

Copyright 2004, 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

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO FURNAS (DEVONIANO INFERIOR) EM AFLORAMENTOS DA BORDA LESTE DA BACIA DO PARANÁ)

Gustavo LOBATO¹ & Leonardo BORGHI²

^{1,2}UFRJ, IGeo, DGel, Laboratório de Geologia Sedimentar, 21949-900 Rio de Janeiro, RJ.
E-mails gzlobato@yahoo.com.br , lborghi@geologia.ufrj.br

Resumo – A Formação Furnas (Devoniano Inferior) é analisada faciologicamente pela descrição de 200 m de rochas que afloram no Parque Estadual do Cânion do Guartelá (Estado do Paraná), na borda Leste da bacia do Paraná. A definição de 86 ciclos deposicionais permitiu a identificação de quatro intervalos estratigráficos na formação através da técnica do gráfico de Fischer, associando-se a eles dados de paleocorrente e petrográficos. Esses intervalos são interpretados como pertencentes a sistemas deposicionais flúvio-deltaicos (delta entrelaçado) e marinhos rasos (dominados por marés), relacionados a uma sucessão de tratos de sistema de Mar Baixo (TSMB), Transgressivo (TST), de Mar Alto (TSMA) e Transgressivo (TST), em um ciclo de 3ª ordem. Do ponto de vista de reservatórios, o intervalo superior (TST) apresenta melhores porosidades (visuais), resultantes do decréscimo do conteúdo de feldspatos, usualmente alterados para protomatriz. Mudanças do padrão de paleocorrentes corroboram os intervalos identificados e apontam para subsidência diferencial ao longo da bacia.

Palavras-Chave: Formação Furnas; Devoniano; Bacia do Paraná; Estratigrafia; reservatório

Abstract – The Furnas Formation (Lower Devonian) is faciologically analysed by the description of 200 m of rocks outcropping in the Guartelá Canyon State Park (Paraná State), at the Eastern Border of the Paraná Basin. The definition of 86 depositional cycles allowed the identification of four stratigraphic intervals in the formation through the Fischer Plot technique, also allied to paleocurrent and petrographic data. These intervals are interpreted as belonging to fluvio-deltaic (braided delta) and shallow marine (tide dominated) depositional systems, related to a succession of Lowstand (LST), Transgressive (TST), Highstand (HST) and Transgressive (TST) system tracts of 3rd order cycle magnitude. From the reservoir rock point of view the upper interval (TST) presents the best (visual) porosities, resulted from a decrease of feldspar content, which is usually altered to protomatrix. Paleocurrent data change agree with the proposed intervals and point to a historical differential subsidence along the basin.

Keywords: Furnas Formation; Devonian; Paraná Basin; Stratigraphy; reservoir

1. Introdução

A Formação Furnas representa o intervalo arenítico do Devoniano Inferior que, juntamente com os folhelhos da Formação Ponta Grossa, compõe em grande parte um ciclo transgressivo de 2ª ordem do Devoniano da bacia do Paraná, conhecido litoestratigraficamente como Grupo Paraná. Constitui-se basicamente de quartzarenitos esbranquiçados finos a grossos. Lutitos e ruditos são bastante subordinados; estes sendo encontrados principalmente na porção basal da unidade e, aqueles, como raras camadas finas na porção média superior. Possui estratificações cruzadas e plano-paralelas como principais estruturas sedimentares. Apresenta uma espessura média de 200 m (máxima de 343 m).

