

Sistemas subaquosos alimentados por fluxos hiperpicnais glaciogênicos: modelo deposicional para arenitos do Grupo Itararé, Permocarbonífero da Bacia do Paraná

Subaqueous systems fed by glacially derived hyperpycnal flows: a depositional model for Carboniferous-Permian sandstones of the Itararé Group, Paraná Basin

Fernando Farias Vesely

resumo

O Grupo Itararé representa a porção basal da seqüência permocarbonífera da Bacia do Paraná e caracteriza-se por apresentar forte influência glacial na sedimentação. Arenitos da unidade são reservatórios para gás gerado em folhelhos marinhos devonianos. Em termos regionais, o arcabouço estratigráfico comporta múltiplas seqüências limitadas por discordâncias, cujos estratos depositaram-se em ambiente essencialmente glácio-marinho durante fases de deglaciação. Na metade inferior de cada seqüência aparecem espessas sucessões arenosas com padrão de granodecrescência ascendente retrogradacional, representando trato de sistemas de deglaciação. A análise detalhada desses arenitos em afloramentos do flanco leste da bacia permitiu a individualização de onze fácies, que incluem desde conglomerados a arenitos finos, maciços, com

gradação normal/inversa ou com estratificação. Conglomerados desorganizados, maciços ou gradados, e arenitos com estratificação cruzada representam as porções proximais do trato de fácies e foram depositados em leques proglaciais subaquosos (*outwash*) por fluxos de densidade hiperconcentrados a concentrados e correntes tracionais. Esses fluxos evoluíram para correntes de turbidez que depositaram arenitos turbidíticos tabulares estratificados, maciços ou gradados na porção mais distal. Correntes de longa duração em regime crescente e/ou decrescente depositaram arenitos com laminação cruzada cavalgante e laminação plano-paralela. Essas características são típicas de hiperpicnitos e evidenciam que fluxos hiperpicnais oriundos do degelo foram o principal mecanismo desencadeador das correntes de turbidez no Grupo Itararé.

(Originais recebidos em 07.11.2007)

Palavras-chave: Bacia do Paraná | neopaleozóico | deglaciação | arenitos turbidíticos | fluxo hiperpicnal

abstract

The glacial Itararé Group constitutes the lower interval of the Carboniferous-Permian megasequence in the Paraná Basin. Thick glacially related sandstone reservoirs present in this unit contain gas and condensate sourced by Devonian marine shales. Based on outcrop data from the eastern basin margin, the sedimentary facies and stacking patterns were analyzed in order to propose a depositional model for these sandstone successions. It is suggested that the sandstones were deposited subaqueously as proglacial fans due to meltwater-derived highly concentrated hyperpycnal flows. Regional Itararé Group's stratigraphy can be expressed as several unconformity-bounded sequences deposited in a marine glaciated basin during repeated deglaciation episodes. The lower half of each sequence is constituted of thick sand-rich successions typically showing fining-upward and a retrogradational stacking pattern. Eleven facies were recognized, ranging from conglomerates to fine-grained sandstones, massive, graded or stratified. Conglomerates and cross-bedded coarse sandstones represent proximal subaqueous deposits and were formed as ice-contact outwash fans/aprons due to meltwater-derived hyperconcentrated and concentrated flows and traction dominated bottom currents. These flows served as feeder systems to stratified, massive or graded turbiditic sandstone lobes deposited more distally. Parallel bedding and climbing ripples present in these beds were formed due to continuous aggradation from waxing and/or waning long-lived turbidity currents. These characteristics typify hyperpycnites and suggest that meltwater-derived hyperpycnal flows were the main trigger mechanisms to turbidity currents in the Itararé Group.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: Paraná Basin | late paleozoic | deglaciation | density flow | turbidite | hyperpycnite.

introdução

O Grupo Itararé consiste de uma espessa unidade siliciclástica depositada na Bacia do Paraná

entre o Neocarbonífero e o Eopermiano. Diamictitos, superfícies estriadas e pelitos com clastos caídos são depósitos e feições típicas da influência glacial no preenchimento sedimentar da bacia. Mesmo com a forte ação do gelo, a unidade é rica em arenitos, especialmente no centro-norte da bacia, onde os mesmos perfazem até 80% da coluna sedimentar. Esses arenitos possuem grande importância exploratória, pois encerram ocorrências de gás e condensado, a exemplo da acumulação de Barra Bonita no Estado do Paraná.

Um dos primeiros modelos deposicionais para o Grupo Itararé foi postulado por Leinz (1937), que assumiu a sedimentação predominantemente terrestre e reconheceu arenitos flúvio-glaciais. Após isso, interpretações de deposição subaquosa partiram da identificação de fácies de fluxos de massa e turbiditos em várias localidades (Gama Jr. *et al.* 1992; Eyles *et al.* 1993; França *et al.* 1996). Com base em evidências sedimentológicas e paleontológicas, trabalhos mais recentes têm assumido que a sedimentação do Itararé ocorreu predominantemente em ambiente marinho glacial (Santos *et al.* 1996; Vesely, 2006).

O Grupo Itararé encerra os únicos exemplos de arenitos turbidíticos documentados até o momento na Bacia do Paraná, conforme referido em várias publicações (Salamuni *et al.* 1966; Gama Jr. *et al.* 1992; Eyles *et al.* 1993; França *et al.* 1996). Na maioria dos trabalhos onde se faz referência a turbiditos, esses estão intimamente associados a depósitos glácio-marinhos, sugerindo que a influência glacial (pelo menos indireta) foi de algum modo determinante para o desencadeamento de correntes de turbidez e deposição de arenitos.

Ambientes marinhos adjacentes a geleiras de base úmida recebem grandes quantidades de sedimentos durante as fases de deglaciação. Os fluxos de água de degelo podem alcançar o mar através de leques/planícies flúvio-glaciais (*outwash*) ou entram diretamente no corpo d'água como fluxos de jato (*jet flows*) a partir de uma margem glacial aterrada ou flutuante (Powell, 1990). Em ambas as situações, fluxos densos e altamente concentrados adentram na bacia e produzem correntes de turbidez hiperpicnais. A magnitude e o poder de transporte dessas correntes são ainda mais significativos no caso de fluxos glaciogênicos catastróficos (*jokulhaups*), como aqueles descritos no Quaternário em várias regiões do planeta.

O recente acréscimo de conhecimentos sobre o registro sedimentar de grandes inundações e seu

Figura 1

Área estudada: (a) mapa de isópacas do Grupo Itararé na Bacia do Paraná (em metros) com destaque para sua faixa de afloramento; (b) localização das seções estudadas no flanco leste da bacia (referentes às figuras 4, 5 e 6). Isópacas de acordo com França e Potter (1988).

Figure 1

Study area: (a) isopach map and outcrop belt of the Itararé Group; (b) location of the studied outcrop sections in the eastern basin flank (França e Potter, 1988). See figures 4, 5 and 6.

reflexo na sedimentação marinha (Brunner *et al.* 1999) torna necessária uma reavaliação dos arenitos do Grupo Itararé sob essa ótica, visando a melhor caracterização da dinâmica deposicional envolvida na gênese dos depósitos turbidíticos. Neste trabalho, são descritas evidências de campo favoráveis a um modelo de sedimentação predominantemente relacionada a fluxos hiperpicnais derivados de águas de degelo, divergindo de modelos prévios que postularam a ressedimentação como principal mecanismo desencadeador de correntes de turbidez (Gama Jr. *et al.* 1992; Eyles *et al.* 1993). Para a caracterização desses arenitos, foram analisados afloramentos na faixa de exposições do Grupo Itararé no flanco leste da Bacia do Paraná (fig. 1), onde foram descritas as fácies e levantados os perfis verticais de detalhe.

Na área estudada, o Grupo Itararé possui entre 650 e 1.200 m de espessura (fig. 1), podendo ser subdividido em pelo menos cinco seqüências deposicionais limitadas por discordâncias erosivas (Vesely, 2006) e com recorrência vertical de fácies (fig. 2). As seqüências possuem fácies e empilhamento semelhantes, o que resulta da repetição de ciclos de avanço e recuo de geleiras na bacia durante o tempo Itararé. Épocas de avanço glacial ficaram registradas como discordâncias regionais, enquanto a totalidade da deposição ocorreu durante os períodos de recuo do gelo (deglaciações).

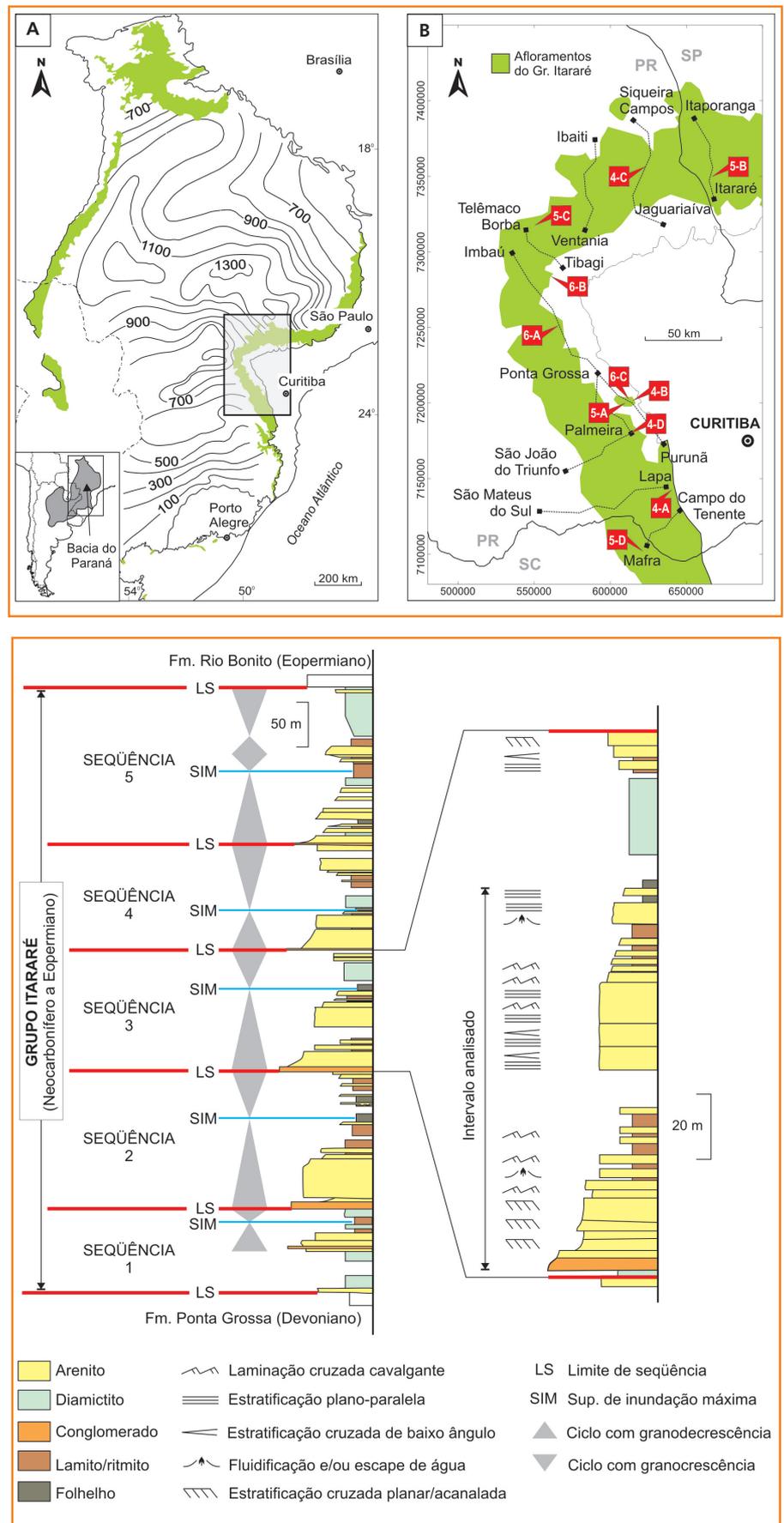
As fácies analisadas neste trabalho ocorrem na parte inferior das seqüências, onde estão presentes as espessas sucessões arenosas com granodecrescência ascendente (fig. 2). Essas suces-

