

Geometria da porção proximal do sistema deposicional turbidítico moderno da Formação Carapebus, Bacia de Campos; modelo para heterogeneidades de reservatório

Geometry of the proximal part of the modern turbidite depositional system of the Carapebus Formation, Campos Basin: a model for reservoir heterogeneities

Luís Cláudio Ribeiro Machado | Renato Oscar Kowmann | Waldemar de Almeida Jr. | Celso Yoshihito Murakami | Simone Schreiner | Dennis James Miller | Pedro Orlando Vasconcelos Piauilino

resumo

O sistema deposicional de águas profundas do Cenozóico da Bacia de Campos é melhor compreendido no estudo do atual fundo marinho. Esse ambiente acolhe o sistema turbidítico da Formação Carapebus, onde se armazenam mais de 90% do petróleo brasileiro. Examinaram-se *side-scan sonar*, batimetria de varredura, *Sub-Bottom Profiler*, testemunhos a pistão e sísmica 3D, em um conjunto de dados que cobre quase a totalidade da bacia.

Depois de sair do *Canyon* Almirante Câmara, os turbiditos erodem o avental de detritos lamosos que envolve o talude continental (*slope apron*) e começam a depositar espessas camadas de areia limpa em uma grande calha, entre as batimetrias de 1 800 m e 3 000 m. A calha tem 3,5 km de largura, 150 m de profundidade e 150 km de comprimento. Ela é formada pelo encadeamento de mini-bacias criadas pela tectônica salífera.

Em alguns lugares, o fundo do mar é plano o suficiente para desenvolver um lobo deposicional, em todos os aspectos igual aos melhores reservatórios da bacia. Observa-se que: 1) as areias arcoseanas dos

turbiditos são trazidas pelo rio, trafegam pela plataforma continental, pelo vale inciso e pelo *Canyon* até chegar ao sistema turbidítico – elas não são originadas pela evolução de um *debris flow* de colapso do talude; 2) um largo *debris apron* de diamictos lamosos bordeja o talude continental e representa um gigantesco volume de sedimentos da bacia; 3) há turbiditos mas não há leques submarinos – a geometria do Carapebus é uma calha alongada, e existe também um lobo; 4) as camadas turbidíticas, tanto no lobo quanto na calha, não são depositadas em um único episódio. Elas são a soma de uma miríade de eventos nos quais pequenos canais, que trazem os turbiditos, avulsam e se entrelaçam ao longo de toda a área deposicional até construir, amalgamados, uma única camada arenosa ao longo de longo tempo geológico; 5) é proposto um modelo deposicional hierárquico para bulbos, lobos e leques submarinos; 6) o sistema estudado é essencialmente arenoso, não formando *channel-levees* clássicos (canal de leque).

(originais recebidos em 20.07.2004)

Palavras-chave: turbidito | Carapebus | geologia marinha | reservatório | exploração

abstract

The deep-water marine sedimentary environment of the Cenozoic of the Campos Basin is examined at the modern seafloor, where it can be better understood. This environment is responsible for the genesis of the turbidite systems of the Carapebus Formation, the reservoirs that hold more than 90% of Brazil's petroleum reserves. The study was developed with the records of regional side-scan sonar, swath bathymetry, sub-bottom profiler data, standard multichannel 3D seismic surveys and piston cores covering almost the entire basin. After leaving the Almirante Câmara Canyon, the turbiditic flows erode the muddy debris apron surrounding the continental slope and begin to deposit thick layers of clean sand into a big trough in water depths of 1800m to 3000m. The trough is 3.5 km wide, 150 m deep, 150 km long, and is formed by a chain of salt withdrawal mini-basins. In some places the seafloor is flat enough to develop today a depositional lobe, in all aspects analogous to the best, geologically ancient petroleum reservoirs in the basin. Aspects of the system: 1) the arcosean sands are brought by the river, cross the shelf, the incised valley, the canyon, and deposit as turbidites - they do not originate from a collapse of the continental slope; 2) a wide muddy debris apron surrounds the continental slope (slope apron), and represents a huge volume of sediment in the Campos Basin ; 3) the turbidites do not develop a submarine fan, but are deposited in an elongated trough formed by salt tectonics; 4) the turbidite beds, both in the lobe or in the trough, are not deposited during a single episode, but in multiple events over significant geologic time in which small channels which brought the turbidites avulse and meander along the entire depositional area, building a single amalgamated bed; 5) classic channel-levees are not present because this system comprises a sandy braidplain and the levees are as sandy as the channel; 6) a hierarchical depositional model for bulb, lobe and submarine fan is proposed.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: turbidite | Carapebus | marine geology | reservoir | exploration

introdução

Durante o levantamento de *side-scan sonar*, ecobatimetria de varredura e sísmica rasa de 3,5 kHz (*SBP - Sub-Bottom Profiler ou Chirp*) do Projeto 11 do PROCAP 2000 (Piauilino *et al.* 1995) foi imageado um sistema turbidítico originário da desembocadura do Canyon Almirante Câmara. O sistema se desenvolve em águas ultraprofundas (1 800 m – 3 000 m), assentando-se sobre o Platô de São Paulo, adjacente ao talude da Bacia de Campos. O Programa de Capacitação Tecnológica PROCAP 2000 também amostrou a área insonificada obtendo 44 testemunhos a pistão (*kullenbergs*; identificados pela sigla #CNC), caracterizando definitivamente o sistema moderno como parte da Formação Carapebus (Machado *et al.* 1997 e 1998b).

Apresenta-se, aqui, um panorama deste sistema turbidítico moderno em que são descritos e quantificados elementos geométricos de seus canais nas suas porções mais proximais, entre as coordenadas UTM 410.000 / 455.000 m E e 7.600.000 / 7.575.000 m N, e que já foi objeto de estudo detalhado (Machado *et al.* 1998a).

Como modelo deposicional exploratório e explotatório para os reservatórios turbidíticos da Bacia de Campos, a descrição deste sistema recente apresenta vantagem por ter se desenvolvido na própria bacia, em condições semelhantes a alguns níveis da Formação Carapebus antiga. Esta formação abriga as maiores reservas de petróleo do Brasil e o sistema moderno é, de fato, a continuação de sua própria deposição.

A observação *in loco* da formação desta rocha-reservatório, no que pode ser considerado um “laboratório natural”, permite um grau de detalhe não encontrado em nenhuma outra ferramenta utilizada na indústria do petróleo.

A integração do mapa faciológico do fundo marinho com a carta cronoestratigráfica da Bacia de Campos exibida na figura 1 demonstra que atualmente se encontram em deposição a Formação Emborê clástica (areias/arenitos siliciclásticos e lamas/folhelhos na plataforma continen-

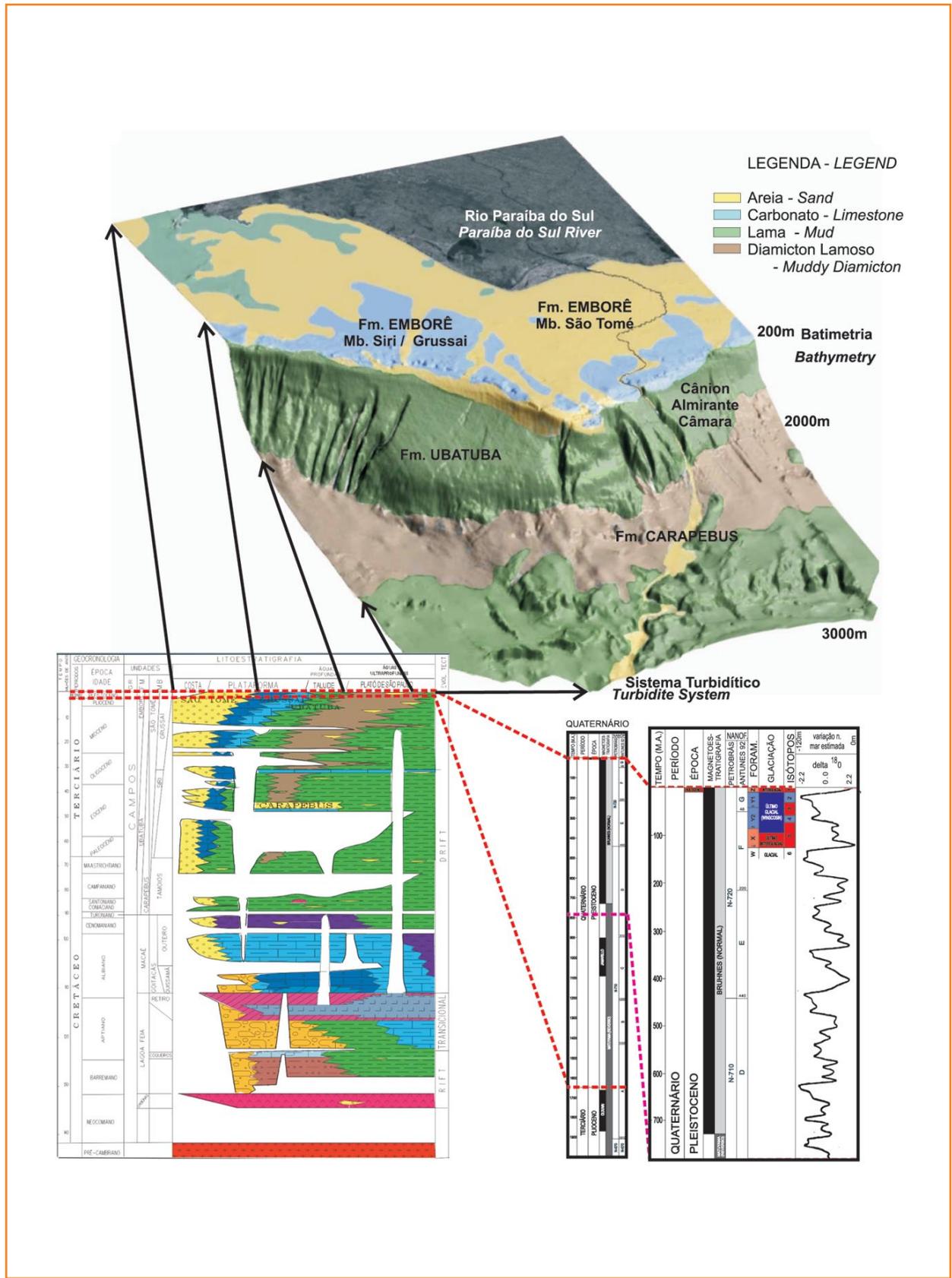


Figura 1

Empilhamento e distribuição espacial das fácies sedimentares superficiais da Bacia de Campos. Notar o sistema turbidítico na desembocadura do Canyon Almirante Câmara, o avental de diamictons lamosos envolvendo o pé do talude continental (em marrom na carta cronoestratigráfica modificada de Rangel et al. 1994) e a alta frequência de variações do nível do mar no Quaternário.

Figure 1

Stacking and spatial distribution of surficial sedimentary facies in the Campos Basin. Note the turbidite system at the mouth of the Almirante Câmara Canyon, the apron of muddy diamictites at the foot of the continental slope (in brown at the chronostratigraphic chart modified from Rangel et al. 1994), and the high frequency sealevel changes in the Quaternary.

tal interna e média), a Formação Emborê/membros Siri e Grussaí (carbonatos na Plataforma Continental externa), a Formação Ubatuba (lamas/folhelhos do Talude e Platô de São Paulo) e a Formação Carapebus (areias/arenitos e diamictons/diamictitos do Platô de São Paulo) do Grupo Campos.

Na carta cronoestratigráfica (Rangel *et al.* 1994 – com sugestões de M.D. Rangel) foram incluídos os diamictitos (diamictons) lamosos do avental de detritos (*debris apron*), que envolvem o talude continental (*slope apron*) da Bacia de Campos e das outras bacias *offshore* do Brasil (Machado, 2001). Estes diamictitos lamosos normalmente são reconhecidos na Petrobras como Formação Ubatuba (folhelhos) pois, em praticamente todas as ferramentas utilizadas (calha, perfil, sísmica), confundem-se com os mesmos, que são sua rocha-fonte. Os diamictitos são consequência do desnível do talude continental que se supõe existir pelo menos desde o início do Terciário.

Um fato a se destacar, com relação aos depocentros (isópacas mais espessas) da Formação Carapebus, é o seu deslocamento para *offshore*, intensificado durante o Mioceno superior. O depocentro bacial foi assoreado por uma intensa progradação lamosa (Souza-Cruz, 1995), empilhando os sedimentos da atual plataforma continental externa e talude no local. Não tendo mais como se depositar nesta região, a Formação Carapebus migrou sua deposição para águas mais profundas, formando aí o sistema turbidítico moderno. Assim, esta formação, de certa maneira, rejuvenesceu, voltando a encontrar no Platô de São Paulo uma situação fisiográfica semelhante à que ocupava desde o Cretáceo até o Eoceno médio, assentando seus turbiditos sobre uma topografia fortemente controlada pelo sal, bordejada por falhas lítricas e com pouca espessura de Terciário abaixo de si.

Designou-se, inicialmente, estes sedimentos como pleistocênicos (Machado *et al.* 1997), em vista dos grandes rebaixamentos do nível do mar

que caracterizam essa época (ver curva de Imbrie *et al.* 1984 na figura 1) e que estão conceitualmente associados à formação de turbiditos (Mutti, 1985; Flood e Damuth, 1987). A amostragem destas areias nos testemunhos #CNC-03, #CNC-24, #CNC-28, #CNC-29 e ainda nos 18 testemunhos da campanha #LAC, (interpretação nossa a partir de Silveira *et al.* 2001a e Abreu *et al.* 2004), mostrou abundância de espessas camadas de turbidito intraclástico, sendo que alguns deles são de idade holocênica, indicando atividade atual do sistema. Essas camadas poderiam ser descritas como “turbiditos de alta densidade” de Lowe (1982) ou, simplesmente, areias limpas, intraclásticas, de águas profundas, em camadas espessas (30 a 300 cm).

A origem fluvial por enxurrada em fluxos hiperpicnais, com processo de transporte e deposição por *grain flow* subaquoso (Middleton e Hampton, 1973) composto por choque-degrãos, arrasto, tração e saltação subaquosos (alguns diriam *debris-flow* arenoso), é uma hipótese plausível. Sobretudo, porque há indicadores (Machado *et al.* 2001 e 2002) que o Rio Paraíba do Sul continua fisicamente no vale inciso, encaixando-se no *Canyon* Almirante Câmara e conectando-se ao sistema turbidítico. De qualquer modo, continuar-se-á doravante a se referir a estas areias como turbiditos de alta densidade.

Fora da calha turbidítica, na maior parte da bacia, a deposição atual (Holoceno) consiste numa delgada (30 cm) camada de vasa de nanofósseis e foraminíferos, correspondente à superfície de inundação máxima do interglacial atual (Kowsmann *et al.* 2002). Esta vasa é mole e responde de modo transparente a todas as ferramentas utilizadas, além de ser facilmente ultrapassada pelos testemunhos a pistão, que atingem profundidades de seis metros. Numa comparação com o registro antigo, a vasa holocênica guarda semelhança com as delgadas camadas de marga ou calcilutito que ocorrem intercaladas nos pacotes de turbidito (Formação Carapebus) na Bacia de Campos.

panorama fisiográfico e geológico do ambiente deposicional

Como mostra-se na figura 1, o ambiente do sistema turbidítico, como um todo, é composto por três elementos fisiográficos maiores, cada qual podendo ser associado a um tipo predominante de sedimento:

a) talude continental lamoso com seus *canyons* imaturos (lama);

b) calha deposicional turbidítica (areia);
 c) província de grandes depósitos de movimentos de massa (diamictos). Vizinha ao talude, ela pode ser descrita como um *debris apron* (aventil de detritos), ou melhor, um *slope apron*. É formada pela amalgamação dos depósitos de diamictos, que individualmente têm a forma de grandes línguas (fig. 2) e que foram mapeadas pelo sonar.