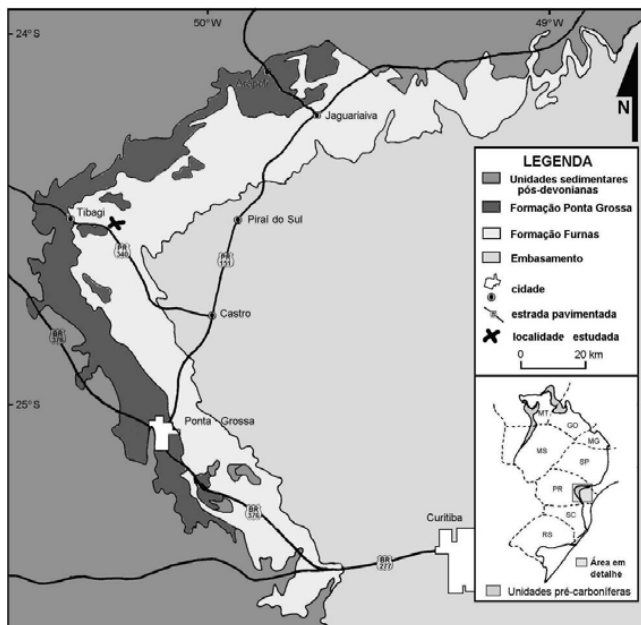
A interpretação paleoambiental da Formação Furnas é assunto complexo, ocorrendo grande controvérsia na literatura entre paleoambientes continentais (fluviais), parálicos (costeiros e flúvio-deltaicos) e marinhos rasos (“plataformais”), o que se alia à dificuldade de se conceber uma arquitetura de sistemas deposicionais (*q.v.* Borghi, 1993), à luz da Estratigrafia de Seqüências. Tais problemas devem-se aos fatos de uma “homogeneidade litológica”, carência de estudos faciológicos de detalhe e pobreza de fósseis corporais (muito raros restos vegetais no topo da formação) e icnofósseis. A inexistência de ambientes análogos adequados no Recente é outro fator complicador para a interpretação paleoambiental.

Dentro de um esforço de contribuição ao conhecimento exploratório da bacia – considerada de fronteira exploratória – e tendo em vista um possível sistema petrolífero Ponta Grossa–Furnas(?), o presente trabalho busca uma melhor definição estratigráfica da Formação Furnas através da análise faciológica de detalhe, à luz dos modernos conceitos da Estratigrafia de Seqüências.

2. Material e Método

Como material de estudo utilizou-se a sucessão estratigráfica da Formação Furnas aflorante na região do Parque Estadual do Cânion do Guartelá, entre os municípios de Castro e Tibagi, no Estado do Paraná (Figura 1). O método envolveu: (1) a descrição faciológica em um perfil estratigráfico de 200 m em escala 1:100 (Figura 2); (2) medição de dados direcionais de estratos cruzados para a análise de paleocorrentes (ao todo 109 medidas, declinadas 18°W); (3) amostragem sistemática de rochas ao longo do perfil (ao todo, 18 amostras coletadas com espaçamento de aproximadamente 10 m) para a análise petrográfica; e (4) obtenção de imagens fotográficas para a interpretação da arquitetura deposicional.

No perfil estratigráfico, foram interpretados ciclos deposicionais com base em critérios faciológicos (ao todo 86 ciclos), com os quais foi elaborado um gráfico de Fisher (*q.v.* Sadler *et al.*, 1993; Miall, 1997) (Figura 3). O método consiste, basicamente, na plotagem contínua e cumulativa da variação de espessura de um ciclo em relação à média das espessuras dos ciclos. O gráfico resultante permite inferir variações do espaço de acomodação sedimentar e, em um contexto adequado, a variação relativa de nível do mar (*cf.* Miall, 1997). A interpretação estratigráfica de seqüências foi baseada em Catuneanu (2003).



A análise petrográfica discriminou, através da contagem de 300 pontos por lâmina: quartzo monocristalino com extinção reta e fracamente ondulante (<5° de extinção, Qm); quartzo monocristalino fortemente ondulante (>5° de extinção, Qmo); quartzo policristalino com 2 ou 3 grãos (novos grãos) por clasto (Qp₂₋₃); quartzo policristalino com mais de 3 de grãos por clasto (Qp_{>3}); litoclastos (Lt); feldspatos+protomatriz (F); minerais acessórios (Ac); cimento (Cim); poro (Φ); e matriz (Mt). Para a confecção das composições QFL, foi utilizado: em Q, o somatório Qm+Qmo+Qp₂₋₃; a inclusão protomatriz caulínica no cálculo de F; e, em L, o somatório Lt+Qp_{>3}.

Figura 1. Localização do perfil de estudo, no Parque Estadual do Cânion do Guartelá (PR). Acesso pela rodovia PR-340 (Castro–Tibagi).