Figura 2

Perfil estratigráfico de referência do Grupo Itararé na área estudada.

Figure 2

Reference vertical type-section of the Itararé Group in the studied area.



sões assentam sobre as discordâncias basais ou sobre delgados tilitos subglaciais, e são superpostas por fácies lamítico-arenosas de origem marinha (diamictitos, folhelhos e ritmitos). Segundo o modelo de evolução estratigráfica de Vesely (2006), cada sucessão com granodecrescência ascendente constitui um trato de sistemas com empilhamento retrogradante, denominado de trato de sistemas de deglaciação, e cuja constituição é dada essencialmente por fácies depositadas por fluxos de densidade subaquosos.

turbiditos e hiperpicnitos

O modelo deposicional discutido neste artigo insere-se no contexto dos sistemas subaquosos dominados por fluxos de densidade. Face à recente retomada de discussões sobre processos de transporte e deposição de turbiditos, mecanismos iniciadores de correntes de turbidez e seus impactos na geologia de reservatório (Mutti *et al.* 2003a), bem como à proliferação de termos como fluxo hiperpicnal, hiperpicnito e sistema hiperpicnal, julga-se pertinente apresentar uma breve discussão terminológica/conceitual sobre o tema.

Fluxos gravitacionais de sedimentos (*sediment gravity flows*) são fluxos de densidade subaéreos ou subaquosos em que a gravidade exerce o papel de força motora, atuando diretamente sobre as partículas. Incluem várias categorias de fluxo classificadas de acordo com a reologia e mecanismos de sustentação, tais como fluxos de detritos, fluxos de grãos e correntes de turbidez (*turbidity currents*).

Correntes de turbidez são fluxos subaquosos em que as partículas mantêm-se em suspensão próximo ao fundo devido à turbulência do fluido (Middleton e Hampton, 1973). Os depósitos sedimentares resultantes são os turbiditos. Muitos autores, como Lowe (1982) e Mutti (1992), utilizam o termo corrente de turbidez num espectro amplo para caracterizar a associação de processos gravitacionais que evoluem e sofrem transformações gradiente abaixo, mesmo que outros mecanismos além da turbulência atuem como suporte dos grãos (coesão da matriz, pressão dispersiva, escape da água intersticial, decantação dificultada). Esse espectro de processos, que envolve desde fluxos hiperconcentrados até correntes de turbidez diluídas, determina as fácies e os

elementos arquiteturais essenciais dos sistemas turbidíticos (Mutti, 1992; Mutti *et al.* 2003b).

Usualmente, correntes de turbidez são consideradas fluxos bipartidos compostos por uma parte basal de caráter laminar e de alta concentração (fluxo inercial) e uma parte superior plenamente turbulenta. Essa proposta é adotada neste trabalho. O comportamento bipartido da corrente pode ser demonstrado experimentalmente (Postma *et al.* 1989) e se reflete de forma satisfatória no registro geológico (Lowe, 1982). As correntes podem ser súbitas ou episódicas, com duração de minutos a horas, ou persistentes a quase constantes, com duração de dias a semanas. Esses dois tipos estão diretamente ligados ao mecanismo desencadeador ou disparador do fluxo.

Correntes de curta duração podem ser desencadeadas por desestabilização de taludes ou frentes deltaicas devido a terremotos, tempestades, *tsunamis*, inundações fluviais ou excesso de carga sedimentar, sendo assim um processo de ressedimentação. Deslizamentos de massa podem evoluir para correntes de turbidez devido a transformações no fluxo envolvendo entrada de água e perda de coerência. Por estarem relacionadas a eventos episódicos, as correntes apresentam gradiente decrescente de velocidade (*waning flows*), razão pela qual cada evento tende a depositar uma camada com gradação normal, como é o caso da seqüência de fácies de Bouma (1962).

Correntes de turbidez persistentes têm como principal mecanismo desencadeador os fluxos hiperpicnais oriundos de descargas fluviais. Fluxos hiperpicnais são fluxos subaquosos que se movem pelo fundo devido a sua maior densidade em relação à densidade da água do meio (Mulder *et al.* 2003). Um dos fatores que condicionam esse excesso de densidade é a concentração de partículas, que pode alcançar valores extremos durante épocas de inundação na planície aluvial. Diferentemente da corrente de turbidez súbita, uma corrente hiperpicnal originada por inundação tende a apresentar uma fase crescente de velocidade seguida de fase decrescente (*waxing to waning flows*). Ao longo do tempo, podem ocorrer flutuações na velocidade do fluxo como reflexo das variações no regime hídrico durante a inundação fluvial.

Na última década, vários trabalhos têm destacado o papel de inundações na geração de fluxos hiperpicnais e depósitos associados (Klaucke e Hesse, 1996; Brunner *et al.* 1999; Mulder *et al.* 2001, 2002, 2003; Mutti *et al.* 2003b; Plink-Björklund e Steel, 2004; Zavala *et al.* 2006). Mulder *et al.* (2002) cu-

Atributos dos fluxos	HFTs	SITs
Regime dominante	Turbulento	Turbulento
Duração	Dias a semanas	Minutos a horas
Gradiente de velocidade	Fases crescente e decrescente	Essencialmente decrescente
Atributos dos depósitos	HFTs	SITs
Razão areia/lama	Alta a moderada (≥ 1)	Variável; comumente ≤ 1
Espessura dos corpos de areia (eventos individuais)	Centímetros a alguns metros, dependendo da duração e taxa de agitação do fluxo	Em geral inferior a 1 metro
Estruturas sedimentares hidrodinâmicas	Laminação horizontal, laminação cruzada cavalgante, ondulações de corrente, estratificação cruzada de baixo ângulo, HCS	Laminação horizontal, ondulações de corrente
Camadas maciças	Freqüentes	Freqüentes
Gradação	Inversa a normal, somente normal, ou somente inversa	Em geral somente normal
Contato basal	Gradual, brusco e/ou erosivo	Brusco e/ou erosivo
Descontinuidades internas	Superfícies erosivas comuns	Muito raras
Variação lateral de espessura	Gradual ou abrupta	Gradual
Fósseis de origem terrestre	Comuns	Raros
Seqüência de Bouma	Rara	Comum
Associações de fácies mais comuns	Depósitos fluviais, e/ou deltaicos	Depósitos de escorregamentos de massa e fluxos de detritos

Tabela 1 – Quadro comparativo entre turbiditos associados a fluxos hiperpicnais de longa duração (hyperpycnal flow turbidites – HFTs) e turbiditos derivados de fluxos de massa episódicos (slide-induced turbidites - SITs). Baseado em estudos de caso discutidos em Mutti (1992), Mulder et al. (2003), Mutti et al. (2003b), Plink-Björklund e Steel (2004) e Zavala et al. (2006).

Table 1 – Comparison between hyperpycnal flow (HFTs) and slide-induced turbidites (SITs). Data based on case studies from Mutti (1992), Mulder et al. (2003), Mutti et al. (2003b), Plink-Björklund e Steel (2004) e Zavala et al. (2006).

nhou o termo hiperpicnito para se referir aos turbiditos resultantes dos fluxos hiperpicnais. Segundo o modelo, um hiperpicnito completo é constituído por uma parte basal com gradação inversa, resultante do fluxo crescente e com a parte superior apresentando gradação normal formada no estágio decrescente (Mulder et al. 2003). Mutti et al. (2003b) detalharam esses depósitos descrevendo seqüências de fácies típicas e discutindo idéias sobre a eficiência dos sistemas hiperpicnais. Para Zavala et al. (2006), um sistema hiperpicnal representa a extensão subaquosa

do sistema fluvial e, por isso, os depósitos resultantes apresentam feições comuns a processos fluviais e turbidíticos.

Turbiditos gerados por correntes de turbidez súbitas (*surge-like turbidites*) e turbiditos hiperpicnais ou hiperpicnitos (*hyperpycnal flow turbidites*) apresentam diferenças na natureza das fácies e associações de fácies, pois refletem tipos variados de fluxo e muitas vezes são depositados em contextos paleogeográficos distintos. Na tabela 1 é apresentado quadro comparativo entre esses diferentes tipos de

depósitos, que pode ser útil para trabalhos de análise de fácies em afloramentos e testemunhos. A documentação de hiperpicnitos no registro geológico está ainda em fase inicial. Distinguir esses depósitos dentro o universo das fácies turbidíticas é de suma importância para a caracterização de *plays* exploratórios, pois a natureza dos processos reflete-se na geometria, continuidade e heterogeneidades dos corpos arenosos. Outra questão refere-se à predição de reservatórios, já que turbiditos hiperpicnais podem estar presentes em diferentes contextos paleoambientais, estratigráficos e tectônicos.