Ao contrário da maioria dos *canyons* da Bacia de Campos, que são imaturos, o Almirante Câmara endenta a plataforma continental e assim tem condições de drenar areia para águas profundas (como nos modelos de Carminatti e

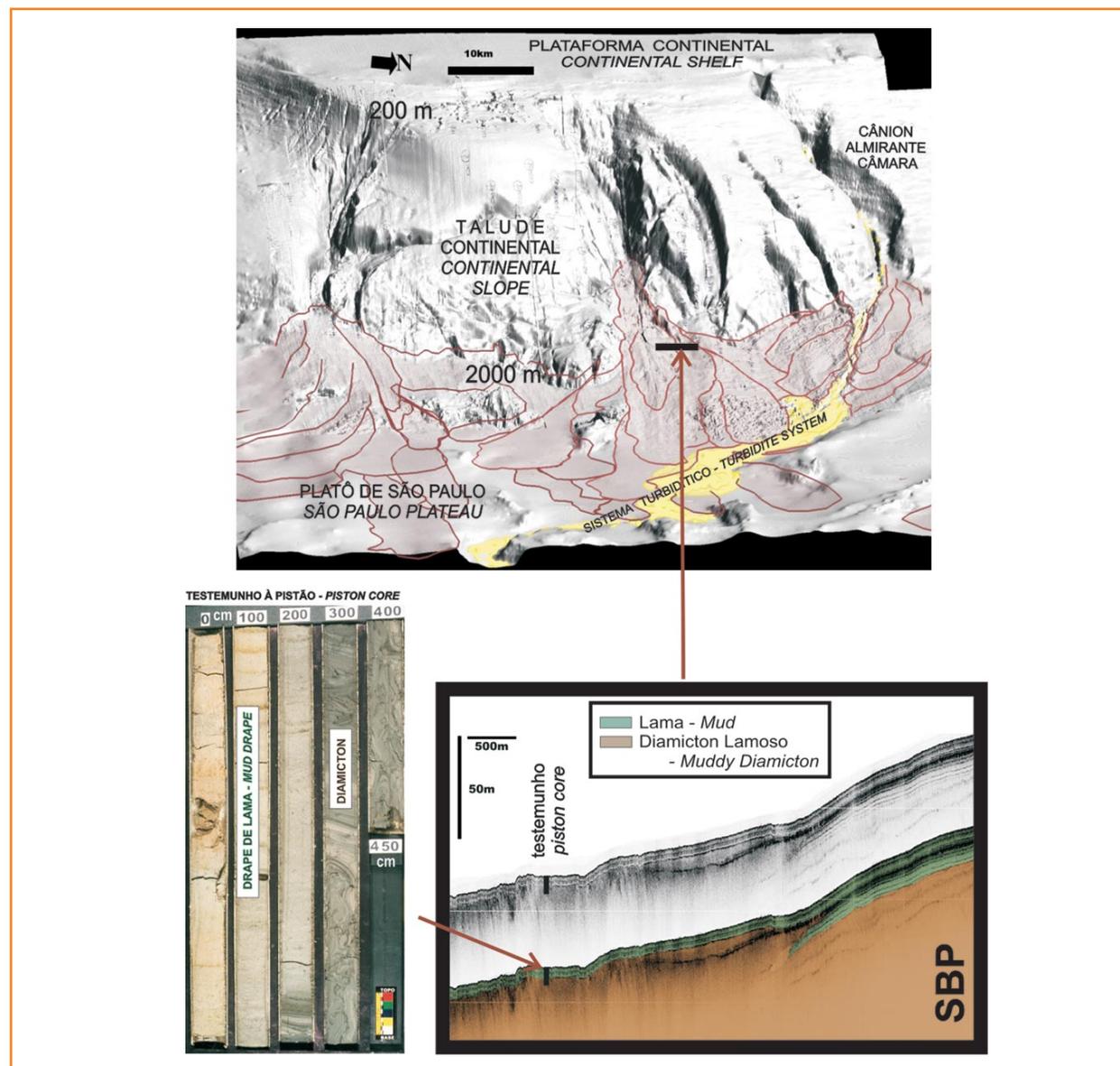


Figura 2

Debris Apron - línguas de diamictos lamosos (em marrom) formadas pela escavação de *canyons* e colapso do talude. O testemunho e registro de SBP mostram que os diamictos estão recobertos por cerca de 3 m de sedimentos hemipelágicos há pelo menos 50 000 anos. Em amarelo, as areias turbidíticas.

Figure 2

Debris Apron- Muddy diamicton tongues (in brown) deposited during canyon excavation and slope collapse. Piston core and subbottom profiler record indicate that diamictos are covered by a 3 m thick hemipelagic drape belonging to the last 50 000 years. In yellow, turbidite sands.

Scarton, 1991 e de Peres, 1993), propiciando a formação do sistema turbidítico a partir de sua desembocadura. Na Bacia de Campos, os *canyons* imaturos são muito abundantes e não têm sistemas turbidíticos associados. A análise do sonar, SBP e testemunhos a pistão dos principais *canyons* desta bacia, à exceção talvez do São Tomé (Viana *et al.* 2003), mostra gigantescos depósitos de movimento de massa nas suas desembocaduras e nenhum indício de turbiditos.

A norte do Sistema do Almirante Câmara são observados no fundo marinho vestígios de um sistema turbidítico igualmente vigoroso, mas já em várias partes recoberto por lama, inclusive em seu *canyon* alimentador, que se mostra em parte cicatrizado nos dados disponíveis. Este sistema abandonado foi descrito pela primeira vez por Garfield *et al.* 2000 e denominado por Viana *et al.* 2001 como Sistema Turbidítico do Itabapoana. A análise do vale inciso do Rio Paraíba do Sul (Machado *et al.* 2001 e 2002) indica que este rio foi alimentador do Sistema Turbidítico do Itabapoana, alternando, por avulsão do seu vale inciso, o encaixe dos *canyons* Almirante Câmara, Itabapoana e São Tomé.

Uma vista panorâmica da bacia oceânica adjacente à margem continental brasileira na Bacia de Campos e vizinhanças (fig. 3) mostra uma grande rede de drenagem coalescente (Castro, 1992) disposta ao longo do talude continental, Platô de São Paulo e Elevação Continental (*rise*) em águas ultraprofundas. É uma drenagem tributária semelhante à do NAMOC (Hesse e Klauke, 1995). A combinação da avulsão dos vales incisos, o encaixe nos diferentes *canyons* e a alternância das calhas ativas dos sistemas turbidíticos que são tributários compõem uma megadrenagem alveolar (Machado *et al.* 2001; 2002)

O sistema turbidítico do *Canyon* Almirante Câmara aqui descrito é uma pequena parte integrante desta rede de drenagem, mais proximal, desembocando em uma calha tributária do Canal Carioca, indo além da lâmina d'água de 4 000 m. Todas as calhas, exceto a do *Canyon* Almirante Câmara, estão abandonadas, mantendo seu relevo no fundo do mar graças à sedimentação exclusiva de vasa (*starved* e isópaca). O sistema turbidítico

ativo apresenta taxas de sedimentação anormalmente altas, disparando a tectônica salífera por carga diferencial e reforçando seu relevo. Próximo ao talude continental, entretanto, as calhas são colmatadas pelo *debris apron* e desaparecem.

Só na porção insonificada pelo PROCAP 2000, limitada pela isóbata de 3 000 m, o sistema turbidítico ocupa uma área de 500 km². Ele atravessa o Platô distal onde o topo dos evaporitos é mais raso (Demercian *et al.* 1993) sendo fortemente condicionado pela halocinese.

O mapa das fácies sedimentares do fundo do mar (fig. 4) foi confeccionado a partir de sonar/SBP, milhares de amostras de fundo e centenas de testemunhos a pistão e desconsiderou o *drape* de vasa holocênica / pleistocênica, com mais de 1 m de espessura, que cobre de modo monótono praticamente todo o fundo do mar da bacia em águas profundas.

Por desconsiderar a vasa holocênica, na realidade o mapa de fácies é um mapa do subfundo marinho. Olhando-se a distribuição das fácies neste mapa, observa-se que tanto a plataforma continental como o sistema turbidítico exibem areia arcoseana limpa (com 3% de bioclastos) indicando relação genética de proveniência. Diamictito, ou seu equivalente inconsolidado (diamicton) é, segundo Flint *et al.* (1960), um depósito sedimentar terrígeno mal selecionado que contém uma vasta gama de tamanho de partículas. O termo pode envolver orto e paraconglomerados. Os diamictons do avental de detritos são lamosos, constituídos de clastos e matriz lamosos, ou seja, a mesma composição do talude continental do qual é oriundo.

Nos diamictons lamosos da Bacia de Campos, o transporte de massa por dezenas de quilômetros por fluxo de detritos (e outros processos mais lentos) é insuficiente para fazer o fluxo evoluir a turbulento, onde haveria a separação da fração lamosa da arenosa formando o turbidito. Ainda que houvesse essa evolução, o volume de areia nas lamas do talude é tão insignificante que as camadas de turbidito seriam muito mal desenvolvidas.

Tanto no caso das areias quanto dos diamictons, nota-se que a composição da área-fonte e do depósito é a mesma, sugerindo que o processo de transporte para águas profundas, por várias

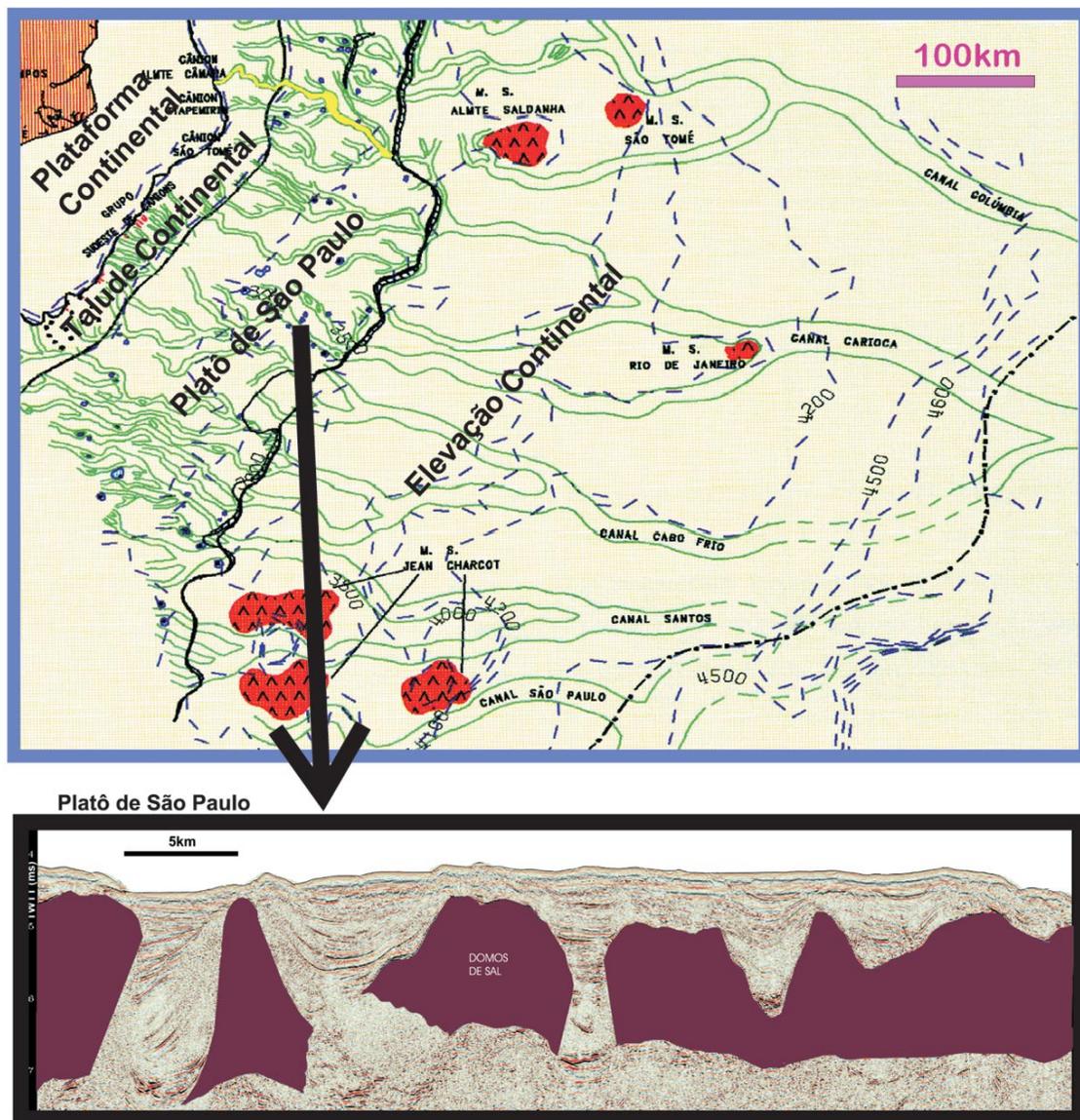


Figura 3

Drenagem da margem continental sudeste brasileira (fig. de Castro, 1992) mostrando um padrão coalescente em direção offshore. Em amarelo, a calha de sedimentos turbidíticos provenientes do Canyon Almirante Câmara, o único em atividade. No Platô de São Paulo, a calha, com taxa de sedimentação diferenciada, dispara a halocinese, com a formação de domos de sal e mini-bacias adjacentes (baseado em Demercian et al. 1993).

Figure 3

Submarine drainage of the SE continental margin of Brazil (figure from Castro, 1992) displaying a coalescent pattern in the offshore direction. In yellow, the trough of turbiditic sediments at the mouth of the Almirante Câmara Canyon, the only one in activity. In the São Paulo Plateau, differential loading in the trough triggers salt movement with the development of salt domes and adjacent mini-basins.

dezenas de quilômetros, não desempenha papel relevante para a mudança na composição petrográfica. Enquanto que os movimentos de massa do talude continental produzem o avental de diamictos lamosos, os turbiditos são transportados a partir do Rio Paraíba do Sul sucessivamente pelo vale inciso, o canyon e finalmente a calha e lobos deposicionais.

Durante o Holoceno as areias advêm em parte do retrabalhamento das areias relictas da borda

da plataforma pela ação de correntes de fundo como mostram Viana e Faugères (1998).

Neste estudo, não foram identificados depósitos de debris flows que guardassem relação genética com turbiditos, o que leva a entender que são processos independentes: provindos de fontes diferentes, ocorrem no mesmo ambiente deposicional de águas profundas e apenas competem entre si por espaço, um erodindo o outro.