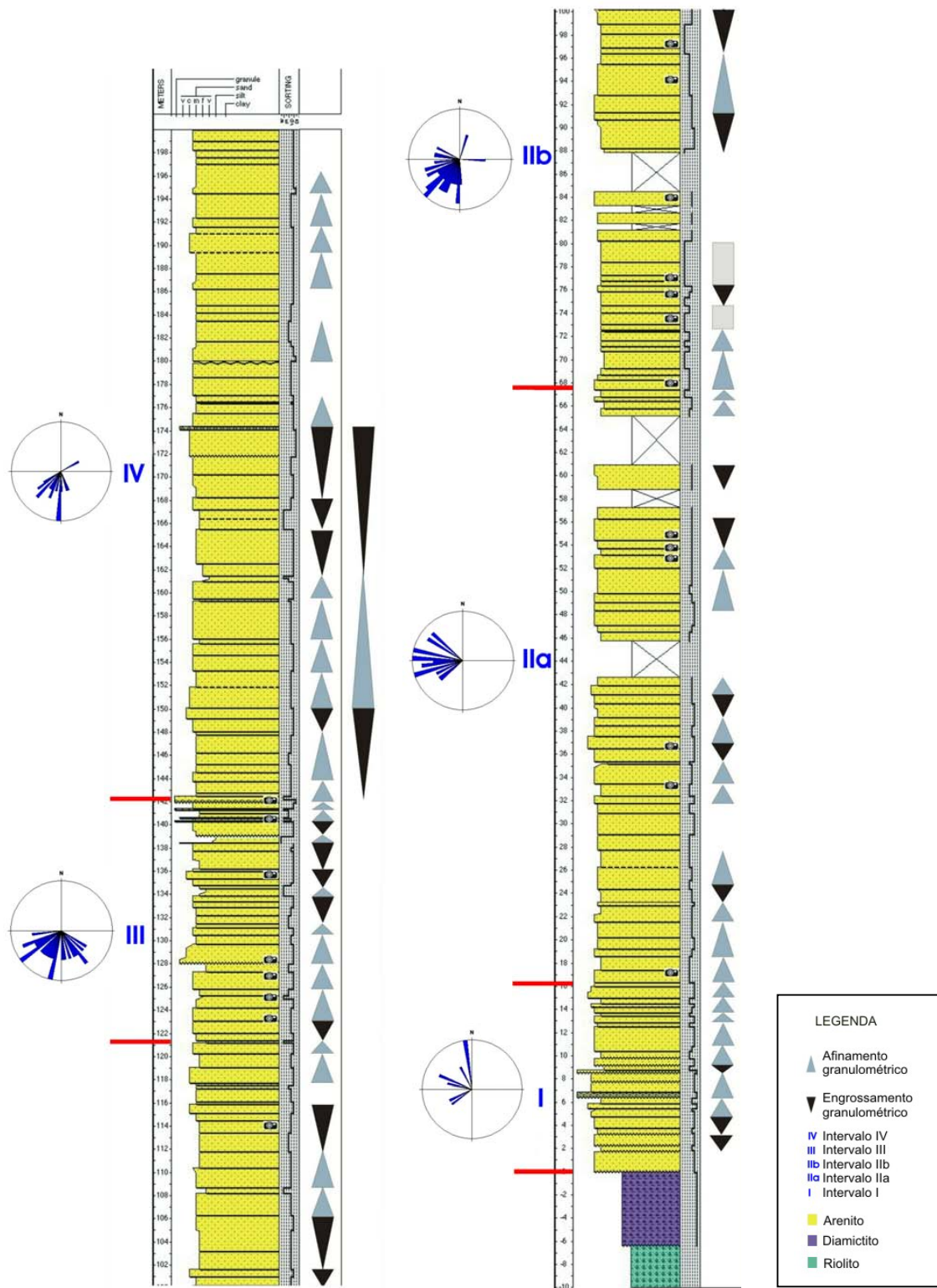


Figura 2. Perfil estratigráfico da sucessão estudada da Formação Furnas no Parque Estadual do Cânion do Guartelá.

3. Análise Estratigráfica

No intervalo estudado foram identificadas 10 fácies sedimentares (mais 8 subfácies), entre as quais 3 são predominantes (Tabela 1).

Os critérios para identificação dos ciclos sedimentares na sucessão de fácies analisada foram: (1) afinamento ou engrossamento granulométrico; (2) espessamento ou afinamento de camadas; (3) presença de estratificação cruzada *hummocky*, laminação de baixo-ângulo, grânulos ou estratificação plano-paralela, como feições limitantes do ciclo; e

(4) variação da seleção granulométrica. Foram reconhecidos 86 ciclos, que possuem uma espessura média de 2,33 m (mínimo de 0,5 m e máximo de 6,3 m).