(1983) para ambientes glaciais. A seguir, as fácies são descritas de acordo com o empilhamento estratigráfico mais comumente observado (fig. 3), o que, grosso modo, representa seu arranjo da porção mais proximal para a mais distal dentro do trato de fácies interpretado.

descrição e interpretação das fácies

Para a classificação das fácies foi adotado um código descritivo similar ao utilizado por Eyles *et al.*

conglomerado caótico (Gc)

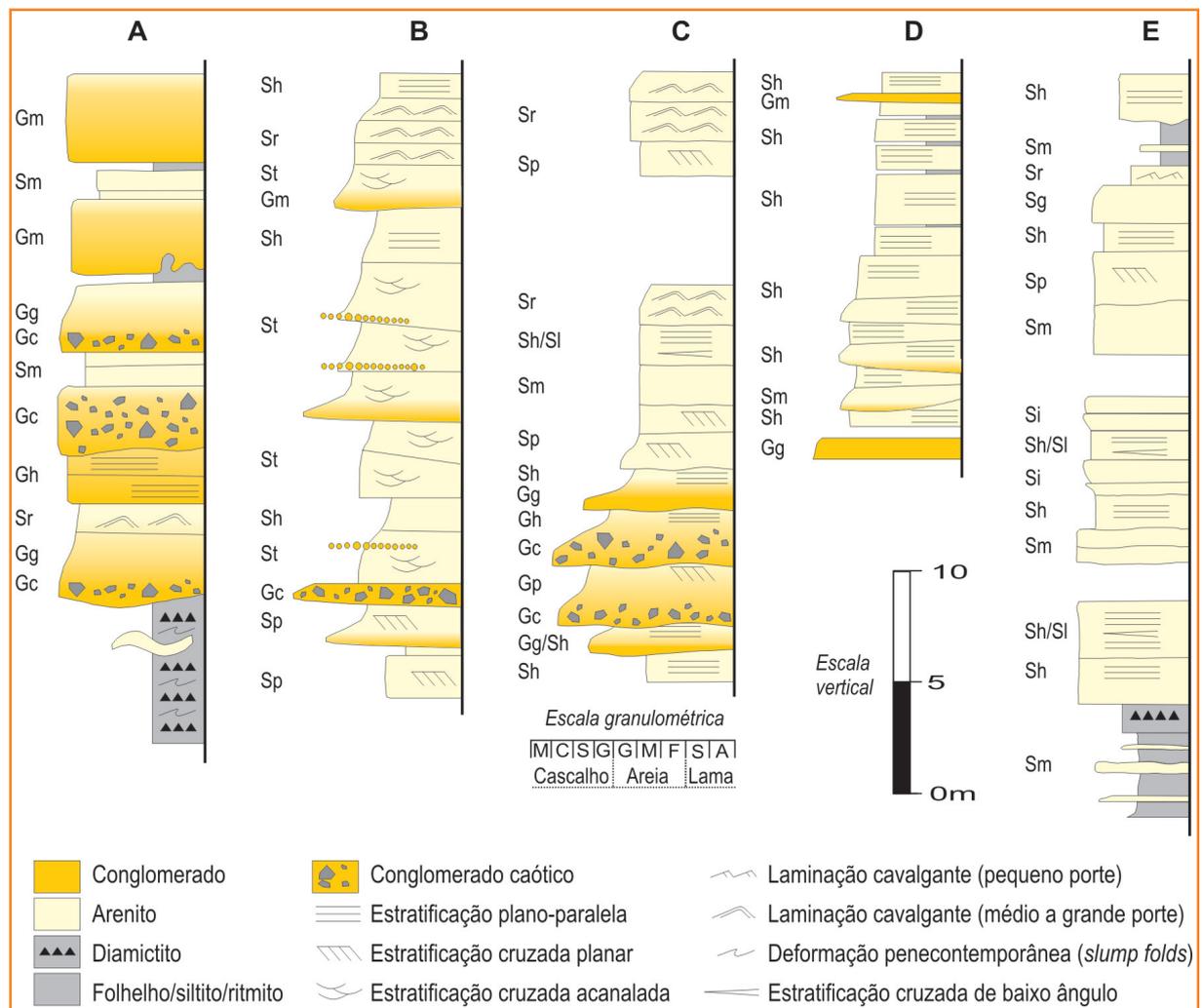
Conglomerados polimíticos pobremente selecionados, sustentados pelos clastos ou por matriz arenosa, e sem organização interna (figs. 4b e 4c). Os clastos (grânulos a matacões) são de granito, gnaise, quartzito e arenito, angulosos a arredondados, em alguns casos estriados e facetados. Intraclastos argilosos ocorrem esparsos ou concentrados na base dos corpos, evidenciando o caráter erosivo dos fluxos. Corpos individuais apresentam geometria

Figura 3

Perfis verticais ilustrando arranjos verticais de fácies mais comumente observados nos arenitos: (a) e (b) Seção Lapa – São Mateus do Sul; (c) Seção Jaguariáiva – Siqueira Campos; (d) Seção Ventania – Ibaiti; (e) Seção Purunã – Ponta Grossa.

Figure 3

Vertical profiles showing typical facies stacking observed within sandstone successions: (a) and (b) Seção Lapa – São Mateus do Sul; (c) Seção Jaguariáiva – Siqueira Campos; (d) Seção Ventania – Ibaiti; (e) Seção Purunã – Ponta Grossa.



irregular, espessura de até 2 m e exibem feições de corte e preenchimento (fig. 4b) e/ou carga sobre estratos subjacentes. Em alguns casos, formam ciclos recorrentes gradando na vertical para conglomerados estratificados (Gh e Gp).

Conglomerados caóticos são relativamente comuns na base de grandes sucessões arenosas do Grupo Itararé, assentando muitas vezes sobre limites de seqüência (França *et al.* 1996; Vesely e Assine, 2004). Neste trabalho, a fácies Gc é interpretada como depósitos proximais de *outwash* originados no desconfinamento de fluxos subglaciais altamente energéticos, provavelmente catastróficos, capazes de transportar clastos muito acima do tamanho médio em suspensão. O processo pode ser considerado fluxo hiperconcentrado (Mulder e Alexander, 2001), onde as partículas são suportadas pela ação conjunta de forças colisionais, friccionais e de viscosidade.

Manville e White (2003) descreveram conglomerados semelhantes em depósitos subaéreos do Recente, formados durante inundações de grande magnitude. Matações com diâmetro de até 1 m, imersos em matriz arenosa, representariam a fase de pico da inundação, logo sucedidos por arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada formados na fase de fluxo decrescente. Admite-se que jatos de água de degelo

num corpo d'água poderiam gerar depósitos similares, considerando que as porções proximais de sistemas de *outwash* subaéreos e subaquosos se assemelham genética e morfologicamente.

conglomerados maciços e com gradação normal (Gm, Gg)

Conglomerados polimíticos, clasto-suportados, maciços (Gm) ou com gradação normal (Gg) e constituídos por clastos do tamanho grânulo a calhaus e matriz de areia grossa formam corpos lenticulares ou de base côncava e topo plano (acanalado) com no máximo 2 m de espessura, em associação com outras fácies de conglomerados e arenitos. A imbricação dos eixos maiores dos clastos (eixos "a") ocorre com muita frequência (fig. 4a), sendo característica típica do transporte em suspensão (Walker, 1975). Clastos facetados e estriados são comuns, atestando a herança glacial.

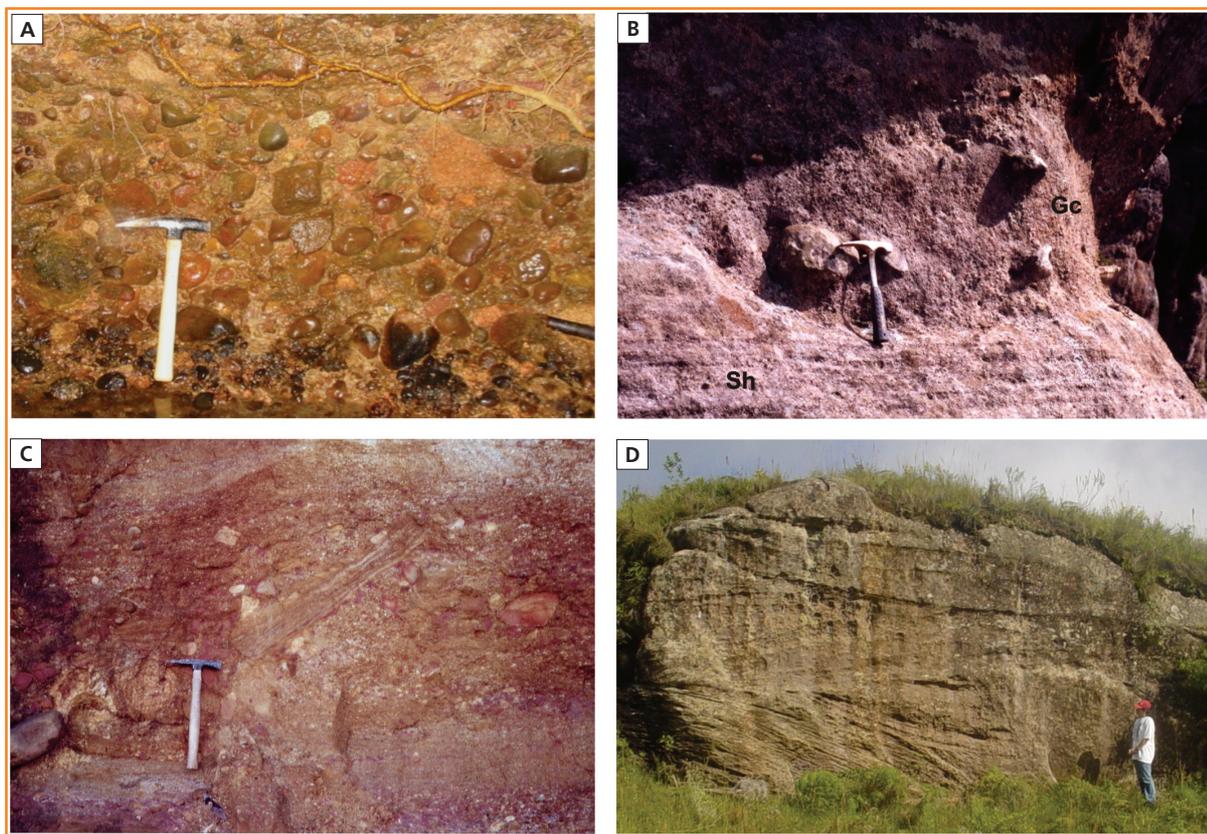
Conglomerados com ausência de estratificação são importantes em sistemas deposicionais dominados por processos gravitacionais canalizados, sen-

Figura 4

(a) conglomerado polimítico, maciço e clasto-sustentado (fácies Gm), apresentando imbricação dos eixos maiores de seixos e calhaus (fluxo da esquerda para a direita na foto); (b) conglomerado caótico sustentado por matriz arenosa (fácies Gc), preenchendo feição de corte sobre arenitos laminados (fácies Sh); (c) fácies Gc com matação anguloso de gnaisses; (d) estratificação cruzada acanalada de grande porte (fácies St).