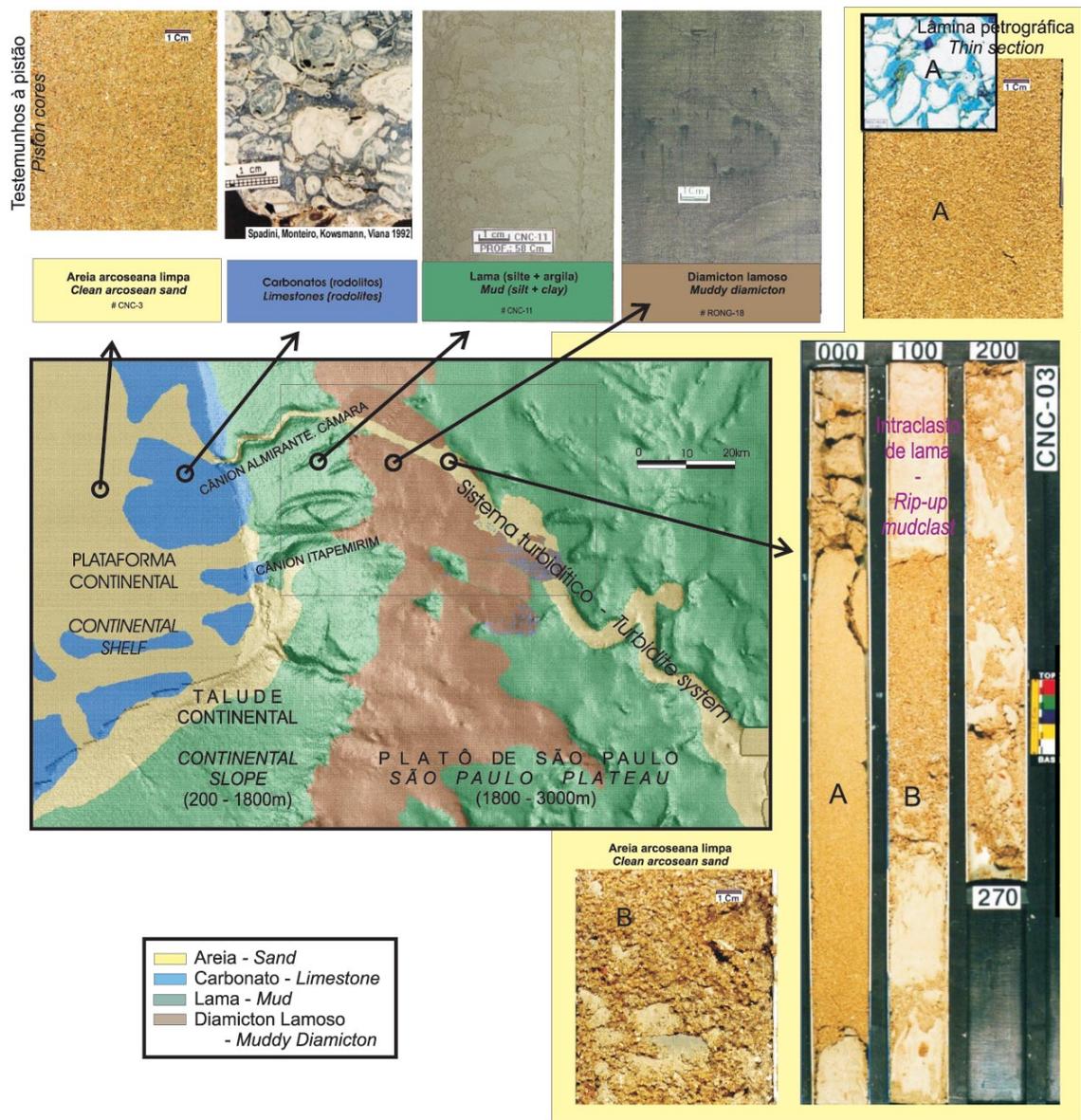


Figura 4 - Fácies sedimentares do fundo do mar da Bacia de Campos. A areia de águas profundas, mostrada no testemunho completo à direita, consiste em uma única camada de turbidite de alta densidade (Lowe, 1982) contendo intraclastos lamosos de idade Holoceno. No mapa, as fácies (cores) se superpõem à fisiografia, evidenciada pela batimetria sombreada.

Figure 4 - Facies of surficial sediments of the Campos Basin. Deep-water sands shown in full core on the right, consist of a single bed of high density turbidite (c.f. Lowe, 1982) containing mud intraclasts of Holocene age. In map, facies (in color) is superimposed on the physiography derived from shaded bathymetry.

o Canyon Almirante Câmara

Em planta, o *Canyon Almirante Câmara* tem 28 km de comprimento, 4 km de largura, 340 m de relevo e possui um traçado geral característico em zigue-zague, indicando forte condicionamento estrutural. O seu profundo entalhamento, com perfil em “V”, a presença de um canal sinuoso no seu talvegue e a pronunciada endentação da cabeceira na plataforma continental o diferencia dos outros *canyons* da Bacia de Campos e ratifica seu *status* de *canyon* maduro (no conceito de Farre *et al.* 1983).

Como todo *canyon* maduro, inicialmente o Almirante Câmara desenvolveu uma típica seção em “U” da fase juvenil, mediante progressivos colapsos de sua cabeceira talude acima, que resultaram em movimentos de massa depositados predominantemente no Platô de São Paulo.

Quando o *canyon* ingressou na fase madura, endentando a plataforma continental e capturando o Rio Paraíba do Sul, a corrente do *underflow*

fluvial erodiu uma profunda valeta sinuosa dentro do assoalho lamoso do perfil em “U” da fase juvenil, como mostrado na figura 5.

Tal situação é indicadora de sua atuação como zona de passagem de sedimentos da plataforma para águas profundas. A rigor, há dois agentes de escavação de *canyon*, um erodindo dentro do entalhamento do outro. É pela valeta em “V” da fase madura que são transferidas as areias para águas profundas. Deste modo, não se pode esperar que o volume gigantesco de areia do lobo deposicional (mostrado mais adiante) passe de uma única vez por este estreito desfiladeiro de 300 m de largura. É mais convincente imaginar que as areias atravessem, aos poucos, pois a passagem é restrita. Enfim, a geometria do *Canyon Almirante Câmara* é fator indicativo que o lobo deposicional turbidítico não se formou de uma só vez, mas provavelmente em uma miríade de eventos, durante um longo tempo geológico.

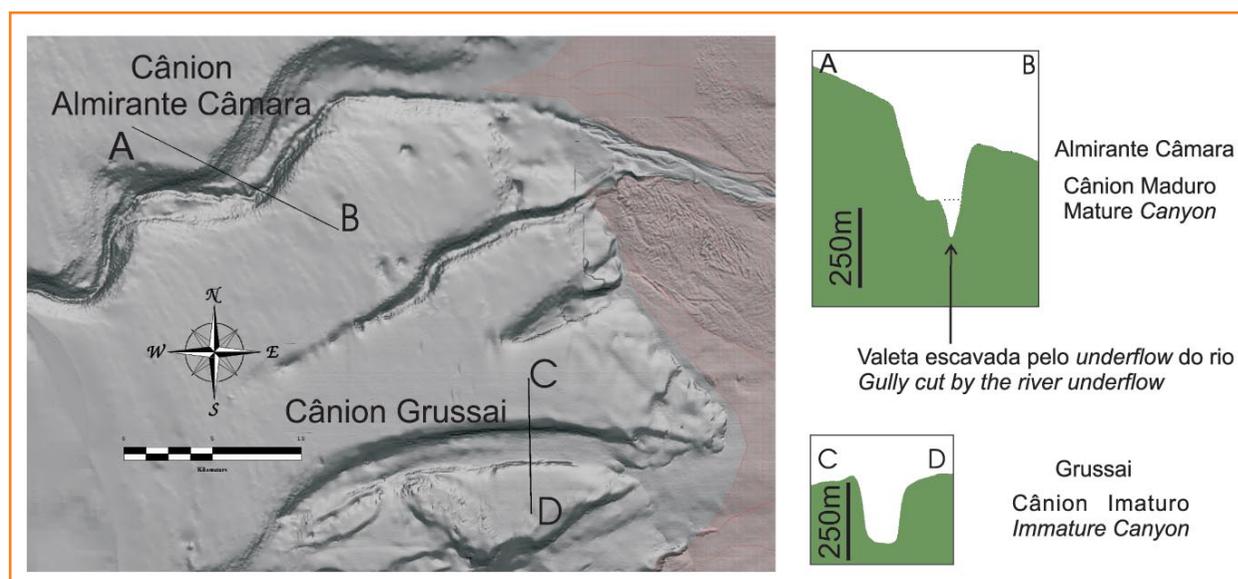


Figura 5 - Seções transversais de um *canyon* maduro (Almirante Câmara) e um imaturo (Grussai). O entalhe em “U”, característico da fase juvenil, é causado pelo sucessivo colapso das cabeceiras do *canyon* e resulta na formação de línguas de diamicton a jusante. O entalhe da valeta em “V” meandrante, superposta ao perfil em “U” na seção A-B, se deve a passagens de areias erodindo lama, na fase madura do *canyon*, em que ele endenta a plataforma continental e se conecta ao rio Paraíba do Sul, através de um vale inciso. A passagem dos grandes volumes de areias turbidíticas das águas profundas pela estreita valeta requer uma infinidade de eventos.

Figure 5 - Sections across a mature canyon (Almirante Câmara) and an immature one (Grussai). The U-shaped cross-section, characteristic of the juvenile phase is caused by repeated collapse of the canyon headwalls and results in the accumulation of diamictite tongues at the mouth. The meandering V-shaped cross-section, superimposed on the U profile in section A-B, is formed by repeated flows of sand carving the muddy substrate, during the mature phase of the canyon. During this phase, the canyon breaches the shelfbreak and is connected to the Paraíba do Sul river via an incised valley. The passage of large volumes of the deep-water turbidite sands through the narrow V-shaped valley requires a multitude of events.

os depósitos de movimento de massa do *debris apron*

Os diamictons e diamictitos lamosos respondem de forma semelhante às lamias na maioria das ferramentas de prospecção indireta utilizadas pela Petrobras. Acredita-se que a ocorrência destes litotipos seja largamente subestimada no registro sedimentar antigo e, dada a distribuição areal das línguas vistas em sonar, talvez se constituam nos sedimentos mais abundantes na Bacia de Campos, representando cerca de 1/5 do volume sedimentar total do Terciário e Quaternário (figs. 1 e 2). Tais depósitos, oriundos de movimentos de massa, formam grandes línguas que medem cerca de 20 x 10 km, podendo chegar a mais de 50 km de comprimento. Testemunhos coletados nestes depósitos (RON-G-15, 16, 18, entre outros) mostram invariavelmente diamictons com clastos e matriz lamosos, refletindo a composição do talude de onde provém.

Sua origem está ligada a desabamentos no talude, especialmente aqueles que formaram grandes *canyons* imaturos, tais como Itapemirim e Grussaí, que estão próximos ao lobo e à calha deposicional. Embora atinjam grandes distâncias, os diamictitos lamosos mostram deslocamentos proporcionalmente curtos com relação às suas dimensões (não mais que duas vezes o tamanho dos corpos, estando a maioria deles ainda conectados à cicatriz de remoção).

A observação do sonar indica que os movimentos de massa ocasionalmente invadem parte da calha turbidítica pelo seu flanco oeste, disputando espaço com os turbiditos arenosos. A repetição destes eventos no tempo geológico resulta num contato interdigitado entre os movimentos de massa e a calha.

Na análise do conjunto, destaca-se um depósito de movimento de massa de maior magnitude, que invadiu um trecho central da calha entulhando-a completamente. Este deslizamento parece ter-se originado na cabeceira do *Canyon* Itapemirim, pelo colapso de parte da plataforma continental externa carbonática (fig. 4). Um gigantesco anfiteatro

na cabeceira do *canyon* denuncia a presença de uma cicatriz de escorregamento, área-fonte do movimento de massa. Nas imagens de sonar das porções distais deste depósito de movimento de massa observam-se numerosos alvos refletivos de contornos nítidos e relevo acidentado em SBP, que são interpretados como olistostromas.

Considerando o aspecto evolução do sistema turbidítico, tal entulhamento interrompeu o caminho das correntes de turbidez que transitavam pela calha (GGG Consultoria, 1996). O processo citado resultou no represamento das areias, com intensa deposição e colmatação local. Após a colmatação, as correntes de turbidez extravasaram sobre o Platô de São Paulo, fora da calha, formando uma larga área plana (a mais plana de todo o Platô de São Paulo na Bacia de Campos), permitindo assim o desenvolvimento do lobo.

o sistema turbidítico

A calha turbidítica é uma depressão de 80 m a 200 m de profundidade no Platô de São Paulo, tendo 3,5 km de largura, e seu comprimento na área estudada é de 150 km (fig. 4), prolongando-se para além das águas ultraprofundas. De acordo com a sismofácies de SBP (Kowsmann *et al.* 1996), padrão sonográfico e testemunhos a pistão, a calha é a parte arenosa do sistema turbidítico, contendo em reduzida proporção diamictons e lamias. Esta feição inicia-se na desembocadura do *Canyon* Almirante Câmara no Platô de São Paulo, com direção geral inicial Leste-Oeste. Logo a seguir, a calha desvia para SE, ao encontrar uma muralha sedimentar de direção NE-SE, resultante da tectônica salífera; daí em diante é controlada por esse alinhamento. Dada a interação da dinâmica tectônica *versus* sedimentação, sugere-se que a calha é originada em parte pelo próprio peso dos depósitos turbidíticos ao afundarem no sal, intensificando o efeito da tectônica salífera e criando seu próprio espaço deposicional (Demercian

et al. 1993). Na área estudada, entre as batimetrias de 1 800 m e 3 000 m, a calha deposicional turbidítica pode ser subdividida em calha proximal, lobo e calha distal.

a calha proximal

A calha proximal é delimitada de um lado pelos grandes depósitos de movimentos de massa e de outro por uma escarpa retilínea (muralha elevada pelo sal) com mais de 50 m de relevo. A análise preliminar de seções sísmicas convencionais 2D, ortogonais à calha, sugere o empilhamento de várias calhas ao longo do tempo, com ligeiro deslocamento lateral, separadas por discordâncias. A calha mais jovem tem preenchimento sedimentar de cerca de uma centena de metros até sua discordância basal.

Outro efeito da interação tectônica na sedimentação pode ser observado no interior da calha turbidítica. No fundo marinho, a calha sedimentar é internamente recortada por escarpas de falha longitudinais recentes, resultando numa fisiografia de patamares, falésias e grábens com mais de dez metros de relevo, que evidentemente afetam a sedimentação.

a interpretação do lobo da Formação Carapebus moderna

Na análise dos registros de sonar do PROCAP 2000, o lobo deposicional é a feição mais notável do sistema, pois guarda grande semelhança com lobos deposicionais de outros sistemas turbidíticos modernos insonificados (SBP e sonar) como o Mississippi (GLORIA II e Seamarc 1A - Twichell et al. 1991; 1992; Nelson et al. 1992), Amazonas (GLORIA, SBP 3,5-12kHz - Flood et al. 1991; 1995; Damuth et al. 1995, Damuth e Pirmez, 2002), Indus (SBP 3,5kHz, sísmica multicanal - Kolla e Coumes, 1987) e outros (Pickering et al. 1995) e também com feições nos mapas de amplitude de reservatórios turbidíticos da Bacia de Campos considerados "lobos".

A interpretação dos registros de sonar e SBP no

lobo está mostrada na figura 6. No entendimento deste estudo, o lobo é uma forma geométrica complexa de contorno grosseiramente elipsóide, no caso com 10 x 20 km de diâmetro, interpretada como uma profusão de canais fracamente sinuosos que se irradiam a partir de uma determinada região.

bulbos e lobos

A análise em mais detalhe da imagem de sonar sugere que após o longo trajeto sinuoso até o lobo, o turbidito deposita uma barra de desembocadura que exhibe, em planta, um desenho em forma de corneta ou então em bulbo (de termômetro). A deposição destes bulbos, intensamente repetida, resulta na construção do lobo. Especula-se que a formação destes bulbos guarda semelhança com a das barras de desembocadura deltaicas dominadas por rio (como o delta do Mississippi), com o sedimento percorrendo toda a extensão do canal sem se depositar, fazendo-o somente no final, após erodir o bulbo depositado anteriormente.

Para se ter uma idéia da trajetória, os pequenos canais turbidíticos, em sua maioria, cruzam os mais de 60 km da calha proximal, para terminar na extremidade lobo em um bulbo. São os canais e os bulbos que constroem o lobo. Imagina-se que as areias viajem num longo trajeto dentro do minúsculo canal sinuoso e raramente saem do eixo até chegar na extremidade distal do sistema turbidítico, que é o bulbo.