Tabela 1. Síntese das fácies sedimentares predominantes, identificadas no perfil estudado.

Fácies	Diagnose	Interpretação
Aa2	Arenito médio a grosso com estratificação cruzada (planar ou acanalada) de porte médio (10 a 30 cm)	Corrente unidirecional em regime de fluxo inferior; migração de megaondulações (<i>megaripples</i>)
Aa3	Arenito médio a grosso com estratificação cruzada acanalada de porte grande (30–100 cm) a muito grande (> 1 m)	Corrente unidirecional de energia alta; migração de barras (flúvio-deltaicas) ou <i>sandwaves</i> (maré) de crista sinuosa
Ap	Arenito médio a grosso com estratificação cruzada planar de porte grande a muito grande	Corrente unidirecional de energia moderada; migração de <i>sandwaves</i> (maré) de crista reta

Para a confecção do gráfico de Fischer (Figura 3), assumiu-se uma taxa de subsidência constante. Nesse gráfico, sucessões de ciclos mais espessos (mais espessos que a média, indicado por “subida” na curva) sugerem incremento na geração do espaço para acomodação, resultante da subida relativa do nível relativo do mar. Por sua vez, sucessões de ciclos mais delgados (“quedas” na curva) sugerem decréscimo na taxa de geração de espaço para acomodação e queda do nível relativo do mar. Assim, com base no comportamento da curva observada na Figura 3 e das fácies sedimentares, a sucessão completa estudada foi subdividida em 4 intervalos (2 subintervalos), aqui interpretados como ciclos de 3ª ordem (“ciclos de Vail”). Esses intervalos possuem características faciológicas distintas, incluindo-se aí o comportamento das paleocorrentes (Figura 2) e sua evolução petrogenética. Bigarella *et al.* (1966) já observavam diferenças no sentido das paleocorrentes na formação (dois sentidos principais); já em termos composicionais, Bigarella *et al.* (1966) mencionaram um caráter arcossiano e matriz caulínica, que De Ros (1998) atribuiu ao resultado da modificação diagenética de feldspatos e micas do arcabouço. Um resumo das características principais de cada intervalo pode ser observado na Tabela 2.

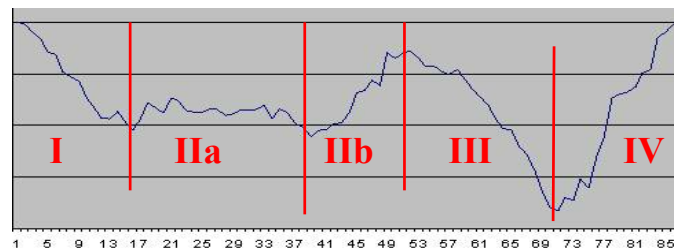


Figura 3. Gráfico de Fischer para a sucessão estudada (86 ciclos), com indicação dos intervalos identificados.

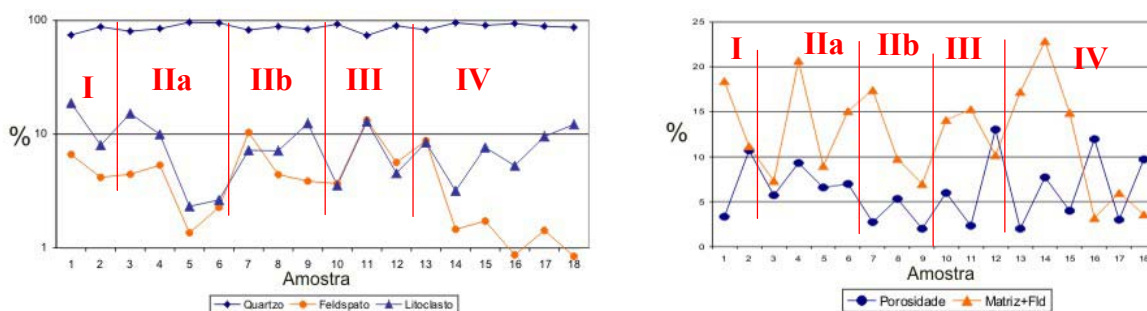


Figura 4. (A) Gráfico logarítmico das porcentagens de quartzo, feldspatos e litoclastos dos intervalos. (B) Gráfico com as porcentagens de porosidade e do somatório da matriz com feldspatos (Fld).