Figure 4

(a) massive and clast-supported polymictic conglomerate (facies Gm) showing a-axis clast imbrication (flow from left to right); (b) chaotic sand-supported conglomerate (Gc) scouring laminated sandstone; (c) Facies Gc with angular gneiss boulder; (d) large scale trough crossbedding (facies St).



do referidos como “conglomerados ressedimentados” (Walker, 1975). Segundo Mulder e Alexander (2001), esses depósitos são produzidos por fluxos de densidade hiperconcentrados em que forças colisionais e o escape da água intersticial atuam como mecanismos de suporte dos clastos. A gradação normal reflete deposição da carga em suspensão sem ou com muito pouca tração subsequente, a partir de um fluxo com tendência desacelerante (Walker, 1975).

Experimentos realizados por Johansson (1963) *apud* Rust (1977) evidenciaram que a imbricação de eixos “a” pode desenvolver-se em correntes de alta energia dominadas pela saltação de seixos alongados. No ambiente glacial, correntes dessa natureza são comuns em sistemas de *outwash* subaquosos, próximo à desembocadura submersa de condutos subglaciais. Nesse caso, a reologia do fluxo é semelhante àquela dos fluxos gravitacionais típicos, porém desencadeados pela injeção de água de degelo altamente carregada de partículas. A ausência de feições de ressedimentação (escorregamentos), associada às fácies Gm e Gg nos afloramentos estudados sugere que esse foi o principal contexto envolvido na gênese dos fluxos.

conglomerados estratificados (Gh, Gp)

Conglomerado polimítico clasto-suportado e arenito conglomerático exibindo estratificação plano-paralela (Gh) ou cruzada planar de médio a grande porte (Gp), bem como alinhamento de seixos e calhaus conforme a estratificação, apresentam-se quase sempre em sucessões verticais heterolíticas constituídas pela alternância entre fácies arenosas e conglomeráticas, por vezes constituindo a base de ciclos com granodecrescência ascendente. Com frequência, a fácies Gp possui base erosiva e geometria acanalada, formando complexos de canais com truncamento lateral. As paleocorrentes medidas apontam fluxo unidirecional predominante para NW, segundo o azimute médio 300°.

No contexto de sedimentação proglacial, conglomerados estratificados são descritos em leques de *outwash* subaéreos e subaquosos. Conforme sugerido por Manville e White (2003), as fácies Gh e Gp podem ser consideradas como o produto da dissipação de um fluxo de densidade hiperconcentrado,

possivelmente num estágio de fluxo decrescente, porém com duração suficiente para desenvolver formas de leito. As transições verticais de fácies em um mesmo corpo sedimentar são evidências de flutuações na energia dos fluxos, possivelmente ligadas ao regime de descarga de água de degelo.

arenitos com estratificação cruzada (Sp, St)

Arenitos principalmente de grossos a muito grossos, por vezes conglomeráticos, com seleção pobre a moderada e apresentando estratificação cruzada planar (Sp) ou acanalada (St) de médio a grande porte (*sets* individuais com 10 cm a 2 m de espessura) (fig. 4d) dispõem-se em *sets* com geometria tabular, em cunha ou acanalada. O contato entre os *sets* é abrupto, muitas vezes envolvendo truncamento erosivo, com concentração de clastos na base, inclusive intraclastos de argila (*rip-up clasts*). Os *sets* de estratificação podem ocorrer intercalados com outras fácies arenosas, inclusive arenitos maciços, indicando associação de processos hidrodinamicamente distintos.

Arenitos com estratificação cruzada originam-se a partir da migração de formas de leito subaquosas por correntes de fundo (tração), em regime de fluxo inferior. Estudos relativamente recentes têm demonstrado cada vez mais a presença de sistemas “pseudo-fluviais” no assoalho de ambientes subaquosos (lacustres ou marinhos), até mesmo em águas profundas (Klaucke e Hesse, 1996). Muitos desses sistemas resultam de drenagem submarina oriunda de áreas continentais de alta latitude, onde águas de degelo são potenciais desencadeadores de fluxos hiperpicnais. A associação entre arenitos com estratificação cruzada e depósitos de fluxos de densidade pode ser considerada elemento indicativo do caráter subaquoso do sistema deposicional.

As paleocorrentes medidas são de padrão unimodal, mostrando ação efetiva de fluxos unidirecionais e pouca ou nenhuma contribuição de marés e ondas. O sentido predominante dos fluxos é para noroeste, localmente com desvios para oeste, norte e nordeste. Essas direções são paralelas ao paleofluxo glacial indicado por superfícies estriadas nessa região da bacia (Vesely, 2006).

arenito com estratificação plano-paralela ou cruzada de baixo ângulo (Sh/SI)

Arenitos de finos a grossos exibindo estratificação plano-paralela (Sh), comumente associada a pavimentos com lineação de partição, ou estratificação cruzada de baixo ângulo (SI) (fig. 5b). Feições de deformação hidroplástica são relativamente comuns e ocorrem confinadas em certos horizontes intercalados na fácies Sh. A espessura dos corpos é muito variável, compondo desde camadas com alguns centímetros até sucessões com dezenas de metros, na maioria das vezes sem nenhuma variação granulo-

métrica vertical. A geometria predominante é a tabular, com corpos de grande continuidade lateral e subordinadamente lenticular ou de base côncava e topo plano (canais) (fig. 5a).

Estratificação plano-paralela e lineação de partição constituem produtos típicos de correntes em regime de fluxo superior (Allen, 1982). A associação com a fácies SI indica o desenvolvimento de formas de leito de pequena amplitude e grande comprimento de onda em alguns estágios do fluxo, provavelmente na transição para o regime de fluxo inferior. Em alguns afloramentos descritos, as formas de leito que deram origem às cruzadas de baixo ângulo estão preservadas no topo das camadas de eventos.

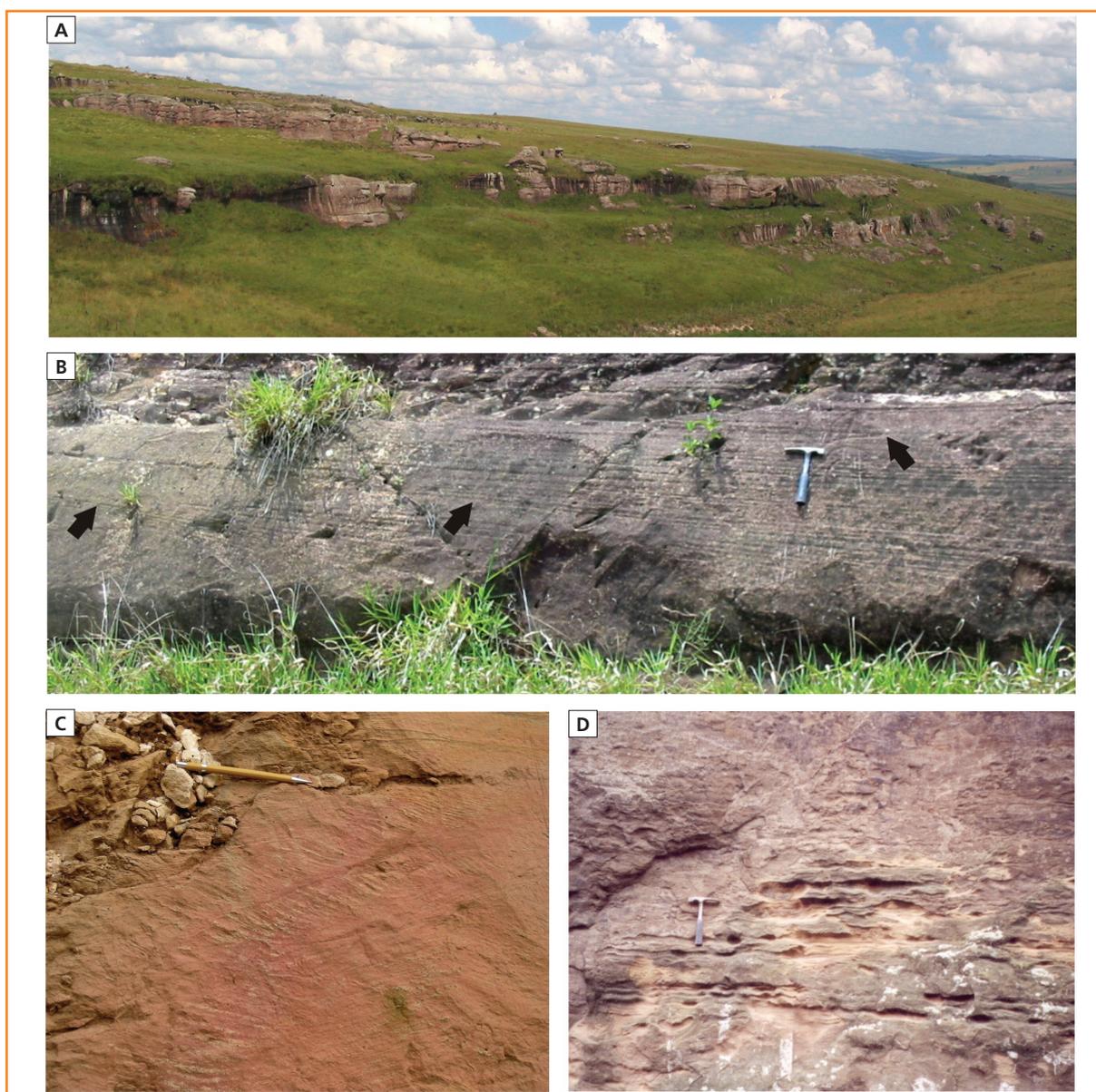
Em correntes de turbidez, a laminação plano-paralela tem sido relacionada a fluxos pouco concentra-

Figura 5

(a) corpos amalgamados de grande continuidade lateral, tabulares a suavemente acanalados, nos quais predominam fácies Sh, SI e Sr; (b) arenitos laminados (fácies Sh) e com estratificação de baixo ângulo (fácies SI), esses últimos com truncamentos indicados por setas; (c) arenito fino com laminação cruzada cavalgante dos tipos a e b; (d) laminação cruzada sinusoidal empilhada verticalmente numa sucessão homogênea com aproximadamente 2 m de espessura.

