

Arquitetura de reservatórios de águas profundas

Architecture of deep-water reservoirs

Marco Antônio Schreiner Moraes | Paulo Roberto Blaskovski | Paulo Lopes Brandão Paraizo

resumo

A integração de observações de subsuperfície com dados de sistemas análogos (afloramentos e sistemas recentes) permite classificar os reservatórios de águas profundas em três tipos básicos de arquitetura, denominados: (1) complexos de canais discretos; (2) complexos de canais amalgamados; e (3) complexos de canais distributários e lobos. O primeiro tipo se caracteriza pelo empilhamento vertical ou oblíquo de corpos de preenchimento de canal, originando corpos espacialmente segregados. O segundo é formado pela amalgamação lateral de canais, que origina extensos corpos com geometria externa lobada ou tabular, mas que são internamente canalizados. Os complexos de canais distributários e lobos são formados por uma rede de canais distributários rasos associados a lobos laterais (*spills*) e frontais (terminais). Em termos de fácies, os complexos de canais discretos são constituídos por depósitos grossos de preenchimento de canal intercalados com fácies de granulometria mais fina de extravasamento. Os complexos de canais amalgamados formam espessos pacotes de arenitos pouco estratificados, com poucas intercalações de finos, enquanto nos complexos de lobos ocorre maior preservação do topo estratificado das camadas arenosas e dos sedimentos finos intercalados. Quanto a dimensões, uma hierarquia de elementos de arquitetura é

registrada, incluindo (1) elementos individuais, (2) elementos compostos, e (3) complexos. Inicialmente definida para canais, a mesma hierarquia tem sido reconhecida em complexos de lobos. É possível relacionar as hierarquias de elementos de arquitetura com as ordens da estratigrafia de alta resolução. Comumente, os elementos individuais podem ser associados a unidades de 6ª ordem, os elementos compostos a unidades de 5ª ordem e os complexos a unidades de 4ª ordem. Os três tipos de reservatórios aqui apresentados são comuns nas bacias da costa brasileira e são encontrados em diferentes idades. No Cretáceo e no Terciário Inferior predominam complexos de canais amalgamados formando espessas seqüências em calhas formadas pela tectônica salífera. No Terciário Superior (Oligoceno - Mioceno), complexos de lobos ocupando minibacias são mais comuns, formando os principais reservatórios de campos como Marlim e Marlim Sul. A identificação dos tipos de arquitetura é importante para a coleta e organização das informações sobre a geometria, dimensões e heterogeneidade dos reservatórios, utilizadas nos procedimentos de caracterização, modelagem e gerenciamento.

(originais recebidos em 04.04.2006)

Palavras-chave: arquitetura | reservatórios | águas profundas | turbiditos | heterogeneidades

abstract

The integration of subsurface observations with analog data (outcrop and modern systems) permits three basic architectural types of deep-water reservoirs to be defined; which are: (1) discrete-channel complexes, (2) amalgamated-channel complexes, and (3) distributary-channel and lobe complexes. Discrete-channel complex is the type of deep-water reservoir in which channel fills occur as spatially segregated (discrete) elements. Amalgamated-channel complexes are reservoirs formed by laterally-stacked shallow channels. Distributary-channel and lobe complexes are formed by a network of radial distributary channels and associated lateral (spill) and frontal (terminal) lobes. In terms of facies, discrete channel complexes are characterized by the intercalation of thick-bedded, coarse-grained channel-fill deposits, and thin-bedded, fine-grained overbank deposits. Amalgamated channel complexes are characterized by thick sandstone sequences, with relative absence of fine-grained overbank deposits, while lobe complexes present a better preservation the upper parts of the sand beds, including the interbedded fines. A repetitive hierarchy of architectural elements has been recognized, including (1) individual elements, (2) composite elements, and (3) complexes. