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 69, n.3/4, p. 297-312, 1990.

_____. Significance of styles of epicontinental shale sedimentation in the Belt Basin, Mid-Proterozoic of Montana, U.S.A. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 69, n. 3/4, p. 297-312, 1990.

_____. Sedimentary structures: textures and depositional settings of shales from the lower belt supergroup, Mid-Proterozoic, Montana, U.S.A. In: BENNETT, R. H.; BRYANT, W. R.; HULBERT, M. H. (Ed.). **Microstructure of fine-grained sediments**. Berlin: Springer-Verlag, 1991. p. 101-107.

_____. Distribution and deposition of mudstone in the upper Devonian Sonyea Group of New York. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, Okla. v. 69, n. 4, p. 909-925. 1999.

SHANMUGAM, G.; SPALDING, T. D.; ROFHEART, D. H. Process sedimentology and reservoir quality of deep-marine bottom-current reworked sands (sandy contourites): an example from the Gulf of Mexico. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, Okla., v. 77, p. 1241-1259. 1993.

STOW, D. A. V.; BOWEN, A. J. A physical model for the transport and sorting of fine-grained sediment by turbidity currents. **Sedimentology**, New York, v. 27, p. 31-46. 1980.

TYSON, R. V. **Sedimentary Organic Matter: Organic Facies e Palynofacies Analysis**. London: Chapman & Hall, 1995. 615 p.

_____. Sequence-stratigraphical interpretation of organic facies variations in marine siliciclastic systems: general principles and application to the onshore Kimmeridge Clay Formation, UK. In: HESSELBO, S. P.; PARKINSON, D. N. (Ed.). **Sequence stratigraphy in British Geology**. London: Geological Society, 1996. p. 75-96 (Geological Society of London. Special Publication, 103).

_____; PEARSON, T. H. Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview. In: TYSON, R. V.; PEARSON, T. H. (Ed.). **Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia**. London: Geological Society, 1991. p. 1-24. (Geological Society of London. Special Publication, 58).

WALKER, R. G.; PLINT, A. G. Wave- and storm-dominated shallow marine systems. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (Ed.). **Facies models: response to sea level change**. Ontario: Geological Association of Canada, 1992. p. 219-238.

WIGNALL, P. B. **Black Shale**. Oxford: Oxford University Press, 1994. 136 p. (Geology and Geophysics Monograph Series, 30).

autor author



Laury Medeiros de Araújo

Unidade de Negócio de Exploração

Suporte Técnico / Modelagem de Sistema Petrolífero

e-mail: laury@petrobras.com.br

Laury Medeiros de Araújo nasceu em Lauro Muller, Santa Catarina, em 23 de abril de 1955, graduou-se em Geologia pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, em São Leopoldo (RS), em 1978. Fez Doutorado em Estratigrafia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2001, com ênfase em geoquímica orgânica e inorgânica. Ingressou na Petrobras em 1979, trabalhando na área de acompanhamento de poços e operações geológicas na Bacia de Campos. Entre 1981 e 1990 fez parte da equipe de avaliação de perfis e teste nas bacias de Campos e do Paraná, dedicando-se à área de hidrodinâmica e hidroquímica. Na interpretação geológica, a partir de 1990, participou de estudos de sistemas petrolíferos na Bacia do Paraná, com foco em geração não-convencional. A partir de 2001 integra o grupo de Modelagem de Sistema Petrolífero do Suporte Técnico do E&P-EXP, no Rio de Janeiro, realizando modelagem geoquímica 3D em diversas bacias marginais.