Figure 5

(a) laterally continuous, sheet-like to gently channelized, amalgamated sandstone bodies, in which facies Sh, SI and Sr predominate; (b) parallel-bedded and low angle cross-bedded sandstones (facies Sh/SI). Bedding truncation pointed out with black arrows; (c) fine-grained sandstone with types a and b climbing ripple cross lamination; (d) vertical recurrence of sinusoidal ripple lamination. Whole rippled succession is about 2 meters thick.



dos e com baixa taxa de agradação. Segundo Leclair e Arnott (2005), isso nem sempre é válido, pois se demonstrou que correntes de longa duração, elevada concentração e taxa de agradação superior a 4 mm s^{-1} podem gerar laminação plano-paralela. Sugere-se, assim, que a presença ou ausência de estratificação em turbiditos não deve ser utilizada como indicador da concentração do fluxo parental (Leclair e Arnott, 2005).

Fluxos persistentes de média a alta concentração e com alta taxa de agradação vertical podem ser vistos como o mecanismo mais provável para acumular as espessas camadas das fácies Sh e Sl verificadas no Grupo Itararé. A alternância entre dunas subaquosas e estratificação horizontal pode ser uma evidência de oscilações de energia controladas pelos fluxos hiperpicnais.

arenito com laminação cruzada cavalgante (Sr)

Arenitos de finos a muito finos, em geral bem selecionados, com laminação cruzada cavalgante unidirecional. De acordo com a classificação de Jopling e Walker (1968), podem ser identificadas laminações dos tipos A e B e sinusoidais (fig. 5c), com comprimento de onda de poucos centímetros até cerca de 1 m. A espessura dos cosets de ondulações varia de alguns centímetros até 1 m, eventualmente atingindo até 5 m (fig. 5d) e definindo sucessões com ou sem gradação normal. A fácies Sr ocorre associada e comumente intercalada com fácies Sh, Sm e Sl, definindo contatos abruptos ou transicionais. Em muitos casos há variação no ângulo de cavalgamento e até mesmo alternância com a fácies Sh numa mesma camada, sem a presença de descontinuidades limitantes.

A laminação cruzada cavalgante supercrítica é considerada uma estrutura sedimentar de origem essencialmente subaquosa (Allen, 1982), formada por migração de formas de leito num fluxo tratativo turbulento com muita carga em suspensão. A variação no ângulo de cavalgamento juntamente com a preservação ou não do *stoss side* da ondulação indicam taxas de agradação variáveis. O comprimento de onda e a altura das formas de leito são proporcionais à tensão cisalhante, uma variável ligada à velocidade do fluxo.

A fácies Sr é comum em turbiditos, representando a divisão Tc da seqüência de Bouma e regis-

trando o estágio de dissipação numa corrente de turbidez inicialmente densa e de caráter desacelerante. A repetição vertical dos sets de ondulações é uma evidência do caráter persistente do fluxo ao longo do tempo, de modo a promover lenta agradação da carga transportada (fig. 5d). A alternância entre diferentes tipos de laminação numa mesma camada indica flutuações na energia do fluxo num mesmo evento deposicional (Zavala *et al.* 2006). Por essa razão, arenitos com laminação cruzada cavalgante têm sido considerados por muitos autores como um típico depósito de correntes de turbidez hiperpicnais, sendo assim uma feição diagnóstica de hiperpicnitos (Mulder *et al.* 2003; Plink-Björklund e Steel, 2004; Zavala *et al.* 2006).

arenito maciço (Sm)

Arenitos de finos a grossos, por vezes granuloso, com seleção pobre a moderada, e caracterizados por ausência de estruturas sedimentares primárias e gradação (fig. 6a). Podem exibir estruturas de fluidificação e escape d'água tais como convoluções e feições em prato. Essa fácies define corpos com espessura variando de decímetros a vários metros, de geometria tabular ou lenticular, podendo passar gradativamente na vertical para fácies Sh, Sg ou Sr, em alguns casos definindo ciclos (fig. 6b).

Os contatos inferiores são comumente erosivos e, em alguns casos, associados a canalizações, com concentração de intraclastos argilosos na base. Laminações difusas definidas por níveis de granulação mais grossa, em alguns casos com gradação inversa, podem ocorrer na parte basal das camadas, podendo ser interpretados como carpetes de tração de acordo com Lowe (1982). A parte superior dos arenitos maciços é marcada muitas vezes por ondulações assimétricas de grande comprimento de onda, indicando desenvolvimento de formas de leito efêmeras no topo dos eventos.

Arenitos maciços fluidizados fazem parte de assembléias de litofácies subaquosas, associadas a fluxos de densidade hiperconcentrados/concentrados ou correntes de turbidez. O processo classicamente invocado para explicar a deposição de areias maciças turbidíticas é a desaceleração súbita (congelamento friccional) de um fluxo de alta densidade (Lowe, 1982), onde a espessura do depósito é aproximadamente equivalente à espessura do fluxo parental.



Figura 6

(a) estratos tabulares de arenito maciço; (b) arenitos maciços (Sm) alternados com arenitos laminados (Sh), sem contatos abruptos evidentes; (c) arenito com gradação inversa (fácies Si) passando no topo para conglomerado.

Figure 6

(a) tabular beds of massive sandstone; (b) massive sandstones (Sm) interbedded with parallel-bedded sandstones (Sh), showing no evidence of sharp contacts between facies; (c) inverse-graded sandstone (facies Si) grading upward to conglomerate.

Estudos mais recentes têm demonstrado que a lenta agradção numa corrente de turbidez quase constante pode promover a deposição de espessos arenitos maciços (Kneller e Branney, 1995). O não desenvolvimento de estruturas de tração dever-se-ia à ausência de interfaces entre camadas de velocidades diferentes dentro do fluxo, sob altas taxas de deposição por suspensão. O mecanismo tem sido adotado para interpretar a origem de arenitos maciços no registro geológico (Mutti *et al.* 2003b; Plink-Björklund e Steel, 2004; Zavala *et al.* 2006) e explica, satisfatoriamente, a deposição de espessos corpos arenosos com ausência de estratificação e sem variação granulométrica vertical presentes no Grupo Itararé, sem que para isso sejam necessários fluxos de igual espessura.

arenitos com gradação (Sg, Si)

Arenitos de médios a grossos, por vezes conglomeráticos, dispostos em corpos de espessura

centimétrica a métrica, individualmente apresentando gradação normal (Sg) ou inversa (Si) (fig. 6c), ou ainda com gradação inversa passando a normal (par Si/Sg); contatos erosivos na base, níveis de clastos argilosos arrancados do substrato, feições de sobrecarga e fluidificação são relativamente comuns. Também ocorre com frequência a transição vertical Sg-Sh ou Sm-Sg-Sh numa mesma camada, constituindo eventos de sedimentação por fluxo em desaceleração.

Em termos hidrodinâmicos, as fácies Si e Sg podem ser interpretadas como depósitos de correntes de turbidez de alta densidade (Lowe, 1982) ou fluxo de densidade concentrado (Mulder e Alexander, 2001). Interpreta-se que as gradações inversa e normal representem, respectivamente, os estágios crescente e decrescente de um fluxo de longa duração associado a descargas hiperpicnais (Mulder *et al.* 2001).

Corpos individuais e amalgamados da fácies Si estão associados a zonas de *bypass*, onde a fase decrescente do fluxo não foi depositada ou foi erodida por fluxos subseqüentes (Zavala *et al.* 2006). Outra opção seria por "congelamento" da camada friccional na base de uma corrente de turbidez de alta densi-

Figura 7

Modelo deposicional de leques de outwash subaquosos adotado para explicar a formação de depósitos arenosos a partir de fluxos hiperpicnais glaciogênicos (adaptado de Powell e Molnia, 1989).

Figure 7

Subaqueous outwash fan model adopted to explain sandstone deposition from glaciogenic hyperpycnal flows (modified from Powell and Molnia, 1989).