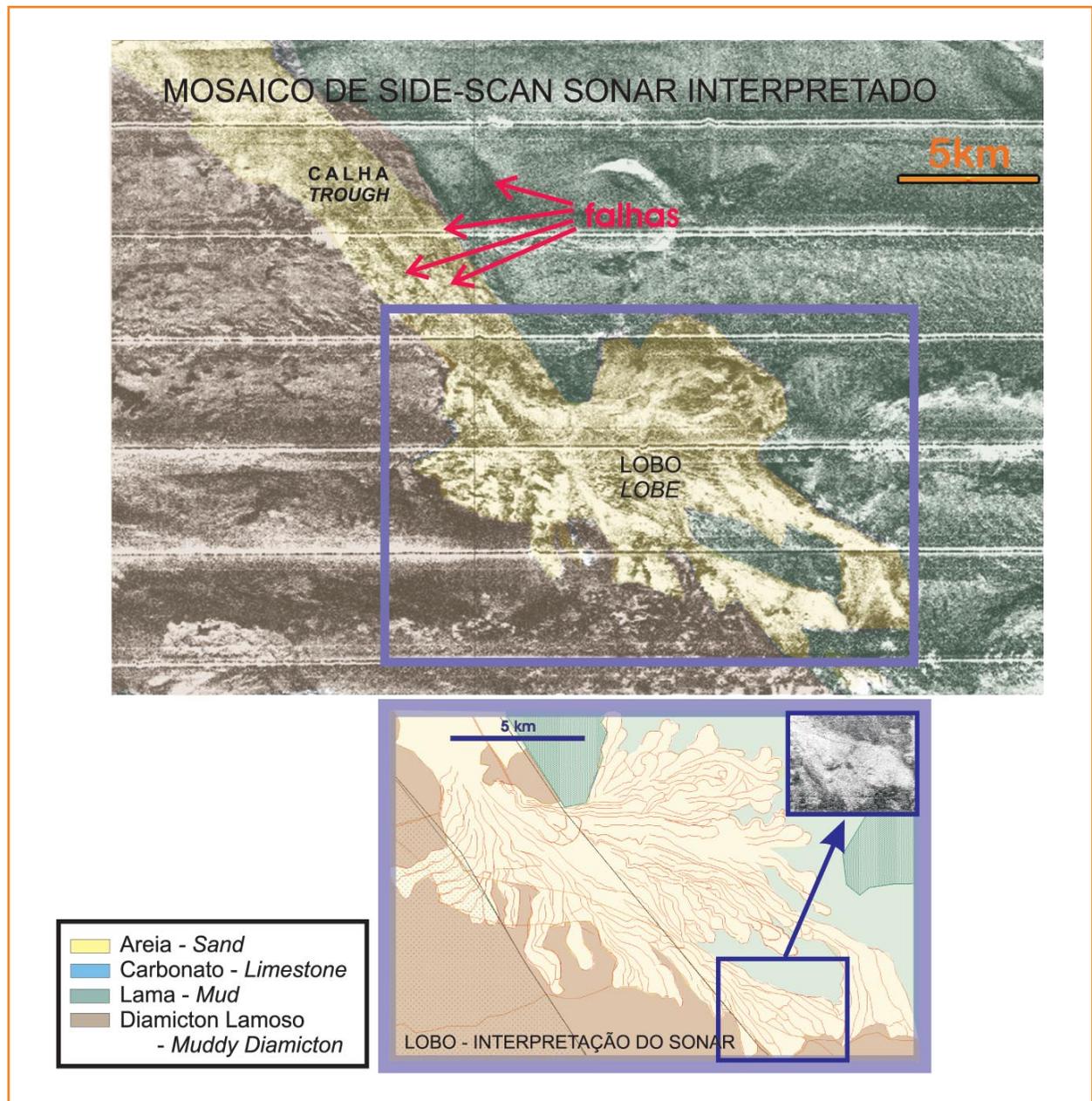
Os canais de lobo são arenosos e seu *levee* também. Os *leves* são incoesos por serem pobres em argila. A argila é um sedimento que apresenta alguma coesão poucas semanas depois de depositada. Como a areia não é coesiva, os *leves* são friáveis, permitindo intensa avulsão e prevenindo o meandramento. O *levee* incoeso é incapaz de desviar o fluxo, não agüentando a turbulência. Ele é rompido à mínima pressão da cabeça de fluxo e portanto não há como produzir sinuosidade. Assim os canais dos lobos são predominantemente retilíneos, com sinuosidade muito próxima de um, pois qualquer mudança brusca na longuíssima trajetória do turbidito resulta em avulsão.

Figura 6

Imagem interpretada de sonar (legenda em cores) do lobo deposicional do sistema turbidítico Almirante Câmara e da calha proximal. A interpretação mostra o lobo composto por uma miríade de pequenos canais pouco sinuosos, radiados, terminando em pequenas barras de desembocadura em forma de corneta ou bulbo. Isso indica que o lobo não se formou num único evento. Os bulbos constituem a menor unidade deposicional turbidítica observada.

Figure 6

Sonar image interpretation of the Almirante Câmara depositional lobe and proximal trough. The interpretation shows the lobe composed of a multitude of small, radiating, low sinuosity channels which terminate in small, horn-shaped mouth bars or bulbs. This pattern is indicative that the lobe was not formed during a single event. The bulbs constitute the smallest depositional unit observed at the turbidite system.



O lobo é um *braidplain* radial, com canais rasos, retilíneos e efêmeros. Estima-se que a amalgamação deste *braidplain* de areia bem selecionada, com uma miríade de canais, forme uma única camada de turbidito, como as mapeadas em seções, entre poços ou afloramentos e que são correlacionadas pelas camadas envoltórias de lama (estas sim, fisicamente contínuas, pois são *drapes* / *vasas*).

Na parte mais distal dos canais turbidíticos, os bulbos superpõem-se e amalgamam-se em progradação com seu progressivo avanço, resultando numa feição de barra alongada (ou, como quis A.H.Bouma, em comunicação pessoal: *flat fingers*

como na Bacia do Karoo). Ocorre, com menor frequência que a progradação, a superposição lateral ou desvio destas barras de desembocadura, o que pode ser atribuído também ao processo de avulsão do canal.

A constante progradação dos bulbos produzindo as barras alongadas, associada com a eventual avulsão do pequeno canal é a combinação autocíclica suficiente para a produção da geometria do lobo, com seu desenho radiado, grosseiramente elipsóide, como é mostrado na porção superior da figura 7 (mod. de Machado *et al.* 1998a e 1998b).

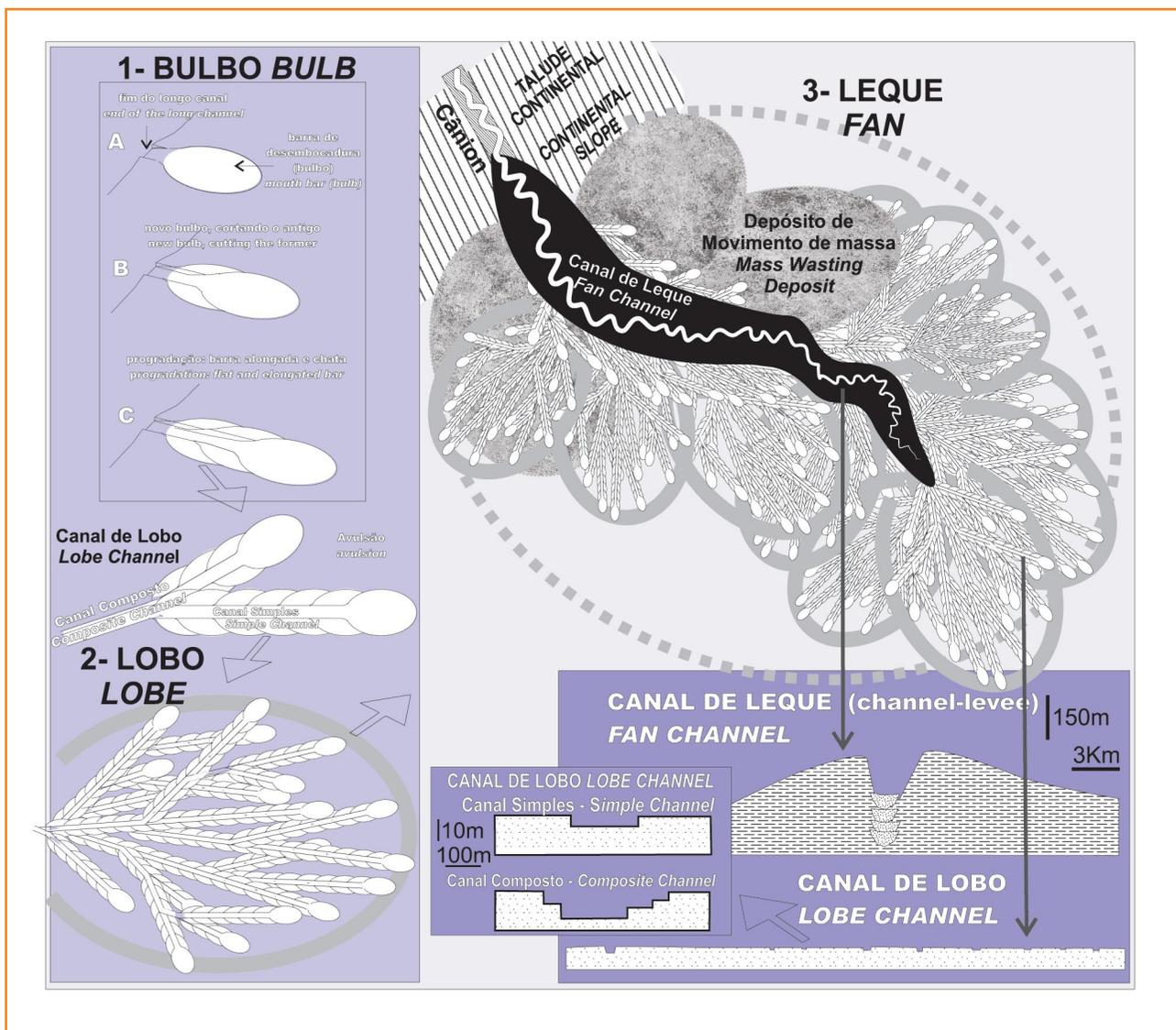


Figura 7 - Modelo deposicional para sistemas turbidíticos com canyon e talude continental bem definidos, baseado nos modernos Mississippi, Amazonas e Indus e no Paraíba do Sul / Carapebus. Desenhos fora de escala. 1) O transporte da corrente de turbidez por dezenas de quilômetros ao longo do pequeno canal sinuoso termina em uma pequena barra de desembocadura em forma de bulbo na porção mais distal do sistema, a extremidade do lobo. 2) Os bulbos e seus canais, amalgamados, compõem um lobo. 3) O leque submarino é o conjunto composto por lobos, cunha de channel-levees (canal de leque) e depósitos de movimento de massa. No longo trajeto da corrente de turbidez, a água com lama (pouco densa) tem menor velocidade que o fluxo hiperconcentrado de areia (grain flow) e fica para trás, assim como o cascalho, no leque proximal. Depois que a areia passou, a lama deposita-se segundo a lei de Stokes e, ao cabo de semanas, já apresenta coesão apreciável no fundo do mar. A lama produzirá levees coesos que resistirão à cabeça oscilante dos próximos fluxos turbidíticos, induzindo meandramento do canal e impedindo sua avulsão – o canal de leque é único e fixo. O lobo é produto da ausência de lama. Sem lama, os levees são incoesos, permitindo intensa avulsão com formação de uma miríade de canais sem sinuosidade, rasos, amalgamados e radialmente espalhados: o lobo.

Figure 7 - Depositional model for turbidite systems with well-defined canyon and continental slope, based on the modern Mississippi, Amazon and Indus fans and on the Paraíba do Sul / Carapebus. Drawings are not to scale. 1) The transport of the turbidity current for tens of kilometers along the small sinuous channel terminates in a small bulbous channel mouth bar in the most distal part of the system. 2) The amalgamated bulbs and associated channels comprise a lobe. 3) The submarine fan comprises lobes, the channel-levees wedge (fan channel) and the mass-wasting deposits. During the long path of the turbidity current, the mud-laden water (less dense) flows slower than the hyperconcentrated sandy-grainflow (denser) and thus is left behind, in the proximal fan, as does the gravel. After the sand has passed through, the mud is deposited according to the Stoke's Law and, in time may acquire appreciable cohesion at the seafloor. The mud will produce cohesive levees that will resist the head of the next turbidity currents, inducing the meandering of the channel and preventing its avulsion. The lobe is produced by the absence of mud. Without the mud the levees are non-cohesive, allowing avulsion and the formation of countless, shallow, straight, radially distributed, amalgamated channels.

Uma análise do mosaico de sonar mostra que cada um desses bulbos teria cerca de 1,5 km² de área. Se se supuser a espessura de 0,3 m para uma camada de turbidito, o que é um valor comum em testemunhos da Formação Carapebus, será obtido um volume de sedimento de 450 000 m³ depositados por evento.

Apesar da forma geral lobada ou elipsóide, o lobo deposicional estudado nos dados de sonar tem boa parte de seu desenho externo retilíneo e anguloso. Isto é consequência do preenchimento por areia de pequenas depressões métricas no Platô, criadas por falhas conjugadas e orientadas a 60° entre si numa forma poligonal de origem tectônica (ver figura 6). No sistema turbidítico do Mississippi, os lobos tendem a ser perfeitamente elípticos e não se percebem elementos tectônicos nos dados disponíveis. Certamente, as altíssimas taxas de sedimentação sobrepõem com folga as taxas de deformação tectônica, imprimindo a assinatura sedimentar, autocíclica, dominada pela avulsão do canal de lobo.

hierarquia leque / lobo / bulbo

Combinando-se características comuns dos sistemas modernos do Carapebus, Mississippi, Amazonas, Indus, entre outros, adotou-se, aqui, uma hierarquia dimensional de feições lobulóides para sistemas turbidíticos com talude e bacia bem definidos, a saber: leque submarino / lobo / bulbo, como mostra o modelo deposicional exibido na figura 7, onde são explicitadas as geometrias mapeadas e processos sedimentares associados. O modelo seria restrito a sistemas turbidíticos que tenham: 1) talude continental bem definido; 2) quebra brusca de gradiente na base do talude; e 3) uma única fonte de alimentação (*canyon* submarino).

Dadas estas três premissas, a repetição por milhares de vezes dos episódios de corrente de turbidez saídos velozmente da boca do *canyon* submarino teria condições de construir as geometrias de leque, lobo e bulbo observadas, empilhando toda a cunha do leque submarino.

As feições lobulóides (leque, lobo e bulbo) aparentemente são os principais elementos nestes sistemas turbidíticos com talude e bacia bem defini-

dos, em que ocorre grande aceleração da corrente no *canyon* submarino e forte quebra de gradiente ao sair dele, provocando erosão/ *by-pass* seguido de deposição generalizada das areias na parte distal. A hierarquia dimensional das geometrias bulbos, lobos e leque é autocíclica. Milhares de bulbos e seus canais (canais de lobo) compõem um lobo deposicional. O leque submarino é o conjunto composto por dezenas / centenas de lobos, cunha de *channel-levee* (canal de leque) e também depósitos de movimento de massa.

O Mississippi, o Amazonas e o Indus apresentam bem definidos os três elementos hierárquicos, desenvolvendo leque submarino.