Intervalo I. – Este intervalo, basal, com 25 m de espessura, sobrepõe em discordância os diamictitos da Formação Iapó. Entre outras fácies descritas (Cm, Aa1 e Ah), a Aa2 é típica e fornece o sentido de paleocorrente (médio) para 310°. Os processos deposicionais principais são fluxos trativos unidirecionais (correntes), de alta energia, que transportaram areias de grã grossa e seixos de até 3 cm. Os ciclos do intervalo são basicamente de afinamento granulométrico, acompanhados de uma melhora na seleção, e são encerrados por conjunto de camadas da fácies Aa2. No gráfico de Fischer, o intervalo apresenta uma tendência de queda, através de ciclos delgados. A composição petrográfica é $Q_{81}F_{5}L_{14}$. A porosidade visual desse intervalo (Φ) apresenta valores de 3,3% na base e 10,7% no topo; e os valores de Mt+F variam entre 13% na base e 8,6% no topo (figura 4).

Além dos processos deposicionais identificados, a arquitetura deposicional sugere a interpretação de um sistema flúvio-deltaico entrelaçado, de alta energia, com migração de barras arenosas de crista sinuosa. A inexistência do registro de sedimentos finos do pró-delta seria explicada por ressuspensão causada pela ação de correntes de marés. O sistema deposicional estaria sob baixa agradação e, no contexto da sucessão, pertenceria a um Trato de Sistemas de “Mar Baixo” em sua fase final (cf. Catuneanu, 2003).

Intervalo IIa. – Este intervalo, de 51 m de espessura, é caracterizado tipicamente pelas fácies Aa2 e Aa3, entre outras descritas (Aa1 e Aot), a qual fornece sentido de paleocorrentes (médio) para 270°. O processo deposicional típico envolve fluxos trativos unidirecionais (correntes) de alta energia, mas registra-se, distintamente do intervalo anterior, a ação de ondas de tempestades (fácies Aot). Os ciclos do intervalo mostram padrão de adelgaçamento de estratos e afinamento granulométrico, por vezes encerrados por um conjunto de camadas com estratificação cruzada *hummocky* (fácies Aot). O gráfico de Fischer apresenta uma estabilização da curva, em uma ligeira queda. A composição petrográfica é Q₈₉F₃L₈. A porosidade (Φ) apresenta uma tendência de diminuição em direção ao topo, com os valores variando de 6,6% a 9,3%. Os valores de Mt+F tendem a aumentar em direção ao topo, com variação de 5,3% a 13,1%.

O sistema flúvio-deltaico do intervalo anterior é sucedido por este, deltaico-estuarino, transgressivo, influenciado possivelmente pela ação das marés (a ação de ondas, de tempestades, é episódica), provavelmente devido à subida do nível do mar (nível de base). O intervalo é interpretado como o início de um ciclo transgressivo de 3ª ordem (encerrado no intervalo IIb), associado a um Trato de Sistemas Transgressivo. O limite entre os intervalos I e IIa é uma superfície transgressiva.

Intervalo IIb. – Esse intervalo, de 41 m de espessura, é caracterizado por um predomínio da fácies Ap, contendo ainda outras fácies (Aa1, Aa2, Aa3, Aot e Ah). Observa-se uma mudança na dispersão e na orientação do sentido das paleocorrentes (médio) para 221°. O processo deposicional principal são fluxos trativos produzidos por correntes de marés com energia moderada, episodicamente amplificadas por tempestades. Os ciclos ocorrem como sucessões de camadas de arenito com estratificação cruzada planar (Ap) em espessamento granulométrico, ou sucessões com estratificações cruzadas em afinamento granulométrico. A curva observada no gráfico de Fischer apresenta uma constante subida, causada por ciclos espessos. O ponto a partir do qual a curva se torna ascendente é interpretado como uma superfície transgressiva de um ciclo de 4ª ordem, que limita os intervalos IIa e IIb. A composição petrográfica é Q₈₅F₆L₉. A porosidade (Φ) continua a apresentar queda (em relação ao intervalo IIa), variando, no intervalo, de 5,3% a 2%; os valores de Mt+F variam de 15,4% a 6,4%, com tendência de diminuição em direção ao topo.