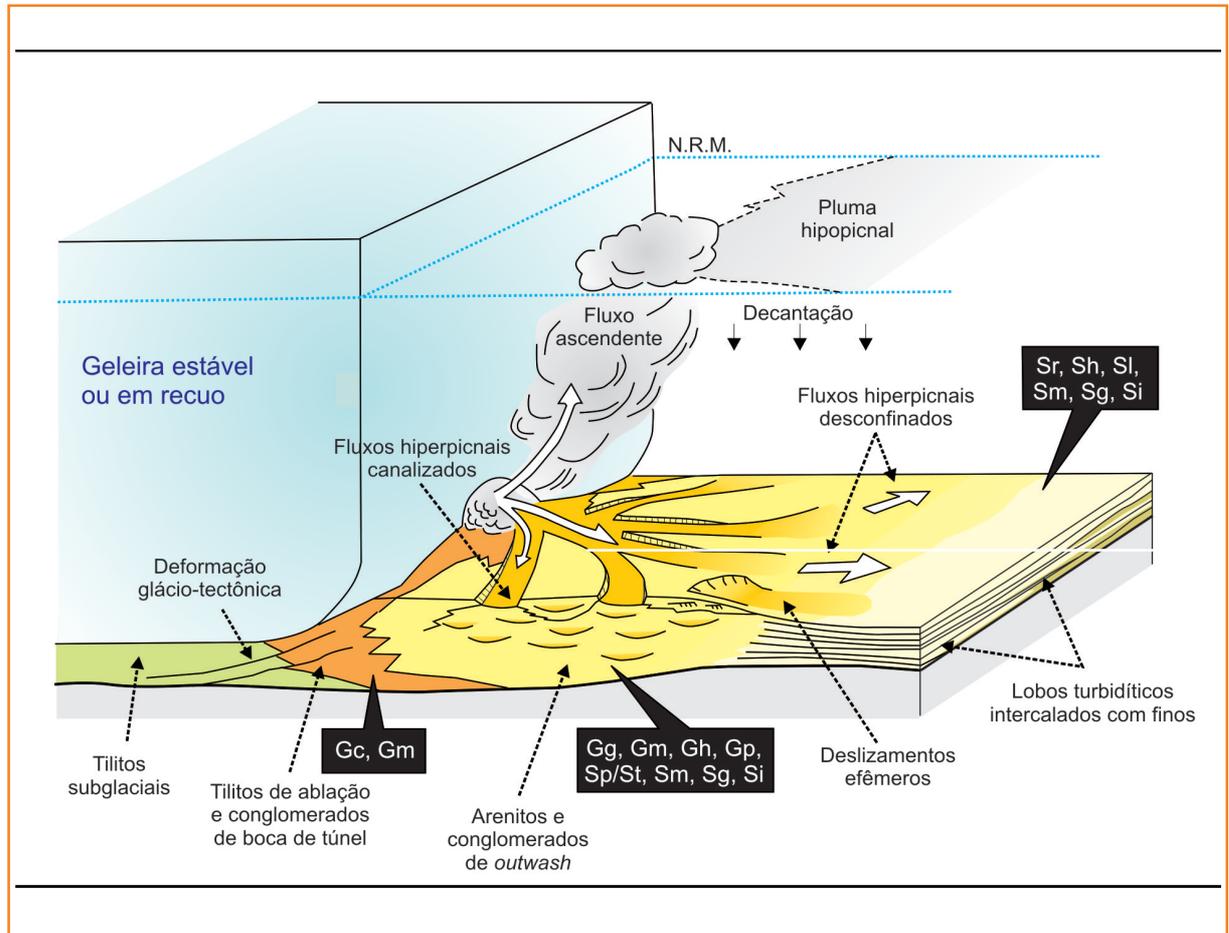
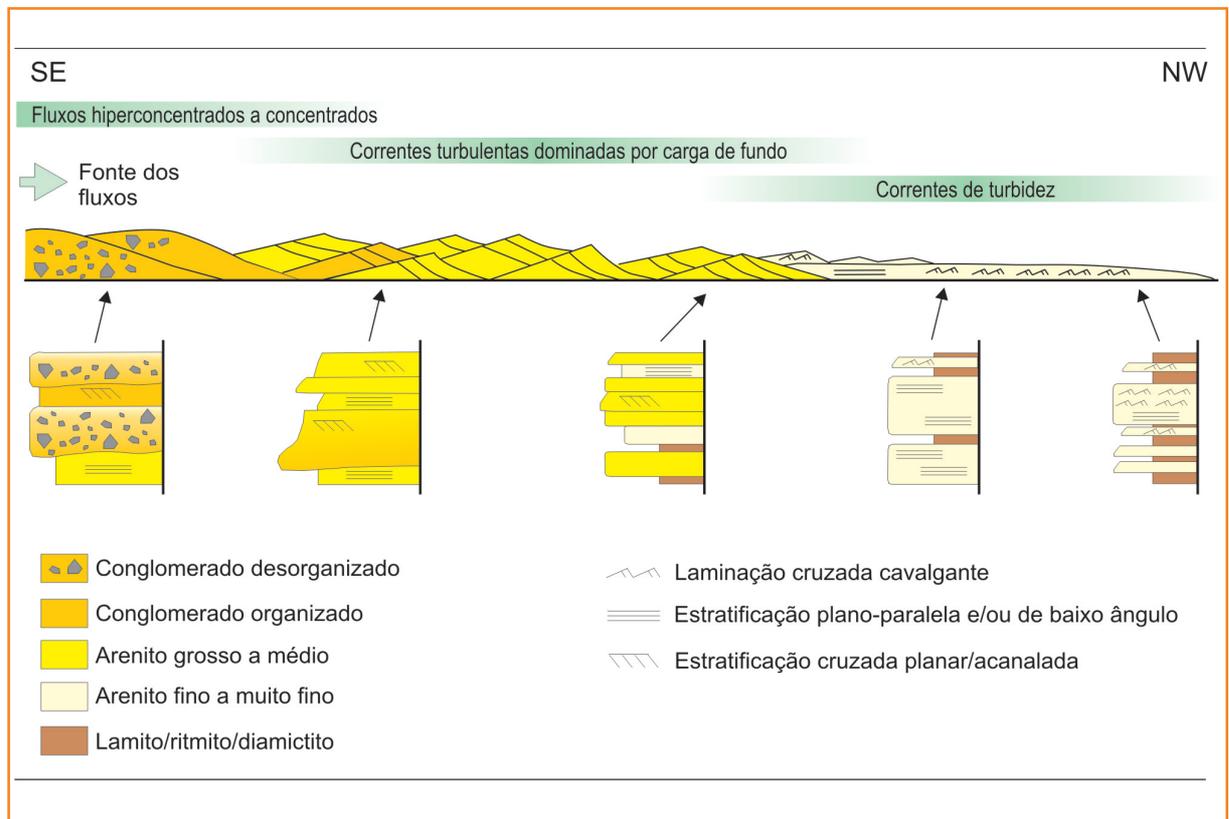


Figura 8

Transição longitudinal de fácies e processos que caracterizam sistemas subaquosos dominados por fluxos hiperpicnais no Grupo Itararé.

Figure 8

Downflow processes and facies transitions developed during the evolution of meltwater derived hyperpycnal flows in the Itararé Group.



dade (R_2) de Lowe (1982). Porém, tais camadas são em geral de pequena espessura relativa à espessura da camada de evento como um todo (Lowe, 1982), enquanto no Grupo Itararé a fácies Si pode atingir até 50 cm de espessura e constituir mais da metade da camada de evento (fig. 6c).

discussão do modelo deposicional

As fácies analisadas compõem um trato de fácies subaquoso que incorpora desde depósitos de *outwash* na parte proximal até lobos turbidíticos na parte distal (fig. 7). Esse trato de fácies registra a evolução de fluxos hiperpicnais bacia adentro, tendo como fonte alimentadora descargas de água de degelo em épocas de deglaciação. A figura 8 ilustra de forma esquemática o espectro de fácies desenvolvido e assinaturas típicas em perfis verticais.

A paleogeografia dominante à época da deposição seria caracterizada por lençóis de gelo aterrados num corpo d'água marinho (*grounded wet-based marine ice sheets*), fornecendo detritos para a bacia através de fluxos de água de degelo confinados em condutos subglaciais (Vesely, 2006). Nesse contexto, água carregada de sedimentos seria injetada diretamente no corpo d'água, continuamente ou em fluxos episódicos. O peso do gelo sobre o substrato promoveria subsidência glácio-isostática, gerando espaço para acomodação desses sedimentos. Sob tais condições, sistemas subaquosos de *outwash* se formariam junto à margem da geleira (fig. 7).

Com o recuo do gelo os sistemas de *outwash* foram empilhados em arranjo retrogradacional numa dinâmica de *backstepping*. Com isso, fácies próximas à geleira foram cobertas por fácies mais distais, resultando num padrão estratigráfico típico, aqui denominado de trato de sistemas de deglaciação. O topo desse trato é marcado por fácies pelíticas que registram o afogamento definitivo dos sistemas arenosos. O pico de argilosidade presente nesses pelitos pode ser, por analogia, interpretado como uma superfície de inundação máxima que encerra o trato de deglaciação (fig. 2). Acima dessa superfície, o padrão deposicional não sofreria mais o controle direto da dinâmica de recuo da margem glacial (Vesely,

2006), predominando processos normais de progradação e retrogradação da linha de costa.

Sistemas subaquosos de *outwash* configuram leques ou complexos formados por leques coalescentes (fig. 7). A interação entre correntes tracionais e fluxos gravitacionais altamente concentrados é típica desses sistemas. O caráter hiperpicnal dos fluxos que se originam a partir da geleira deve-se à alta concentração de partículas e à baixa temperatura das águas. Fluxos com essas características podem transportar areia como carga de fundo por dezenas de quilômetros além da margem da geleira.

O ápice dos leques de *outwash* situa-se junto ao desconfinamento de túneis glaciais e constitui-se de conglomerados pobres em estratificação depositados por fluxos hiperconcentrados. Conglomerados caóticos com matacões suspensos na matriz de areia grossa são sugestivos de fluxos catastróficos, desencadeados por pulsos episódicos de água de degelo. Nas seções analisadas do Grupo Itararé, essas fácies predominam nas porções basais, o que representa o segmento mais proximal dos leques de *outwash*. Segundo Russell e Arnott (2003), a passagem desses fluxos altamente concentrados para correntes em regime de fluxo inferior se dá através de um salto hidráulico que promove, na zona transicional, erosão e incisão de canais.

A abundância de estratificação cruzada indica o domínio de correntes de fundo de longa duração, mantidas pela constante descarga de água de degelo carregada em sedimentos grossos. Com isso, favorece-se a formação de sistemas de drenagem submarinos com elementos morfológicos semelhantes aos de sistemas aluviais, particularmente aqueles caracterizados por drenagem distributária. Barras arenosas em cunha ou lenticulares, lateralmente truncadas por canais rasos e estreitos preenchidos por conglomerados, são evidências dessa dinâmica deposicional e produzem depósitos facilmente confundíveis com fácies subaéreas.

O desconfinamento e a transformação dos fluxos gradiente abaixo promovem a geração de correntes de turbidez, episódicas ou de longa duração (quase-constantes), formando arenitos lobados, maciços, laminados, gradados, fluidificados e/ou com *climbing ripples*. Canais distributários podem migrar lateralmente e causar erosão dos lobos arenosos e a superposição de diferentes elementos deposicionais. Esse padrão de alternância de fácies representa uma característica diagnóstica de leques de *outwash*

subaquosos, pois intercala arenitos tracionais (Sp/St) com fácies turbidíticas (Sm, Sr e Sg).

As fácies presentes nos lobos turbidíticos indicam o predomínio de correntes de turbidez hiperpicnais quase-constantemente devido aos seguintes aspectos: a) camadas de grande espessura, em geral superiores a 1 m; b) sucessões de vários metros com laminação cruzada cavalgante; c) abundância de laminação plano-paralela; d) algumas camadas de areia sem gradação; e) alternância entre laminação cruzada plano-paralela, estratificação cruzada de baixo ângulo e laminação plano-paralela numa mesma camada de evento (tab. 1). A passagem das fácies tracionais de *outwash* para os turbiditos é gradual, indicando conexão física entre o sistema alimentador e os lobos, o que caracteriza sistemas de moderada a baixa eficiência (Mutti *et al.* 2003b).

Mulder *et al.* (2003) restringem o emprego do termo corrente de turbidez hiperpicnal a fluxos de baixa densidade inteiramente suportados por turbulência. Outros autores, como Petter e Steel (2006), referem-se a fluxos hiperpicnais tanto de baixa densidade quanto de alta densidade, sendo esses últimos mais energéticos e capazes de se mover por distâncias mais longas. Neste trabalho, o termo hiperpicnal é aplicado a todo fluxo subaquoso de origem extrabacinal que se move pelo fundo devido a sua maior densidade em relação à densidade da água do meio. Essa concepção é similar à utilizada por Zavala *et al.* (2006) para hiperpicnitos na Bacia de Neuquen, na Argentina, e preserva a definição original do termo (Bates, 1953 *apud* Petter e Steel, 2006).