A geometria do leque depende muito da bacia. No sistema turbidítico do Carapebus, a presença de um substrato móvel (sal do Platô de São Paulo) impede a formação de verdadeiros leques submarinos, existindo somente lobos e bulbos. A macroforma predominante no Platô de São Paulo é uma calha deposicional encaixada nas mini-bacias salíferas. No Carapebus a ecofácies mais proximal (ver figura 9, SBP 2, 3 e 4) é semelhante à do perfil distal dos lobos do Amazonas e do Indus, onde é arenoso. A Formação Carapebus moderna não desenvolve leque submarino, em parte por ser arenosa em sua porção proximal, em parte por ter sua macrogeometria aprisionada em calhas que afundam no substrato móvel da tectônica salífera. Tal qual sua porção moderna, muitos níveis mais antigos da Formação Carapebus não desenvolvem a cunha de *channel-levee* proximal (canal de leque), característica de sistemas que trazem lama. Suas fácies mais proximais já são o *braidplain* arenoso (muitas vezes radial) com uma miríade de canais, típica dos lobos deposicionais dos grandes sistemas como o Mississippi, Amazonas e Indus.

canal de leque (do Amazonas, Mississippi e Indus)

Como mostrado em trabalhos nos grandes leques submarinos modernos, o canal principal proximal é o *channel-levee* clássico: *levee* argiloso, gigantesco; canal com cascalho, evidenciando o *by-pass* de sedimentos arenosos.

Em função do aporte de lama que de alguma maneira consegue chegar em águas ultraprofundas, desenvolve-se uma acumulação de fácies proximais (lama e cascalho) produzida pelos canais de leque que são os *channel-levees* clássicos. A lama e o cascalho são as fácies proximais (canal de leque) e a areia (lobos) é a fácies distal do leque submarino.

Após ser acelerada no *canyon*, a corrente dissipa sua energia expulsando as frações granulométricas de menor velocidade (cascalho para baixo: *lag* e lama para cima: pluma turva de baixa densidade) e segue adiante em alta velocidade como fluxo superdenso ou hiperconcentrado (areia com água - *grain flow*) até a área mais distal do leque submarino, que são os lobos.

No fluxo turbidítico, a lama e o cascalho ficam para trás pois não conseguem acompanhar a alta velocidade do fluxo hiperconcentrado de areia. A mistura água + lama não é, em regra, muito densa e assim não constitui um fluido rápido. Expulsas para cima da corrente principal, em uma gigantesca nuvem turva em expansão, as frações granulométricas silte e argila elevam-se às alturas titânicas dos *levees*. Para serem depositadas, as frações finas sedimentam-se segundo a lei de Stokes, em várias horas ou dias após a turbulência. Assim a lama compõe a fácies proximal do sistema turbidítico, sendo retida nessa “trapa de Stokes”.

A deposição é em dias, mas a consolidação da lama no fundo do mar já é apreciável em poucas semanas. Estes *levees* são muito argilosos (Flood e Piper, 1995) e formam colossais muralhas irremovíveis, várias vezes mais altas que o fluxo principal arenoso da corrente de turbidez.

Com *levees* coesos e muito mais altos que o fluxo turbidítico, este fica confinado em um brete e sua ação erosiva é quase desprezível, limitando-se ao desgaste das paredes do *levee* lamoso e produzindo a sinuosidade. Como observam McHargue *et al.* (2003), devido à coesão dos *levees* lamosos, o canal turbidítico *channel-levee* meandra. Mede-se nos SBPs do *upper and middle fan* do Amazonas (Damuth *et al.* 1995) alturas de 100 - 300 m por larguras de 2 - 3 km nos *channel-levees*. O canal de leque é fixo, único e sinuoso, graças à argila, retida na “trapa de Stokes”.

A diferenciação entre canais de leque (*channel-levees*) e canais de lobo (*braidplain*) também fica evidente na altura dos *levees* e em sua razão de aspecto. Mede-se nos SBPs do *lower fan* (que é 100% arenoso - Damuth e Pirmez, 2002) uma miríade de canais de lobo com 5 m - 50 m de altura e 200 m - 300 m de largura. A razão de aspecto altura/profundidade denuncia que o eixo dos canais de leque é erosional (*by-pass*) e o dos canais de lobo é deposicional.

a calha distal

A calha distal do Carapebus Moderno é fortemente encaixada na morfologia halocinética, constituindo uma depressão alongada notável, com 200 m de profundidade, como mostra o SBP da figura 8.

Possui uma largura de 3 500 m e um traçado sinuoso com segmentos bastante retilíneos. Em um trecho, apresenta um desenho de cotovelo bem marcante, ao transpor uma muralha de sal intermediária do Platô, passando a correr paralelo à mesma. No fundo da calha, observa-se no SBP um canal com 10 m de relevo e centenas de metros de largura. As dimensões deste canal são incomparavelmente menores que as dimensões da calha, que o aprisiona em seu interior. As taxas de sedimentação, muito mais altas dentro da calha (turbidito) do que fora (vasa), ativam a tectônica salífera por carga diferencial, garantindo o perpétuo afundamento de seu assoalho. A largura menor e mais constante que a da calha proximal reflete uma fisiografia mais encaixada no relevo produzido pela tectônica salífera.

metodologia de medição na calha proximal e limitações das ferramentas

O levantamento do PROCAP 2000, principal fonte de dados aqui utilizada, foi realizado em 1994/95 através de contrato com a SSI - *Seafloor Surveys International*. Ao todo foram levantados

Figura 8

Imagem de sonar e seção transversal (SBP - sísmica de 3,5kHz) da calha deposicional do sistema turbidítico. A calha abriga vários canais turbidíticos com dimensões muito menores do que as suas, e que tem altas taxas de sedimentação. As taxas altas resultam em carga diferencial e tectônica salífera, soerguendo as enormes muralhas que limitam a calha e confinam os canais turbidíticos. Os pequenos canais foram mapeados em sonar e medidos em SBP.

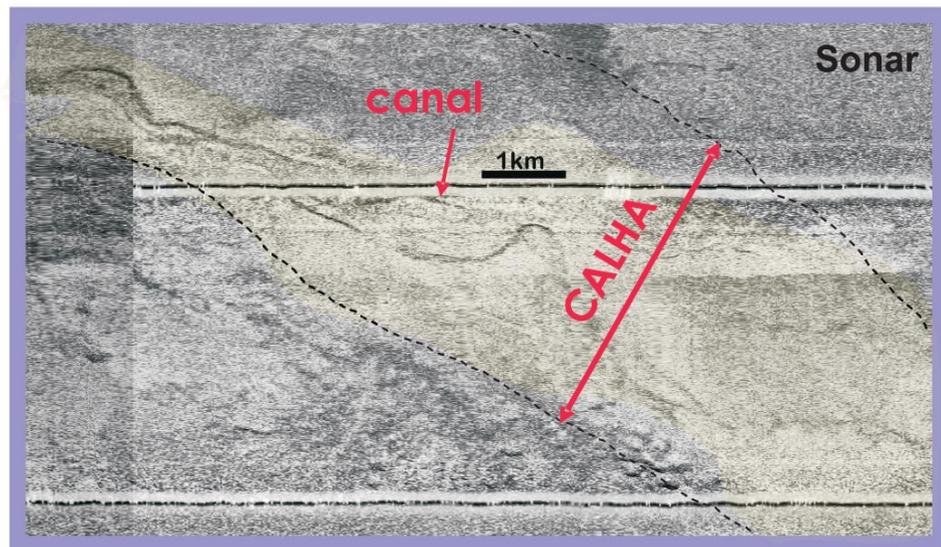
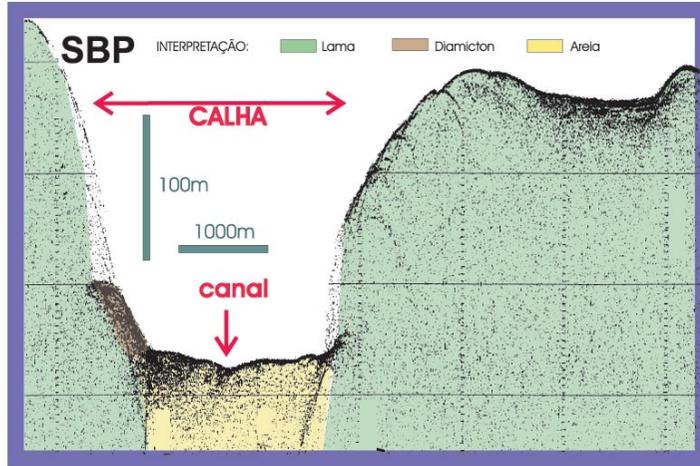


Figure 8

Sonar image and sub-bottom profiler (SBP) section of the depositional trough of the turbidite system. The trough contains various turbidite channels of much smaller dimensions but displaying high sedimentation rates. Differential loading and salt movement create the high relief walls that bound the trough and confine the channels. The small channels were mapped in sonar and measured from SBP records.

41 000 km² de *side-scan sonar* no talude continental e Platô de São Paulo adjacente da Bacia de Campos até a isóbara de 3 000 m.

A insonificação e batimetria de varredura foram obtidas com o peixe SYS-09 rebocado próximo à superfície do mar, que opera nas frequências de 9 e 10 kHz. Concomitantemente, foram obtidos registros de sísmica de 3,5 kHz (SBP: *Sub-Bottom Profiler*) através de um sistema "Chirp" em peixe independente. O levantamento no Platô de São Paulo entre batimetrias de 1 500 m e 3 000 m, onde está situada a calha turbidítica, foi feito ao longo de linhas Leste-Oeste, espaçadas de 4 km, com um recobrimento de 85%.

A coleta de testemunhos a pistão em alvos refletivos definidos permitiu estimar que este sonar penetra em torno de 3 m no solo marinho da

área estudada. Conforme afirmado anteriormente, ao se considerar que a espessura da vasa holocênica nesta região é em torno de 30 cm, pode-se assumir que as imagens de sonar no Platô de São Paulo, de modo geral, registram as feições dos sedimentos pleistocênicos soterrados. A penetração do sonar facilitou a construção do mapa de fácies do subsfundo marinho (fig. 4).

A expectativa inicial era que as maiores refletividades do sonar deveriam corresponder a sedimentos com tamanho de grão maior, tais como areias grossas. O rumo dos trabalhos mostrou, entretanto, que as mais altas refletividades estão associadas a fundos marinhos ainda mais rugosos, tais como clastos salientes na superfície de diamictos e sedimentos deformados pela tectônica salífera subjacente, respondendo apenas de

maneira secundária à textura sedimentar de areias e lama. O sonar foi mais sensível à rugosidade do terreno que à impedância acústica. Na calha turbidítica e no lobo, devido ao caráter colmatador dos turbiditos e da sua deposição recente, supõe-se que as refletividades do sonar correspondam sobretudo às diferenças de granulação e não à rugosidade dos depósitos.

O mosaico dos registros de sonar mostra que a calha é preenchida por pequenos canais sinuosos que se entrelaçam. Acredita-se que são eles os responsáveis pelo transporte dos turbiditos, pois são a continuação dos estreitos canais contidos no *Canyon* Almirante Câmara.

A fim de quantificar elementos geométricos da calha proximal deste sistema turbidítico, com vistas a analogias para simulação de reservatório (Lanzarini *et al.* 1997), foram descritos e medidos elementos internos do sistema, com enfoque especial nos canais turbidíticos sinuosos. Inicialmente, foram identificados nos registros de sonar diversos canais sinuosos bem definidos no interior da calha proximal e no lobo. Porém em alguns trechos havia descontinuidades e zonas de má definição. Ao se iniciar o mapeamento sistemático, observou-se que estes problemas de má definição resultavam não só de limitações tecnológicas relacionadas ao tipo de equipamento (sonar + SBP) mas também da ocorrência de feições geológicas que, mesmo sendo de grandes dimensões, apresentavam baixa resposta nas ferramentas utilizadas. Pelas suas características, o sonar apresenta má definição de elementos que estejam perpendiculares à linha de levantamento. Também responde mal à grande varredura em águas profundas (2 a 3 km) e à relativa baixa frequência do sinal, fatores estes vinculados ao caráter regional do levantamento. Com o objetivo de sistematizar a medição, foram rastreados os três canais mais contínuos e visíveis em sonar, denominados A, B e C, conforme mostrado nas figuras 9 e 10.

Estes canais encontram-se em parte entrelaçados, confundindo-se entre si e eventualmente assumem o mesmo traçado na imagem de sonar em trechos onde a calha proximal inflete para sudeste, tornando-se oblíqua às linhas de levantamento e deixando as imagens sem nitidez.

Se por um lado os canais atenuam-se ou desaparecem quando ortogonais à navegação, por outro lado é justamente quando cruzam o nadir (ponto abaixo do peixe, linha de navegação) que é feito o registro de SBP (linha sísmica de 3,5Khz), permitindo a observação de características de relevo e estratificação do fundo marinho. Assim, os canais que aparecem bem no sonar não aparecem bem no SBP, e vice-versa.

Devido à maior precisão e controle geológico, os parâmetros de largura e profundidade de canal foram obtidos dos registros analógicos das linhas de SBP, onde estes atravessam os canais. Os cruzamentos oblíquos, que tendem a alargar artificialmente a seção do canal, foram corrigidos, valendo-se das relações trigonométricas. Já a profundidade do canal foi obtida medindo-se o desnível entre o ponto mais fundo do canal e o topo de sua ombreira (média).

A largura dos canais apresenta no sonar valores discrepantes das do SBP e foi considerada artificial, pois dependendo do ângulo de insonificação pode corresponder à: 1) reflexão do assoalho do canal; 2) do assoalho somado à parede do canal; ou 3) somente da parede do canal. No sonar, os canais exibem larguras muito constantes, de 40 a 70 m, ao longo de praticamente todo seu trajeto. Assim sendo, essas medidas não foram levadas em consideração no presente estudo.

Quanto à sinuosidade, a partir da desembocadura do *canyon* (km zero) marcaram-se estações de medida equidistantes 2 500 m em linha reta sobre os canais, segmentando-os em diversos trechos.

Em cada trecho foram então medidos o comprimento curvilíneo real do canal, ao longo do seu talvegue, entre duas estações e a distância em linha reta entre elas. A sinuosidade é a razão entre a distância medida ao longo do talvegue do canal e a distância em linha reta, sendo o canal tanto menos sinuoso (reto) quanto mais próximo este valor estiver de 1. Os desníveis batimétricos entre o início e fim de cada trecho para cálculo do declive da calha e do declive do canal foram obtidos das cartas batimétricas da SSI, na escala de 1:50.000. O declive da calha corresponde ao desnível batimétrico dividido pelo comprimento retilíneo de cada trecho (2 500 m). Já o declive do canal corresponde ao mesmo desnível batimétrico dividido pelo comprimento real curvilíneo do canal, em cada trecho.