Pela associação da faciologia com as paleocorrentes e o gráfico de Fischer, esse intervalo é interpretado ainda como um Trato de Sistemas Transgressivo, mas com uma maior taxa de transgressão (criação de espaço de acomodação), onde ocorreu a migração e acumulação de barras de marés (*sandwaves*), predominantemente de crista reta. Vale notar que neste intervalo registraram-se reversões de paleocorrentes.

Intervalo III. – Este intervalo, com 36 m de espessura, possui uma complexa constituição faciológica. As fácies típicas são Aa2, Aa3 e Ap de onde dados de paleocorrentes apontam para uma média de 198°. Outras fácies presentes são: Cm, Aa1, Aot e Ah. Os processos típicos envolvem tanto fluxos de alta energia como de energia moderada, ambos ainda relacionados à ação de correntes de maré. Os ciclos neste intervalo podem ocorrer tipicamente como sucessões de engrossamento ou afinamento granulométrico em camadas com estratificações cruzadas (tanto acanaladas quanto planares); ou como sucessões de afinamento granulométrico em camadas com estratificação cruzada acanalada, limitadas no topo por estratificações cruzadas *hummocky* ou de baixo-ângulo ou estratificação plano-paralela. O gráfico de Fischer mostra uma tendência de queda, indicada pela presença de ciclos curtos. A composição petrográfica é Q₈₅F₈L₇. A porosidade (Φ) apresenta um ligeiro aumento percentual, com valores de 2,3% a 6%, com um máximo próximo ao topo, no valor de 13%. Os valores de Mt+F apresentam-se de 9,6% a 13,3%.

Nesse contexto, interpreta-se uma regressão marinha normal, relacionando-se o intervalo a um Trato de Sistemas de Mar Alto. Episódios de regressões forçadas estão possivelmente presentes na porção média-superior, em ciclos de maior ordem (4ª ordem), o que talvez permita relacioná-lo ao *Falling Stage System Tract* de Catuneanu (2003). Em termos paleoambientais, houve a migração de barras de marés de cristas retas e sinuosas. Uma contribuição aluvial (inundações de tempestade?) justifica a ocorrência de ruditos (com clastos de até 9 cm), reelaborados por ondas de tempestades (Figura 2, cota 143 m). A superfície sob tais depósitos rudáceos é interpretada como um limite de seqüências, decorrente de um máximo regressivo. O limite de seqüências termina um ciclo transgressivo-regressivo de 3ª ordem dentro da Formação Furnas (intervalos IIa–III).

Intervalo IV. – Este intervalo, do topo, com 57 m de espessura, é caracterizado pelas fácies Ap e Aa3 como as mais representativas, contendo ainda as fácies Cm, Aa1, Aa2, Aot e Ah. A média das paleocorrentes é de 196°, apresentando reversões. Os processos trativos unidirecionais (correntes) são dominantes e decorrentes de marés mais fortes. Os ciclos identificados ocorrem como sucessões afinamento ou espessamento de camadas de arenito com estratificações cruzadas. Estruturas como laminação de baixo-ângulo ou pavimento de seixos são observados, limitando o topo de ciclos. O gráfico de Fischer apresenta uma subida, causada pela presença de ciclos espessos. A composição petrográfica é Q₉₀F₂L₈. A porosidade (Φ) ocorre com grande variação (2% a 12%), com uma tendência de aumento para o topo. Os valores de Mt+F variam de 1% a 16,3%, sendo mais altos na porção inferior, e decrescendo bruscamente em direção ao topo.

O limite inferior, que marca o limite de seqüências (3ª ordem), coincide com a superfície transgressiva deste intervalo. O intervalo é interpretado em padrão estratal retrogradacional e agradacional em um contexto de Trato de Sistema Transgressivo. No paleoambiente marinho raso, ocorreria a migração de barras de marés de cristas retas a sinuosas, periodicamente sob ação de tempestades. A nova transgressão é última verificada na Formação Furnas, o que representa a fase inicial do afogamento da bacia que culmina com a sucessão transicional para os folhelhos da Formação Ponta Grossa.

Tabela 2. Síntese das características geológicas dos intervalos estratigráficos da Formação Furnas na região do Parque Estadual do Cânion do Guartelá (PR).