No modelo adotado, a fonte dos fluxos encontrava-se submersa, pois a margem da geleira estava aterrada no corpo d'água. Esse contexto difere dos sistemas hiperpicnais típicos, em que a fonte alimentadora é fluvio-deltaica. A principal diferença está no fato de que fluxos hiperpicnais alimentados por rios possuem uma zona de *plunge* na região da desembocadura fluvial, a partir da qual o fluxo submerge e passa a se mover pelo fundo. No caso admitido para o Grupo Itararé, os fluxos são injetados diretamente sobre o substrato da bacia como carga de fundo.

Modelos prévios associaram o desencadeamento de correntes de turbidez no Grupo Itararé ao processo de desestabilização de depósitos preexistentes (Gama Jr. *et al.* 1992; Eyles *et al.* 1993). Diamictitos heterogêneos, muitas vezes com inclusões deformadas de outras litologias, são testemunhas desses eventos de ressedimentação. Segundo Gama Jr. *et al.* (1992), existiria um trato de fácies transicional inicia-

do com diamictitos desorganizados, passando por conglomerados, arenitos estratificados e finalmente arenitos maciços e/ou fluidificados.

A organização vertical verificada nas seções analisadas neste trabalho (figs. 2 e 3) não permite definir os arenitos e conglomerados como depósitos distais dos diamictitos ressedimentados. Quando esses diamictitos aparecem sob as sucessões arenosas, os mesmos são truncados por discordância erosiva, sugerindo que a deposição das areias ocorreu em fases posteriores de sedimentação. Em outras situações, diamictitos ocorrem no topo das seqüências retrogradacionais de deglaciação, sendo portanto resultado de processos subseqüentes, provavelmente chuva de detritos e fluxos gravitacionais coesivos (Vesely e Assine, 2006).

É fato que as estruturas deformacionais e depósitos gerados por deslizamentos e escorregamentos de massa são comuns no Grupo Itararé (Gama Jr. *et al.* 1992; Eyles *et al.* 1993). Já a relação desses processos com a deposição de turbiditos arenosos é pouco compreendida. Conforme Parsons *et al.* (2001), estudos experimentais demonstram que fluxos gravitacionais induzidos por deslizamentos são pouco eficientes na geração de correntes de turbidez. Isso sugere que grandes deslizamentos de massa são necessários para produzir grandes volumes de arenitos turbidíticos. Neste trabalho, considera-se que ritmos lama-areia gradados, igualmente comuns no Grupo Itararé, poderiam constituir fácies distais relacionadas a processos de ressedimentação.

conclusões e implicações exploratórias

A análise de fácies realizada no Grupo Itararé permite interpretar que correntes de água de degelo desempenharam papel importante no transporte, seleção e deposição de sedimentos para a Bacia do Paraná durante as épocas de deglaciação no Permocarbonífero. Leques subaquosos de *outwash* serviram de sistemas alimentadores para a deposição de espessos corpos arenosos turbidíticos presentes na unidade. Com isso, pode-se concluir que, pelo menos na área de estudo, fluxos de densidade subaquosos

foram disparados por jatos de água de degelo e que processos de ressedimentação a partir de deslizamentos de massa foram bem menos importantes no desencadeamento desses processos.

Fácies proximais ricas em matacões e associadas a feições de erosão são indicativas de elevada energia de transporte, sugerindo caráter catastrófico de alguns fluxos. Isso sugere que pelo menos parte dos arenitos está associada a inundações de grande magnitude induzidas pela drenagem repentina de água de degelo aprisionada no interior da geleira, de forma análoga aos depósitos originados por *jokulhaups* descritos no Quaternário.

Unidades sedimentares glaciais nunca foram consideradas os melhores alvos para a exploração de petróleo, já que os processos induzidos por geleiras produzem grande volume de silte e argila e depósitos mal selecionados de baixa permeabilidade (diamictitos). No entanto, sabe-se que formações glaciais paleozóicas arenosas são comuns e que tais arenitos contêm reservas de petróleo em várias partes do mundo (Potter *et al.* 1995). Exemplos de acumulações de hidrocarbonetos associadas a esse tipo de reservatório ocorrem na Bolívia (Formação Tarija), Austrália (Grupo Grant), Península Arábica (Formação Al Khlata), dentre outras bacias.

Segundo o modelo deposicional proposto, os arenitos estudados reúnem características comuns a sistemas “fluviais” e turbidíticos, produto da evolução de fluxos hiperconcentrados para correntes tracionais e correntes de turbidez. Isso demonstra que o Grupo Itararé pode ser considerado um análogo de campo para compreender reservatórios turbidíticos de natureza hiperpical presentes em bacias produtoras da margem brasileira (D’Ávila, 2005). Em suma, o estudo da arquitetura deposicional do Grupo Itararé em afloramentos pode contribuir para a confecção de modelos tridimensionais com a predição de caminhos preferenciais de fluxo de fluidos, viabilizando o desenvolvimento da produção nesse tipo de reservatório.

agradecimentos

Este artigo resulta de estudos realizados pelo autor entre 1999 e 2006, no âmbito de projetos de mestrado e doutorado. Os trabalhos contaram com a infra-estrutura e suporte institucional da Universidade

Estadual Paulista (Unesp) e Universidade Federal do Paraná (UFPR), e apoio financeiro da Petrobras, do Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). O autor é grato aos professores Sidnei Pires Rostirolla, da UFPR, e Mario Luis Assine, da UNESP, pelo incentivo, oportunidades e discussões enriquecedoras.

referências bibliográficas

ALLEN, J. R. L. **Sedimentary structures:** their character and physical basis. Amsterdam: Elsevier, 1982. v. 1. 593 p.

BOUMA, A. H. **Sedimentology of some flysch deposits:** a graphic approach to facies interpretation. Amsterdam: Elsevier, 1962. 168 p.

BRUNNER, C. A.; NORMARK, W. R.; ZUFFA, G. G.; SERRA, F. Deep-sea sedimentary record of the late Wisconsin cataclysmic floods from the Columbia River. **Geology**, Boulder, v. 27, n. 5, p. 463-466, May 1999.

EYLES, N.; EYLES, C. H.; MIAL, A. D. Lithofacies types and vertical profile models: an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences. **Sedimentology**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 393-410, June 1983.

EYLES, N.; EYLES, C. H.; FRANÇA, A. B. Glaciation and tectonics in an active intracratonic basin: the Late Paleozoic Itararé Group, Paraná Basin, Brazil. **Sedimentology**, Oxford, v. 40, n. 1, p. 1-25, Feb. 1993.

FRANÇA, A. B.; WINTER, W. R.; ASSINE, M. L. Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canal-lobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 26, p. 43-56, 1996.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (parte 1). **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

- GAMA JR., E. G.; PERINOTTO, J. A. J.; RIBEIRO, H. J. P. S.; PADULA, E. K. Contribuição ao estudo da ressedimentação no Grupo Itararé: tratos de fácies e hidrodinâmica deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 22, n.2, p. 228-236, jun. 1992.
- JOPLING, A. V.; WALKER, R. G. Morphology and origin of ripple-drift cross lamination, with examples of Pleistocene of Massachusetts. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 38, n. 4, p. 971-984, Dec. 1968.
- KLAUCKE, I.; HESSE, R. Fluvial features in the deep-sea: new insights from the glaciogenic submarine drainage system of the Northwest Atlantic Mid-Ocean Channel in the Labrador Sea. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 106, n. 3-4, p. 223-234, Nov. 1996.
- KNELLER, B.; BRANNEY, M. J. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. **Sedimentology**, Oxford, v. 42, n. 4, p. 607-616, Aug. 1995.
- LECLAIR, S. F.; ARNOTT, W. C. Parallel lamination formed by high-density turbidity currents. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 75, n. 1, p. 1-5, Jan. 2005.
- LEINZ, V. Estudos sobre a glaciação carbonífera no sul do Brasil. **Boletim DNPM/DFPM**, Rio de Janeiro, v. 21, p. 1-47, 1937.
- LOWE, D. R. Sediment gravity flows: II. depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 52, n. 1, p. 279-297, Mar. 1982.
- MANVILLE, V.; WHITE, J. D. L. Incipient granular mass flows at the base of sediment-laden floods, and the roles of flow competence and flow capacity in the deposition of stratified bouldery sands. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 155, n. 1-2, p. 157-173, Jan. 2003.
- MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. In: MIDDLETON, G. V., BOUMA, A. H. (Ed.). **Turbidites and deep-water sedimentation**. Los Angeles: SEPM, 1973. p. 1-38. (SEPM. Special Publication).
- MULDER, T.; ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. **Sedimentology**, Oxford, v. 48, n. 2, p. 269-299, Apr. 2001.
- MULDER, T.; MIGEON, S.; SAVOYE, B.; FAUGÈRES, J. C. Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? **Geo-Marine Letters**, New York, v. 21, n. 2, p. 86-93, Set. 2001.
- MULDER, T.; MIGEON, S.; SAVOYE, B.; FAUGÈRES, J. C. Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? (Reply). **Geo-Marine Letters**, New York, v. 22, n. 2, p. 112-120, July 2002.
- MULDER, T.; SYVITSKI, J. P. M.; MIGEON, S.; FAUGÈRES, J. C.; SAVOYE, B. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 20, n. 6-8, p. 861-882, June/Sep. 2003.
- MUTTI, E. **Turbidite Sandstones**. Parma: Agip and Università di Parma, 1992. 275 p.
- MUTTI, E.; STEFFENS, G. S.; PIRMEZ, C.; ORLANDO, M.; ROBERTS, D. (Ed.). Turbidites: models and problems. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 20, n. 6-8, p. 523-933, June/Sep. 2003a.
- MUTTI, E.; TINTERRI, R.; BENEVELLI, G.; DI BIASE, D.; CAVANNA, G. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 20, n. 6-8, p. 733-755, June/Sep. 2003b.
- PARSONS, J. D.; BUSH, J. W. M.; SYVITSKI, J. P. M.; Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentrations. **Sedimentology**, Oxford, v. 48, n. 2, p. 465-478, Apr. 2001.
- PETTER, A. L.; STEEL, R. J. Hyperpycnal flow variability and slope organization on an Eocene shelf margin, Central Basin, Spitsbergen. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 90, N. 10, p. 1451-1472, Oct. 2006.
- PLINK-BJÖRKLUND, P.; STEEL, R. J. Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 165, n. 1-2, p. 29-52, Mar. 2004.
- POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPEHN, K. L. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 58, n. 1, p. 47-61, July 1988.