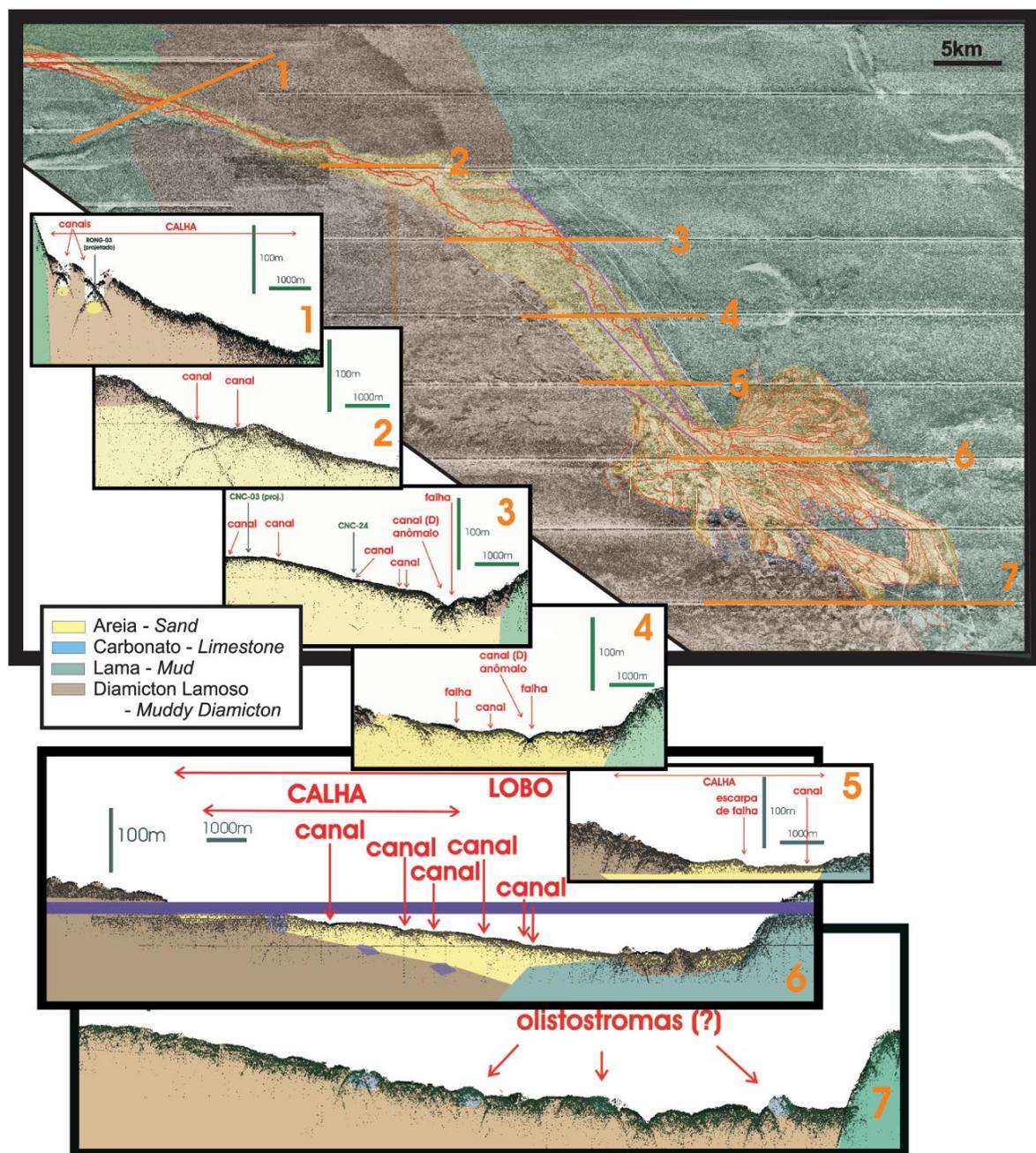


Figura 9 - Imagem de sonar e perfis transversais de SBP dos canais da calha proximal e do lobo. Estes pequenos canais turbidíticos são sinuosos (em vermelho), e nos registros de SBP se mostram pouco evidentes por serem muito rasos. SBP: 1) canais proximais, profundos, erosivos; 2) canais costeando falésias; 3 e 4) canais normais e canal anômalo D, coincidente com falha; 5) canal e escarpas de falha; 6) lobo, com abundantes canais, rasos e largos; 7) extremidade do grande depósito de movimento de massa, com relevo acidentado.

Figure 9 - Sonar image and SBP crosssections of the proximal trough and lobe channels. The turbidite channels (in red) are small, very shallow and are barely noticeable in the SBP records. SBP: 1- Proximal channels, deep and erosive. 2- Channels bordering escarpments. 3 and 4- Normal channels and anomalous channel D, coincident with fault. 5- Channel and fault scarps. 6- Lobe with abundant channels, shallow and wide. 7- Extremity of large mass-movement deposit, showing rough relief.

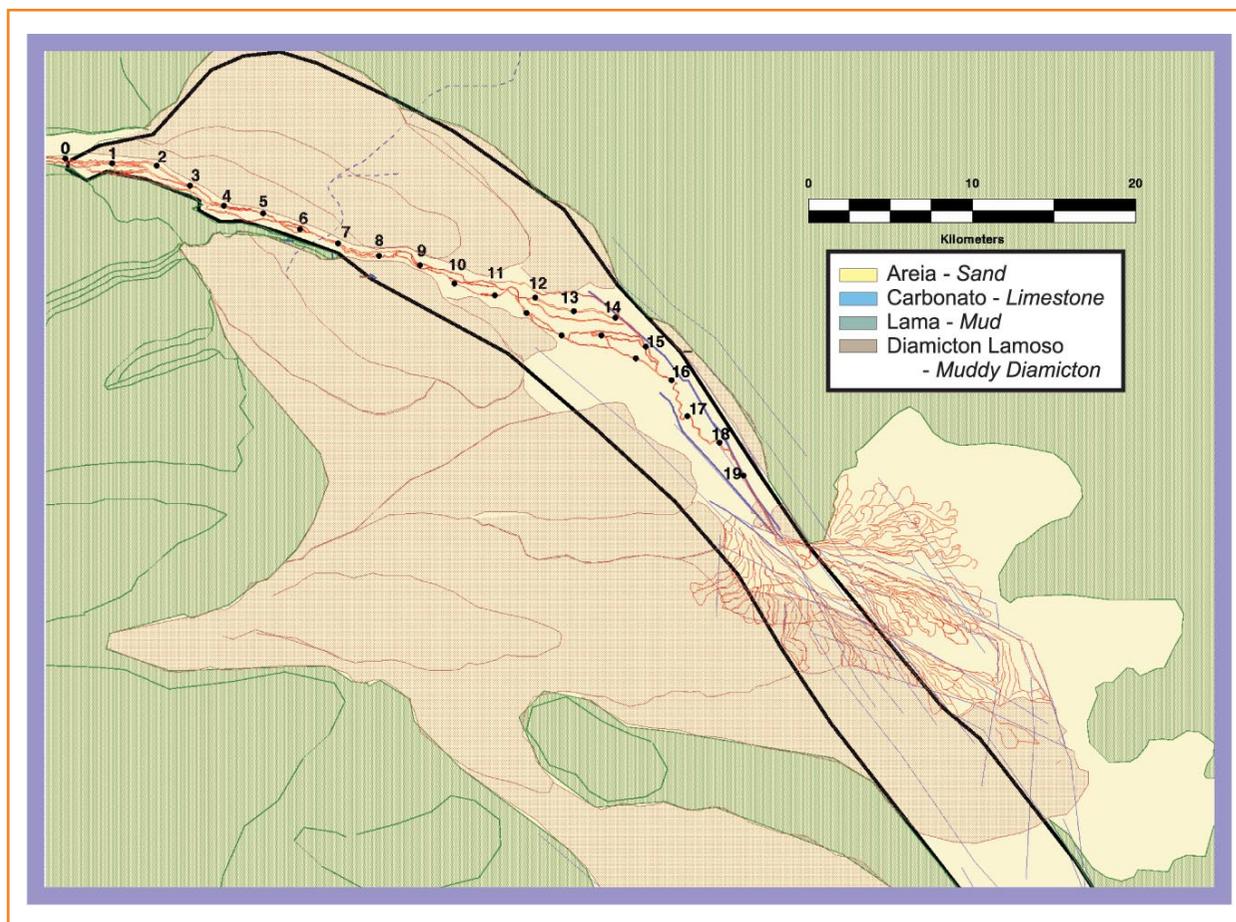


Figura 10

Mapa interpretativo dos canais turbidíticos (vermelho) e diamictos (marrom) baseado em registros de sonar e SBP. Estações de medidas de batimetria (para cálculo do gradiente) e de sinuosidade ao longo dos canais da calha proximal estão assinaladas de 1 a 19 e são apresentadas na figura 11. Largura e altura dos canais foram medidas através dos perfis transversais de SBP. Outras feições mapeadas incluem os limites da calha (linha preta) e as falhas (em roxo). Notar a influência das falhas no desenho do lobo.

Figure 10

Map with interpretation of turbidite channels (in red) and diamictos (brown) based on sonar and SBP records. Stations where measurements of bathymetry (for gradient estimates) and of sinuosity were made along the channels of the proximal trough are numbered 1-19 and are presented in figure 11. Width and height of channels were measured on crosssections obtained from subbottom profiler records. Other mapped features include the boundaries of the trough (black line) and faults (in purple). These faults strongly influence the shape of the lobe.

geometria dos pequenos canais turbidíticos da calha proximal

Os dados coletados nas medições realizadas na calha proximal foram introduzidos em uma planilha eletrônica para a produção de diversos gráficos, como mostra-se na figura 11.

A sinuosidade dos três canais é geralmente muito baixa, entre 1,05 e 1,20. Apenas em dois trechos ela ultrapassa 1,30. Ela aumenta com a distância ao longo do canal, de montante para jusante.

A tendência da sinuosidade é acompanhada de modo inverso pelo gradiente, que diminui de montante para jusante. O gradiente dos canais ultrapassa 30 m/km nos trechos próximos e decresce para 10 m/km ao longo do trajeto, reduzindo-se para apenas 7 m/km nos trechos mais distantes. Este comportamento é distinto do sistema

turbidítico do Amazonas, onde os canais meandram para manter a mesma declividade interna de seu talvegue à medida que a declividade regional varia (Pirmez e Flood, 1995). No Almirante Câmara a pequena sinuosidade dos canais não consegue atenuar o gradiente de maneira significativa e, portanto, o gradiente do canal é apenas ligeiramente menor que o da calha (regional). Nos exemplos de canais submarinos modernos compilados por Clark et al. (1992), desenvolvidos em gradientes regionais maiores que 10 m/km, as sinuosidades situam-se abaixo de 1,50 (frequentemente abaixo de 1,20), à semelhança dos valores encontrados no sistema Almirante Câmara.

Comparando-se os dados de sinuosidade e gradiente obtidos no presente estudo com aqueles estabelecidos para o Cone do Amazonas, verifica-se que as tendências são semelhantes, embora os valores absolutos sejam muito discrepantes. As sinuosidades tendem a aumentar de montante para jusante, enquanto que os gradientes da calha e

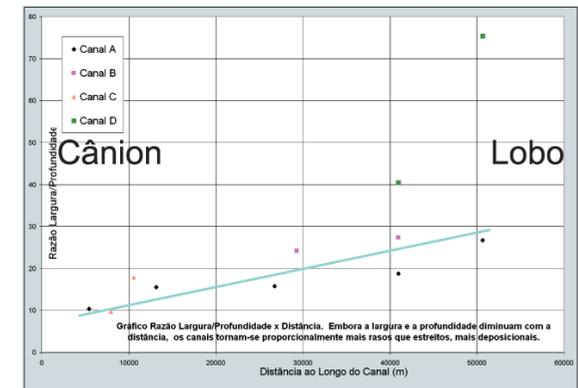
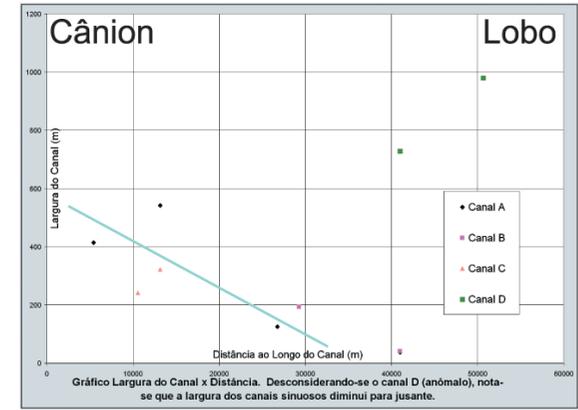
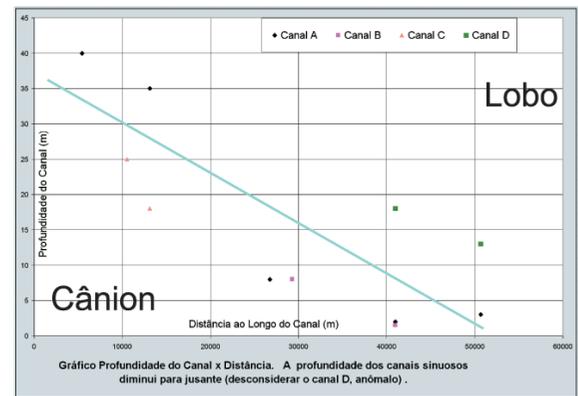
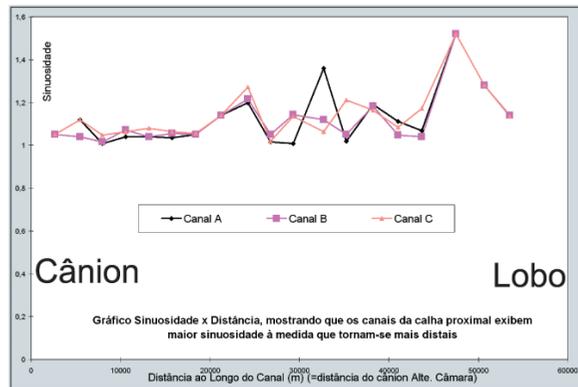
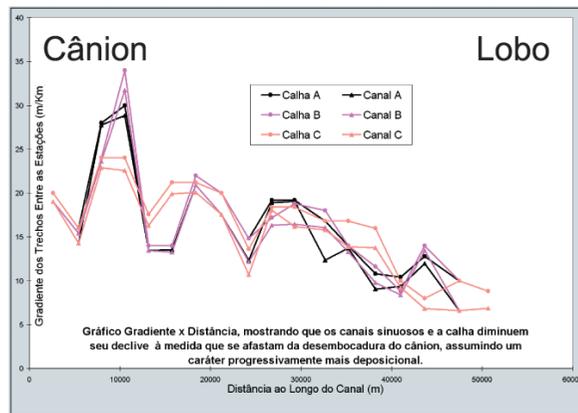


Figura 11 - Gráficos das características morfométricas dos canais A, B, C e D mapeados na calha proximal (ver figura 10). A abscissa mostra a distância em metros ao longo do canal, medida a partir do *canyon*. As medições iniciam (estação 1 e SBP 1) na desembocadura do *canyon* e terminam próximo ao lobo (estação 19 e SBP 5). À esquerda, gráficos de declividade e sinuosidade e, à direita, gráficos de largura e profundidade, incluindo a razão de aspecto. A sinuosidade e o gradiente diminuem com a distância ao longo do canal, ao mesmo passo que eles vão ficando mais estreitos e mais rasos, o que indica que se tornam mais deposicionais à medida que se afastam do *canyon*.

Figure 11 - Plots of the morphometric characteristics of channels A, B, C and D, mapped within the proximal trough. The abscissa measures the distance in meters along channel, starting from the canyon. The measurements start at the canyon mouth (station 1 and SBP 1) and terminate near the lobe (Station 19 and SBP 5). Gradient and sinuosity are plotted on the left and width and depth of channels, including aspect ratio, are plotted on the right. Along-channel sinuosity and gradient diminish with distance; simultaneously, channels become narrower and shallower, indicating that they become more depositional the farther away from the canyon.

do canal tendem a diminuir. No Almirante Câmara, os gradientes são mais altos e os canais menos sinuosos que os do Amazonas. Em valores absolutos, na porção mais meandrante do Cone Médio do Amazonas as sinuosidades estão em torno de 2,5, atingindo valores de 3,0 e os gradientes dos canais são de aproximadamente 4 m/km, variando entre 14 m/km e 1 m/km.