Intervalo	Espessura (m)	Fácies predominante	Sistema deposicional	Ciclo (3ª ordem)	Paleocorrentes			Petrografia
					Média	Moda	Nº	
I	25	Aa2	Flúvio–deltaico entrelaçado	“Mar baixo”	310°	350°	10	Q ₈₁ F ₃ L ₁₄
IIa	51	Aa2 e Aa3	Deltaico entrelaçado–estuarino (maré)	Transgressivo	270°	275° 250°	19	Q ₈₉ F ₃ L ₈
IIb	41	Ap			221°	225°	33	Q ₈₅ F ₆ L ₉
III	36	Aa2, Aa3 e Ap	Marinho raso (maré)	Mar Alto	198°	195° 230°	26	Q ₈₅ F ₈ L ₇
IV	57	Ap e Aa3		Transgressivo	196°	185°	21	Q ₉₀ F ₂ L ₈

4. Conclusões

A análise faciológica em afloramento junto à interpretação dos ciclos deposicionais (gráfico de Fischer) permitiu a caracterização estratigráfica de tratos de sistemas e seqüências na Formação Furnas em termos de ciclos de 3ª ordem, o que não fora feito até o presente. Isto permite a comparação futura com estudos análogos realizados com base em perfis elétricos na formação (*e.g.*, Assine, 1999; Pereira & Bergamschi, 2001), o que permitirá testar o modelo estratigráfico proposto. A progressiva mudança direcional e comportamental das paleocorrentes reflete uma mudança paleogeográfica dos ambientes de sedimentação, do sistema fluvio-deltaico (intervalo I) para o marinho raso (intervalo IV), que pode ter sido resultado de um basculamento tectônico na bacia forçando a migração do seu depocentro e, em decorrência, do sentido principal do transporte sedimentar. Pela análise petrográfica, percebe-se que a partir do topo do intervalo III e no intervalo IV ocorrem as melhores porosidades, decorrente da redução do aporte de feldspatos, o que a torna este último possivelmente o melhor intervalo para reservatório de óleo na formação. A proximidade estratigráfica de rochas geradoras potenciais da Formação Ponta Grossa, pode sugerir um sistema petrolífero Ponta Grossa–Furnas(?), com eventual armadilhamento estrutural–estratigráfico.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo auxílio da bolsa (IC-PIBIC) percebida por G. Lobato; ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP) pela permissão de investigação da área de estudo e aos funcionários do Parque Estadual do Cânion do Guartelá pelo apoio durante o trabalhos de campo (junho de 2004); à Prefeitura Municipal de Tibaji (PR) pela logística fornecida com o transporte para o trabalho de campo; e ao Prof. Dr. L. F. de Ros (UFRGS) pelas “dicas” com alguns procedimentos petrográficos.

6. Referências

- ASSINE, M. L. Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas, no flanco sudeste da bacia do Paraná. *Rev. Bras. Geoci.*, São Paulo, v. 29, p. 357-370, 1999.
- BORGHI, L. *Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas em afloramentos do bordo leste da bacia do Paraná*. Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993. (Dissertação de Mestrado)
- BIGARELLA, J.J., SALAMUNI, R., MARQUES FILHO, L.P. Texturas e estruturas da Formação Furnas e sua significação paleogeográfica. *Bol. Univ. Fed. Paraná*, Curitiba, n. 18, p. 1-114, 1966.
- CATUNEANU, O. *Sequence Stratigraphy of clastic systems*. GAC, Newfoundland, 2003. (Short Course 16)
- DE ROS, L.F. Heterogenous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the Silurian–Devonian Furnas Formation of the Paraná Basin, southern Brazil. *Sed. Geol.*, n. 116, p. 129-141, 1998.
- MIALL, A.D. *The Geology of stratigraphic sequences*. Springer, Berlin, 1997.
- PEREIRA, E., BERGAMASCHI, S. Caracterização de seqüências deposicionais de 3ª ordem para o Siluro-Devoniano na sub-bacia de Apucarana, bacia do Paraná, Brasil. In: Melo, J.H.G., Terra, G.J.S. (eds.) *Correlação de seqüências paleozóicas sulamericanas*. Petrobras, Rio de Janeiro, p. 63-72, 2001. (Ciên.-Téc.-Petról., Ser. Explor. Petról., 20.)
- SADLER, P. M., OSLEGER, D. A., MONTAÑEZ, I. P. On the labeling, length, and objective basis of Fischer plots. *J. sedim. Petrol.*, v. 63, n. 3, p. 360-368, 1993.