POTTER, P. E.; FRANCA, A. B.; SPENCER, C. W.; CAPUTO, M. V. Petroleum in glacially related sandstones of Gondwana: a review. **Journal of Petroleum Geology**, Beaconsfield, v. 18, n. 4, p. 397-420, Oct. 1995.

POWELL, R. D. Glacimarine processes at grounding-line fans and their growth to ice-contact deltas. In: DOWDESWELL, J. A.; SCOURSE, J. D. (Ed.) **Glacimarine environments: processes and sediments**. London: Geological Society, 1990. p. 53-73. (Geological Society of London. Special publication, 53).

POWELL, R. D.; MOLNIA, B. F. Glacimarine sedimentary processes, facies, and morphology of the south-southeast Alaska Shelf and fjords. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 85, p. 359-390, 1989.

RUSSELL, H. A. J.; ARNOTT, R. W. C. Hydraulic-jump and hyperconcentrated-flow deposits of a glacial subaqueous fan: Oak Ridges moraine, Southern Ontario, Canada. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 73, n. 6, p. 887-905, Nov. 2003.

RUST, B. R. Mass flow deposits in a Quaternary succession near Ottawa, Canada: diagnostic criteria for subaqueous outwash. **Canadian Journal of Earth Science**, Ottawa, v. 14, p. 175-184, 1977.

SALAMUNI, R.; MARQUES FILHO, P. L.; SOBANSKI, A. C. Considerações sobre turbiditos da Formação Itararé (Carbonífero Superior), Rio Negro-PR e Mafra-SC. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, v. 15, p. 1-19, 1966.

SANTOS, P. R.; ROCHA-CAMPOS, A. C.; CANUTO, J. R. Patterns of Late Paleozoic deglaciation in the Paraná Basin, Brazil. **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology**, Amsterdam, v. 125, n. 1-4, p. 165-184, Oct. 1996.

VESELY, F. F. **Dinâmica sedimentar e arquitetura estratigráfica do Grupo Itararé (Carbonífero – Permiano) no centro-leste da Bacia do Paraná**. 2006. 226 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

VESELY, F. F.; ASSINE, M. L. Seqüências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, p. 219-230, 2004.

VESELY, F. F.; ASSINE, M. L. Deglaciation sequences in the Permo-Carboniferous Itararé Group, Paraná Basin, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 22, n. 3-4, p. 156-168, 2006.

WALKER, R. G. Generalized facies models for ressedimented conglomerates of turbidite association. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 86, p. 737-748, 1975.

ZAVALA, C.; PONCE, J. L.; ARCURI, M.; DRITTANTI, D.; FREIJE, H. ASENSIO, M. Ancient lacustrine hyperpycnites: a depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) of west-central Argentina. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 76, n. 1, p. 41-59, Jan. 2006.

webgrafia

D'ÁVILA, R. S. F.; MADEIRA, C. V.; MOREIRA, J. L. P.; SANTOS, S. F.; DIAS FILHO, D. C. Sedimentologic characterization of Santos Basin gas reservoirs: shallow and deep-marine siliciclastic depositional systems related to hyperpycnal flows (Brazil deep sed - deep-water sedimentation on the Southeast Brazilian Margin Project). In: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS ANNUAL MEETING, 2005, Calgary. **Abstracts of the...** Tulsa: AAPG, 2005. Disponível em: <<http://aapg.confex.com/aapg/cal2005/techprogram/A97106.htm>>. Acesso em: 7 dez. 2007.

expanded abstract

The Itararé Group was deposited during the Late Paleozoic glaciation in the Paraná Basin in southern Brazil. In spite of strong glacial influence on sedimentation, the stratigraphic record shows thick sandstone successions in which prospective hydrocarbon reservoirs and aquifers occur. The origin of these sandstones has been the object of discussion because facies associations seem to show characteristics of both fluvial and turbidite deposition. This problem is pertinent to petroleum geology since reservoir performance is directly related to deposition processes, facies architecture and stratigraphic relationships.

Previous models of turbidite deposition in the Itararé Group have proposed that turbidity currents were triggered by slide-induced processes (resedimentation). Considering recent published data on turbidite sedimentation related to flood-dominated depositional systems, it seems to be appropriate to provide a re-valuation of Itararé Group's sandstones based on these concepts. Data presented here suggests that the sandstones were deposited subaqueously in proglacial fans due to meltwater-derived highly concentrated flows that evolved into hyperpycnal turbidity currents. In order to discuss this depositional model, sedimentary facies and stacking patterns were analyzed based on field data from several sections exposed in the eastern basin margin.

In the studied area, Itararé Group is 650 to 1,200 meters thick and is comprised of at least five 3rd order unconformity-bounded sequences. Deposition took place mostly in a marine glaciated basin during multiple deglaciation episodes, as indicated by marine fossiliferous horizons that occur interbedded within the glaciogenic strata. Such stratigraphic setting is observed in the outcrop belt and can be also identified in the subsurface by correlation with well logs located hundreds of kilometers westward. Facies relationships show that the unconformities were produced by direct glacier abrasion and/or meltwater erosion during epochs of maximum ice advance through the basin.

Thick sand-rich successions occur in the lower half of each sequence, which define fining-upward retrogradational cycles representing deglaciation facies sequences. These successions abruptly overlie subglacial tillites or rest directly on sequence boundaries. The uppermost section passes upward to a mud-rich interval comprising rain-out and debris-

flow diamictites, rhythmites, dropstone-bearing laminated mudstones and shale. Dropstone-free shale horizons record general flooding of the basin due to strong deglaciation.

Sandstones and conglomerates may occur as amalgamated bodies as well as interbedded within fine-grained facies. Detailed analysis allows the identification of eleven facies types ranging from boulder-rich conglomerates to fine-grained sandstones. Polymictic chaotic (disorganized), massive and graded conglomerates (facies Gc, Gm and Gg) occur as erosive-based bodies, commonly filling scours or small-scale channels. These are interpreted as hyperconcentrated flow deposits formed due to high energy meltwater jet efflux in a proximal subaqueous outwash setting. Angular boulders, often faceted and striated, testify glacial heritage. A-axis clast imbrication may occur, which are typical of density flows were clasts are transported in suspension due to grain-by-grain interaction.

Planar and trough cross-bedded sandstones and conglomerates (facies Sp/St and Gp/Gt) occur as stacked sets and cosets with lenticular, wedge-shaped or channelized geometries. These facies were deposited as bed-load by a long-lived bottom current in a subaqueous meltwater delivered drainage system. Bedding patterns and architecture are similar to fluvial systems, but the association with hyperconcentrated-flow sediments corroborates the subaqueous origin. Paleocurrent data indicates an average meltwater flow towards northwest, approximately parallel to the main ice flow direction in the eastern part of the basin.

Parallel-laminated and low-angle cross-bedded sandstones (facies Sh/SI) are coarse to fine-grained and define laterally continuous amalgamated sheet-like bodies. These are interpreted as upper stage plane bed deposition probably from unconfined concentrated flows. Facies SI records the development of low-amplitude dunes in some flow stages, possibly due to transition from upper to lower stage settings. Unstratified sandstones (facies Sm, Sg and Si) may occur in close association with facies Sh/SI, and could be the result of deposition from a flow with higher fall-out rates. Thick beds of laminated and massive sandstones indicate relative flow steadiness, in order to promote continuous aggradation of the bed. Alternation between parallel and low angle bedding suggests fluctuations in flow velocity and are strong evidence of waxing to waning flows. Purely waxing or waning flows are recorded by individual beds of inverse and normal graded sandstones respectively.

Medium to fine-grained sandstones showing large to small-scale climbing ripples (facies Sr) occur frequently in the Itararé Group, mainly in the upper portions of the sand-rich successions. Types A and B, and sinusoidal lamination are present. Beds are a few centimeters to one meter thick, occasionally reaching five meters without any grain-size variation. Facies Sr is interpreted as the result of traction plus fall-out from quasi-steady turbulent flows in which the stacking of ripples was possible due to long-lived bed aggradation. Vertical changes in the angle of climb and consequently type of lamination within an individual bed suggest fluctuations in flow discharges and waxing to waning flow behavior. Rippled sandstones within turbidite beds are considered by several authors as a typical feature of hyperpycnites.

The facies association described records deposition in a proglacial subaqueous setting during ice retreat. The linkage between hyperconcentrated gravelly flows and strong bed-load dominated currents is a common characteristic of subaqueous outwash fans, in which sedimentation is controlled by the discharge of meltwater directly into a water body. In the Itararé Group, these meltwater-fed flows moved northward on the basin floor generating hyperpycnal turbidity currents. Fluctuations of meltwater discharge in the subaqueous outwash system resulted in downflow in the alternation between waxing and waning flow beds verified in turbidite lobes. Boulder-rich chaotic conglomerates in the ice-contact setting are seen as a possible residual deposit of outburst flows. These eventual and catastrophic flows may have delivered high volumes of sand to the basin, forming flood-related turbiditic systems.

The presented data suggests that the main trigger mechanism for turbidity currents in the Itararé Group was glaciogenic hyperpycnal flows. Resedimentation due to slide-induced processes have also been recorded, but its role in the deposition of the analyzed sandstones was subordinate. The proposed depositional model was based on the close spatial relationship between meltwater (outwash) deposits and turbidites, as well as some facies characteristics that support an origin of long-lived hyperpycnal turbidity currents. Itararé Group's sandstones provide a good opportunity to study ancient flood-dominated depositional systems. Moreover, the unit can be considered a field analogue for the study of hyperpycnite reservoirs recently reported in offshore petroleum basins, including the eastern Brazilian margin.

autor principal



Fernando Farias Vesely

E&P/Exploração
Gerência de Estratigrafia

e-mail: vesely@petrobras.br

Fernando Farias Vesely graduou-se em Geologia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 1999. Possui Mestrado pela Universidade Estadual Paulista (2001) e Doutorado pela UFPR (2006), ambos com foco na sucessão carbonífero-permiana da Bacia do Paraná. Entre 2002 e 2006 participou, junto à UFPR, de vários projetos em parceria com a Petrobras, enfatizando estratigrafia, evolução tectônica e geologia de reservatório de bacias paleozóicas gasíferas da América do Sul. Foi admitido na Petrobras em 2006, atuando nas áreas de estratigrafia e sedimentologia aplicadas à exploração.