Numa comparação entre os canais do Almirante Câmara e um sistema fluvial subaéreo, características como o grau de entrelaçamento dos canais, as baixas sinuosidades e os altos gradientes os aproximam de um ambiente de rios entrelaçados (*braided*); algo similar ao sugerido por Shanmugan (1990), em contraste com a tradicional comparação com um rio meandrante, como é o caso do Leque do Amazonas. Esta semelhança a uma planície arenosa de rios *braided* (*braidplain*) é reforçada por outras evidências: 1) ocorrência de areia grossa e pouca lama, tanto dentro quanto fora dos canais (respectivamente testemunho CNC-24 e CNC-03); 2) a ecofacies prolongada sem estratificação desta área (Kowsmann *et al.* 1996b), típica de areia e padrão sonográfico distinto, também associável a areias.

A comparação do sistema do Almirante Câmara com o Amazonas freqüentemente mostra contrastes, sendo isto devido principalmente à: 1) área-fonte lamosa do Amazonas e arenosa do Almirante Câmara; 2) o Amazonas é gigantesco, uma ordem de magnitude maior, fazendo com que a corrente de turbidez viaje mais e portanto diferencie-se mais, resultando em sedimentos mais selecionados e diferentemente distribuídos, havendo, em função disso, o item a seguir; 3) grande diferenciação dos canais proximais e distais, o que não ocorre no Almirante Câmara.

O importante na comparação com o sistema turbidítico do Amazonas é lembrar que a literatura enfoca a sua parte proximal, com canais muito sinuosos e gigantescos *channel levees* (clássicos). De acordo com as assinaturas de SBP dos dois sistemas, o Almirante Câmara só é equivalente à parte distal do Amazonas, que é essencialmente arenosa (Damuth e Pirmez, 2002). Por essas razões, não se espera a ocorrência de *channel-levees* clássicos na Formação Carapebus, pois este é essencialmente arenoso.

Os trechos de 2 500 m em linha reta utilizados para medição da sinuosidade fornecem também, através de seu azimute, uma idéia da constância da direção do canal. A medição destes azimutes revela baixo desvio-padrão e uma direção firme, indicando pouco meandramento ou baixa sinuosidade do canal.

As larguras dos canais A, B e C formam, em conjunto, um padrão decrescente de montante para jusante, com valores entre 600 m e 40 m. As profundidades variam de 40 m a 2 m, também com um padrão decrescente. O gráfico da razão largura / profundidade mostra um aumento de 10 para 30, de montante para jusante, indicando uma menor taxa de diminuição da largura com relação àquela da profundidade à medida que se afasta do *canyon*. Este padrão também é observado por Pirmez e Flood (1995) no Cone do Amazonas e reflete a passagem de um regime erosional dominante para outro de caráter deposicional.

A observação em detalhe da calha proximal evidenciou outros elementos de grandes dimensões e que provavelmente estão presentes nos níveis antigos da Formação Carapebus, constituindo importantes heterogeneidades de reservatório: 1) falha principal NW-SE, com raiz no sal, que produz a muralha de mais de 50 m de relevo no fundo marinho, formando o limite NE da calha proximal; 2) falhas menores NW-SE no interior da calha turbidítica, com mais de 10 m de rejeito (relevo no fundo marinho) que interferem na sedimentação, alterando o caminho dos canais sinuosos; 3) canal anômalo de proporções gigantesco associado a essas falhas menores; 4) grandes línguas de diamictos (20 x 10 km) cuja extremidade distal penetra parcialmente no interior da calha arenosa pelo seu flanco SW; 5) pequenos depósitos de tálus da falha principal.

O canal anômalo de grandes dimensões associado às falhas foi denominado canal D e também quantificado. Suas dimensões são completamente destoantes dos demais canais, apresentando larguras de 700 m e 1 000 m, profundidades de 14 m e 18 m e razão largura / profundidade igual a 70. O canal tem perfil mais entalhado e apresenta a particularidade de ser invisível ao sonar, sendo bem

assinalado em SBP e nos mapas batimétricos devido a seu grande relevo. Este canal só existe em uma determinada região, onde a calha inflete-se para sul, ao encontrar uma grande muralha de sal em seu caminho. Neste ponto, os vários canais sinuosos cruzam a calha para o lado leste, convergindo contra uma escarpa de falha interna à calha, formando o canal anômalo. A soma do poder erosivo dos canais que convergem, aliado ao confinamento exercido pela escarpa de falha e a maior desagregação dos sedimentos neste local, indica a origem erosiva para esta feição.

Localizadamente, na desembocadura do *Canyon* Almirante Câmara, os canais A, B e C mostram um entalhe mais profundo, algo semelhante ao do canal D. É esta a região exata onde ocorre a dissipação de energia das correntes de turbidez que provêm do *canyon*.

conclusões- discussão dos resultados

A calha turbidítica que brota do *Canyon* Almirante Câmara tem cerca de 3,5 km de largura por 150 m de profundidade na fisiografia atual e, desde seu solo até 100 m abaixo do fundo marinho, apresenta assinaturas de areias. Ela pode ser dividida em Calha Proximal e Calha Distal, separadas entre si por um lobo deposicional.

Constata-se que a porção arenosa do sistema turbidítico é depositada em uma calha, que mostra em seu interior inúmeros canais que se entrelaçam. Este entrelaçamento contendo abundante areia média / grossa com intercanais também arenosos, associada a ecofácies (SBP) de fundo prolongado e padrão sonográfico homogêneo de alta refletividade, indica que o tipo de fundo marinho tem uma altíssima razão areia / lama, podendo ser descrito como um *braidplain* arenoso.

O modelo, de planície de canais entrelaçados arenosos restrita ao interior de uma calha profunda, de alguns quilômetros de largura e comprimento de mais de uma centena de quilômetros, controlada pela halocinese, é o ele-

mento dominante na paisagem da porção moderna da Formação Carapebus. Dado que é continuação da evolução do mesmo sistema deposicional, não é surpresa que este panorama moderno observado se repita em níveis mais antigos da Formação.

Ocorrem variações no modelo tais como a ocorrência do lobo, produzido pela deposição em área mais plana sem confinamento lateral e a existência de depósitos de movimento de massa com olistostromas, resultante do colapso da borda externa da plataforma continental. Em menor escala, também se destacam feições geológicas inicialmente pouco evidentes, mas que sugerem ocorrência de heterogeneidades sedimentares importantes nos reservatórios da Formação Carapebus. Estas feições são: 1) escarpas de falha aflorantes no fundo do mar que afetam a sedimentação, com mais de 10 m de rejeito, criando um relevo de grâbens, falésias e patamares no interior do sistema turbidítico arenoso; 2) a presença de grandes amplificações dos canais, com profundidades até cinco vezes maiores que o normal, sugerindo grandes erosões localizadas (canal anômalo); e 3) a ocorrência de grandes áreas cobertas de movimentos de massa (*debris apron*), vizinhas aos depósitos turbidíticos propriamente ditos, interdigitando-se lateralmente com estes, mas provindo de áreas-fonte distintas.

Entre as idéias apresentadas, as seguintes merecem ser reforçadas:

1) A origem dos turbiditos não está relacionada a *debris-flows* (ou outros movimentos de massa);

2) O gigantesco volume de depósitos de movimento de massa (diamictons lamosos) bordejando o talude continental (*debris apron*), representa talvez 1/5 do volume de toda a pilha sedimentar do Terciário / Quaternário da Bacia de Campos;

3) A maior parte dos corpos de turbidito disputa espaço com diamictons lamosos e não com lammas, o que resulta em macrogeometrias (além de processos deposicionais) completamente distintas;

4) Ausência de leque submarino. Há formação de calhas deposicionais aprisionadas na tectônica salífera, e localmente, pequenos lobos;

5) Deposição de cada camada turbidito em uma miríade de eventos, distribuídos ao longo de

um tempo geológico mais expandido do que em geral se admite (milhares de eventos turbidíticos distribuídos ao longo de menos de um milhão de anos para criar um único lobo deposicional, um único horizonte sísmico, ou mesmo uma única camada de afloramento);

6) Os turbiditos individuais são elementos pequenos e são transportados em pequenos canais sinuosos que se entrelaçam em um *braidplain* no interior destas gigantescas calhas (em alguns locais estes pequenos canais irradiam-se para formar um lobo deposicional, em áreas planas e desconfinadas);

7) Verificou-se que o sistema deposicional turbidítico mapeado é basicamente arenoso, tendo os canais e intercanais a mesma composição arenosa (areia média limpa);

8) Constatou-se a ausência de feições do tipo *channel-levee* na Bacia de Campos, tais como aquelas observadas nos grandes leques submarinos modernos (Amazonas, Mississippi, Indus);

9) Na deposição do Carapebus, os canais não são contemporâneos aos *levees*: os canais são erodidos sobre o *braidplain* arenoso. Neste local os canais e suas feições de *levee* são feições diácronas se observadas em um tempo geológico com melhor resolução. O *channel fill* é muito posterior à escavação do canal e está relacionado ao avanço de uma frente de bulbos de outro canal, esta provinda de outra direção. Como os bulbos são essencialmente deposicionais, eles preenchem o entalhe abandonado do antigo canal. Areia preenchendo entalhe em areia.

A análise preliminar deste sistema turbidítico ainda em formação mostrou grande coincidência das feições encontradas e os modelos geológicos existentes na literatura. Algumas feições, entretanto, são incomuns, devendo ser levadas em consideração ao interpretarem-se reservatórios turbidíticos em busca de heterogeneidades e parâmetros geométricos.

Uma melhor caracterização destes turbiditos em termos de fácies e heterogeneidades de reservatório poderá ser desenvolvida nesta região e na calha distal através de levantamento mais detalhado (eg. Silveira, 2001b), inclusive na escala temporal humana do sistema turbidítico da porção moderna da Formação Carapebus.

referências bibliográficas

ABREU, C. J.; APPI, C. J.; SILVA, F. G.; MATOS, R. S. Arquitetura deposicional de um complexo de lobos turbidíticos modernos de águas profundas, bacia de Campos, através do imageamento sísmico de alta resolução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá, MG. **[Trabalhos apresentados]...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004. 1 CD-ROM.

CARMINATTI, M.; SCARTON, J. C. Sequence stratigraphy of the oligocene turbidite complex of the Campos basin, offshore Brazil: an overview. In: WEIMER, P.; LINK, M. H. (Ed.). **Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems**. New York: Springer, 1991. p.241-246.

CASTRO, D. D. **Morfologia da margem continental Sudeste-Sul brasileira e estratigrafia sísmica do sopé continental**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992. 2 v. Tese (Mestrado).

CLARK, J. D.; KENYON, N. H.; PICKERING, K. T. Quantitative analysis of the geometry of submarine channels: implications for the classification of submarine fans. **Geology**, Boulder, Colo., v. 20, n. 7, p. 633-636, 1992.

_____.; FLOOD, R. D.; PIRMEZ, C.; MANLEY, P. L. Architectural elements and depositional processes of Amazon Deep-Sea Fan imaged by long-range sidescan sonar (GLORIA), bathimetric swath mapping (SeaBeam), high-resolution seismic and piston core data. In: PICKERING, K. T.; HISCOTT, R. N.; KENYON, N. H.; RICCI-LUCCHI, F.; SMITH, R. D. A. (Ed.). **Atlas of deep water environments: architectural style in turbidite systems**. London : Chapman & Hall; Aberdeen: Conoco, 1995. p.105-121.

DAMUTH, J. E.; PIRMEZ, C. The Amazon-HARP fan model: a key to sandy reservoir facies distribution in submarine fans and channel systems. In: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS ANNUAL CONVENTION, 2002, Houston, Tex. **[Proceedings of the]...**Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 2002. 1 CD-ROM.

DEMERCIAN, S.; SZATMARI, P.; COBBOLD, P. R. Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned

gravitational gliding, Campos and Santos basins, offshore Brazil. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 228, n. 3/4, p. 393-422, 1993.

FARRE, J. A.; MCGREGOR, B. A.; RYAN, W. B. F.; ROBB, J. M. Breaching the shelfbreak: passage from youthful to mature phase in canyon evolution. In: STANLEY, D. J.; MOORE, G. T. (Ed.). **The shelfbreak: critical interface on Continental Margins**. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1983. p. 25-39. (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 33).

FLINT, R. F.; SANDERS, J. E.; RODGERS, J. Diamicctite, a substitute term for symmictite. **Geological Society of American Bulletin**, Boulder, Colo., v. 71, n. 12, p. 1809, 1960.

FLOOD, R. D.; DAMUTH, J. E. Quantitative characteristics of sinuous distributary channels on the Amazon Deep-Sea Fan. **Geological Society of American Bulletin**, Boulder, Colo., v. 98, p. 728-738, 1987.

_____.; MANLEY, P. L.; KOWSMANN, R. O.; APPI, C. J.; PIRMEZ, C. Seismic facies and late quaternary growth of Amazon submarine fan. In: WEIMER, P.; LINK, M. H. (Ed.). **Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems**. New York : Springer, 1991. p. 415-434.

_____.; PIPER, D. J. W. ODP, Amazon Fan, Leg 155, Shipboard Scientific Party: Introduction. **Proceedings of the Ocean Drilling Program. Part A, Initial Reports**. College Station, Tex., v. 155, p. 5-16, 1995.

GARFIELD, T. R.; BEAUBOUEF, R. T.; JENNETTE, D. C.; MOHRIG, D. C.; SPRAGUE, A.R. New Insights into the three-dimensional architecture of deep-water facies: the product of a multidisciplinary approach. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. **Program and Abstracts...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2000. p. 1-10.

G.G.G CONSULTORIA LTDA. **Interpretação de dados geofísicos de alta resolução e levantamentos sonográficos na área da Bacia de Campos para a Petróleo Brasileiro S.A., PETROBRÁS**. Rio de Janeiro, 1996. 51 p. Inclui anexos.

HESSE, R.; KLAUCKE, L. A continuous along-slope seismic profile from the Upper Labrador Slope. In: PICKERING, K. T.; HISCOTT, R. N.; KENYON, N. H.; RICCI-LUCCHI, F.; SMITH, R. D. A. (Ed.). **Atlas of deep water environments- architectural style in turbidite systems**. London: Chapman & Hall; Conoco, 1995. p.18-22.

IMBRIE, J. et al. The orbital theory of pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine d18O record. In: BERGER, A.; IMBRIE, J.; HAYS, J.; KUKLA, G.; SALTZMAN, B. (Ed.). **Milankovitch and Climate**. Hingham: D. Reidel, 1984. p.269-305.

KOLLA, V.; COUMES, F. Morphology, internal structure, seismic stratigraphy and sedimentation of the Indus Fan. **American Association of Petroleum Geologists. Bulletin**. Tulsa, Okla., v. 71, p. 650-677, 1987.

KOWSMANN, R. O.; SCHREINER, S.; MURAKAMI, C. Y.; PIAUILINO, P. O.; BARROCAS, S. L. S.; MILLER, D. J.; RIZZO, J. G. Ecofácies de 3,5kHz do talude da Bacia de Campos e do Platô de São Paulo adjacente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., Salvador. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1996. v. 3, p.463-465. Sessões Temáticas.

_____.; MACHADO, L. C. R.; VIANA, A. R.; ALMEIDA JÚNIOR., W.; VICALVI, M. A. Controls on mass-wasting in deep water of the Campos Basin. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 34., 2002, Houston, Tex. **Proceedings of the...** Richardson, Tex.: Offshore Technology Conference, 2002. 1 CD-ROM. Paper 14030.

LANZARINI, W. L.; BARRETO JÚNIOR., A. B.; SANTOS, M. B.; TAVARES, G.; LOPES, H.; PESCO, S. Parametrização e modelagem geométrica de unidades genéticas de sistemas deposicionais turbidíticos. In: SIMPÓSIO SOBRE TURBIDITOS, 1., 1997, Rio de Janeiro. **Anais....** Rio de Janeiro: PETROBRAS. SEREC. CEN-SUD, 1997. p. 97-103.

LOWE, D. R. Sediment gravity flows: II. depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, Okla., v. 52, p. 279-297. 1982.

MACHADO, L. C. R. Sonar characterization of modern subaqueous mass-movement deposits bordering the Brazilian continental slope. In: CONGRESSO INTER-

NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7., 2001, Salvador, BA, **Expanded Abstracts...** Salvador, BA: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2001. v. 2, p.1601-1604, 1 CD-ROM.

_____; KOWSMANN, R. O.; ALMEIDA JUNIOR, W.; MURAKAMI, C. Y.; SCHREINER, S.; MILLER, D. J.; PIAUILINO, P. O. V. Geometria da porção proximal do sistema deposicional turbidítico pleistocênico da Formação Carapebus, Bacia de Campos; Modelo para heterogeneidades de reservatório. In: SIMPÓSIO SOBRE TURBIDITOS, 1., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PETROBRAS. SEREC. CEN-SUD, 1997. p.104-110.

_____; _____. **Geometria da porção proximal do sistema deposicional turbidítico moderno da Formação Carapebus, Bacia de Campos; modelo para heterogeneidades de reservatório.** Macaé: PETROBRAS. E&P-BC. GEXP. GEOMAR, 1998a. 66 p. Relatório interno.

_____; _____. Modern turbidite system in the Campos basin : key to reservoir heterogeneities. In: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS. INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1., 1998b, Rio de Janeiro, **Extended Abstracts...** Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1998b. p. 408-409.

_____; MILLER, D. J.; CASTRO, R. D.; ALMEIDA, C. W.; MACHADO, R. P.; ALMEIDA JUNIOR., W. O Trato de sistemas deposicionais marinhos: o caso do moderno da Bacia de Campos. In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA. 3., 2001, Natal, R.N. . **SINTEX.** Rio de Janeiro: Petrobras. Depex, 2001. 4 p. 1 CD-ROM.

_____, VIANA, A. R., KOWSMANN, R. O., ALMEIDA JUNIOR, W. The modern sediment drainage system of the Campos Basin, Brazil. In: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS. ANNUAL CONVENTION, 2002, Houston, Tex., **[Proceedings of the]...** Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 2002. p. 9-12, 1 CD-ROM. Paper. 43011.

McHARGUE, T. R.; LARUE, D. K.; STELTING, C. ; SCHWELLER, W. The influence of bank cohesion on

submarine channel sinuosity and stability in deep-water slope sediments. In: SLOPE-2003 CONFERENCE - SUBMARINE SLOPE SYSTEMS: PROCESSES, PRODUCTS AND PREDICTION, 2003, Liverpool. **Abstracts ...** London, Geological Society Special Publication. 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 Deepwater Sedimentation.** Los Angeles: Pacific section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1973 p. 1-38.

MUTTI, E. Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: ZUFFA, G. G. (Ed.) **Provenance of Arenites.** Dordrecht : Reidel, 1985. p.65-93 (NATO-ASI Series).

NELSON, C. H.; TWICHELL, D. C.; SCHWAB, W. C.; LEE, H. J., KENYON, N. H. Upper Pleistocene turbidite sand beds and chaotic silt beds in the channelized, distal, outer-fan lobes of the Mississippi fan. **Geology,** Boulder, Colo., v. 20, p. 693-696, 1992.

PERES, W. E. Shelf-fed turbidite system model and its application to the Oligocene deposits of the Campos Basin, Brazil. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin,** Tulsa, Okla., v. 77, n.1, p.81-101, 1993.

PIAUILINO, P. O. V.; MALDONADO, P. R.; FONSECA, L. E. N. Aquisição de dados sonográficos, batimétricos e de perfis de alta frequência na Bacia de Campos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4., 1995; CONFERÊNCIA DA UNIÃO LATINO-AMERICANA DE GEOFÍSICA, 1., 1995, Rio de Janeiro. **Resumos Expandidos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira Geofísica, v. 2, 1995, p. 619-621.

PICKERING, K. T.; HISCOTT, R. N.; KENYON, N. H.; RICCI-LUCCHI, F.; SMITH, R. D. A. (Ed.). **Atlas of deep water environments:** architectural style in turbidite systems. New York: Chapman & Hall, 1995. 333 p.

PIRMEZ, C.; FLOOD, R. D. Morphology and Structure of Amazon Channel. In: FLOOD, R. D.; PIPER, D. J.; KLAUS, A. (Ed.). **Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports,** v.155. p. 23-45, 1995.

RANGEL, H. D.; MARTINS, F. A. L.; ESTEVES, F. R.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Campos: Carta Cronoestratigráfica. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 203-219, 1994.

SILVEIRA, R. L.; ANJOS, M. M.; SILVA, F. G. **Relatório Parcial de Descrição e Análise dos Testemunhos de Piston Core do Sistema Turbidítico Almirante Câmara**. Rio de Janeiro : PETROBRAS. CENPES. PDEP. PROFEX, 2001. 75 f. Relatório interno (RT PROFEX 003/01).

_____.; _____.; _____. **Relatório de Aquisição Sísmica 2D Alta Resolução no Leque de Almirante Câmara**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. PDEP. PROFEX, 2001. 1 v. Relatório interno (RT PROFEX 002/01).

SHANMUGAN, G. Deep-marine facies models and the interrelationship of depositional components in time and space. In: BROWN, G. C.; GORSLINE, D. S.; SCHWELLER, W. J. (Ed.). **Deep-Marine Sedimentation: Depositional Models and Case Histories in Hydrocarbon Exploration and Development**. Bakersfield (Ca) : Society of Sedimentary Geology. , 1990. p. 199-256. (Society of Sedimentary Geology. Pacific Section. Short Course v. 66).

SOUZA-CRUZ, C. E. **Estratigrafia e Sedimentação de Águas Profundas do Neogeno da Bacia de Campos, Estado do Rio de Janeiro, Brasil**. Porto Alegre: UFRGS, 1995 Tese (Doutorado).

TWICHELL, D. C.; SCHWAB, W. C.; NELSON, C. H.; KENYON, N. H.; LEE, H. J. Characteristics of a sandy depositional lobe on the outer Mississippi fan from sea MARC IA sidescan sonar images. **Geology**, Boulder, Colo., v. 20, n. 8, p. 689-692, aug. 1992.

_____.; KENYON, N. H.; PARSON, L. M.; MCGREGOR, B. A. Depositional patterns of the Mississippi fan surface: evidence from GLORIA II and high-resolution seismic profiles. In: WEIMER, P.; LINK, M. H. (Ed.) **Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems**. New York: Springer-Verlag, 1991. p.349-363.

VIANA, A. R. Canyon de São Tomé um exemplo de Canyon submarino moderno em margem atlântica passiva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO QUATERNÁRIO, 2., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, ABEQUA, 1989. 22p. (Relatório n.109-07211).

_____.; ALMEIDA, C. W.; APPI, C. J.; HERCOS, C. M.; MACHADO, L.C. E.; ALMEIDA JUNIOR, W. **Atributos preditivos de sistemas deposicionais de águas profundas do recente da Bacia de Campos: analogia com depósitos do passado geológico**. Macaé: Petrobras. E&P-SSE. SC-ESUB. GEOMAR, 2001. (Projeto CTO. Exploração. PROFEX 600067. Relatório Final). Relatório interno.

_____.; FIGUEIREDO A.; FAUGÈRES J. C.; LIMA A.; GONTHIER E.; BREHME I.; ZARAGOSI, S. The Sao Tome deep-sea turbidite system (southern Brazil Basin): Cenozoic seismic stratigraphy and sedimentary processes. **American Association of Petroleum Geologists. Bulletin**, v.87, n.5, p. 873-894, 2003.

expanded abstract

A modern, vigorous turbidite system has developed at the seafloor of the Campos Basin, offshore SE Brazil, between 1 800 m - 3 000 m isobaths. It cuts through a wide apron of muddy debris overlapping the base of the continental slope (slope apron) and is deposited along an elongated trough formed by salt tectonics. This turbidite system is the modern Carapebus Formation that contains more than 90% of Brazil's petroleum reserves in its buried counterparts.

The system was studied with industry standard 3D seismic and side-scan sonar coverage, with simultaneous sub-bottom 3.5 kHz chirp profiles, with tens of geotechnical boreholes, hundreds of piston cores and thousands of seafloor samples.

The seafloor of the Campos Basin is depicted in figures 1 and 4. Arcosean sands and algal limestones of the Emborê Formation are shown on the continental shelf. The continental slope is composed of mud (silt+clay), and underlying shales of the Ubatuba Formation. Beyond the continental slope, clean deepwater sands of the Carapebus Formation are deposited, competing for space with muddy diamictos originated from the failure of the continental slope.

The gigantic volume of mass wasting deposits (muddy diamictos) bordering the continental slope (debris apron), represents a significant percentage of the Cenozoic sedimentary column of the Campos Basin. The origin of the turbidites is unrelated to the debris-flows or other mass wasting process.

The broad depositional scenario of the basin and its vicinities includes a large divergent-convergent (alveolar) drainage network that encompasses the delta, shelf, slope, diapiric salt province (São Paulo Plateau) and continental rise. Just one branch of this alveolar drainage system is active today, involving the Paraíba do Sul River, the Almirante Câmara Canyon and the Carioca deep-sea channel (the latter beyond the 4 000 m isobath). This work focuses on the portion of this active branch off the Almirante Câmara Canyon, in the adjacent trough where it crosses the São Paulo Plateau.

The more than 40 piston cores taken in this turbidite system show abundant thick-bedded (between 30 and 300 cm) clean sand, with abundant rip-up mud casts (clay chips). These thick-bedded turbidites are indicative of high depositional energy and could be described by Lowe's (1992) sequence for high density turbidity current deposit. A fluvial origin by hyperpycnal flows

during floods cannot be discarded, especially at lowstands of sealevel, when arcosean sands from the exposed continental shelf could be drained by new young tributaries of the Paraíba do Sul River, now drowned. Although most of the deep-water environment of Campos Basin is now draped by a 30cm thick Holocene pelagic marl or ooze, some parts of the turbidite system are not. Thick-bedded turbidite beds recovered by 6 piston cores are of Holocene age, indicating some modern activity of the system.

The turbidite system was deposited in a trough. The trough can be divided into a proximal and distal part, separated from each other by a depositional lobe (figs. 4 and 8). The trough is 3.5 km wide, displays 150 m of relief and, according to the seismic signature, is infilled by a 100 m thick packet of sand.

The vast majority of the canyons of Campos Basin are immature while the Almirante Câmara Canyon is not. It breaches the shelfbreak and was able to capture the river, as depicted by the sinuous gully excavated into its flat 3 km-wide floor (fig. 5). The sonar records show that the turbiditic trough is filled by small sinuous intertwined channels. These small channels are the conduits for sand, since they emanate from the narrow sinuous gully inside the Almirante Câmara Canyon which is responsible for funneling all the sand to deep waters.

The turbidite trough is cut internally by longitudinal, active fault scarps, resulting in benches, scarps and grabens with 10 m of relief, that strongly affect the pathway of the sinuous turbidite channels.

A systematic measurement of the three more conspicuous channels (termed A, B and C) was performed using the sonar and SBP records (figs. 9 and 10). These channels are partially interlaced, braiding and blending into each other. The sinuosity of the three channels is generally very low, between 1.05 and 1.20 and increases downstream with the decrease in gradient (fig. 11). The width / depth ratio increases from 10 to 30 in the downstream direction indicating a downstream trend towards deposition.

Elements within the modern system that are probably present in the deeper levels of Carapebus Formation and are reservoir heterogeneities are: 1) salt-rooted NW-SE trending main fault, with a seafloor relief of more than 50 m, limiting the proximal trough; 2) smaller NW-NE trending faults inside the trough, with more than 10 m of relief that interfere with sedimentation (figs. 6 and 9); 3) anomalous channel of gigantic proportions associated to those smaller

faults; 4) great diamicton tongues (20 x 10 km) whose distal edge partially penetrate the sandy trough from its SW flank ; 5) small debris deposits along the main fault. The anomalous channel (denominated D) presents widths of 700 m and 1 000 m, depths of 14 and 18 m and width / depth ratio of 70.

The invasion by one of the large diamicton tongues emanating from Itapemirim Canyon obstructs the trough, forming a flat dammed area, where the depositional lobe is sited.

The depositional lobe is a heterogeneous ellipse of 10 by 20 km. In the regional analysis of the sonar records the lobe is the most striking feature of the seafloor. It looks very similar to lobes of modern turbidite systems around the world and also to amplitude maps of petroleum reservoirs of the Campos Basin. The lobe is composed by a myriad of sinuous channels that irradiate from a single point (fig. 6). Many channels that traverse more than 60 km of the proximal trough generally terminate at the lobe, often at its extremity. After this long itinerary along the channel, the turbidity currents deposit a kind of mouth bar, with a horn (clarinet) or bulbous shape.

This bulb resembles a deltaic mouth bar of a river-dominated delta, with the current flowing along the entire length of the channel, depositing only at the very end, after eroding the previous deposit. The bulbs superpose and merge in progradation, with its progressive advance building an elongated bar, like a flat finger (beginning of fig 7). This continuous progradation of the bulb is sometimes interrupted by an avulsion of the channel. These processes of progradation and avulsion repeat countless times, building the radial pattern of the depositional lobe. The lobe is composed of bulbs and its channels (lobe channels).

The lobe channels are sandy and so are their levees. The levees are non-cohesive because they have poor clay content. As the sand is not cohesive, the sandy levees permit intense avulsion. The non-cohesive levee is incapable of limiting the flow, offering no resistance to turbulence and so are easily breached, preventing the development of high sinuosity. The lobe channels are usually straight, with sinuosity close to 1.

The infill of the lobe-channels (channel-fill) clearly post-date the excavation of the channel, and is related to a progradation of another lobe front (bulbs). The latter has taken another path and comes from another direction and fills the depression of the former channel. On the other hand, repeated incision of the same

channel is very common resulting, in cross-section, in a composite channel.

The systematic mapping of the turbidite architectural elements has evolved to a hierarchical classification of autocyclical features, namely bulb, lobe and fan. The fan is built of lobes and the lobe is made up of bulbs. As depicted in the larger turbidite systems exemplified by the modern Mississippi, Amazon and Indus, the submarine fan is the large feature with an ellipsoid shape which involves the deposition of mass movement deposits, fan channels (classical channel levee) and many depositional lobes. The classical channel-levees are not present in the Modern Carapebus Formation.



Luís Cláudio Ribeiro Machado

Exploração e Produção

Unidade de Serviço Submarino

Geologia Marinha

e-mail: machadolc@petrobras.com.br

Luís Cláudio Ribeiro Machado envolveu-se com sedimentologia descrevendo afloramentos e testemunhos entre 1983 a 1996. Começou como bolsista de iniciação científica no CIGO (Centro de Investigação do Gondwana) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde se graduou como geólogo em 1985. Concluiu, em 1989, o mestrado em Sedimentologia / Análise de Bacias na Universidade Federal de Ouro Preto, estudando o Grupo Itararé. Ao ingressar na Petrobras em 1988 foi encaminhado ao laboratório de rochas de Macaé para descrever turbiditos, após uma etapa como geólogo de poço nas bacias de Campos e Potiguar. Desde 1996 integra o grupo de Geologia Marinha da Petrobras, onde trabalha com a vasta gama de ferramentas típicas da atividade e pode se dedicar ao estudo da geologia regional. Nesse novo grupo teve a oportunidade de caracterizar a existência do sistema turbidítico moderno da Formação Carapebus em 1997, cuja descrição é apresentada neste estudo.

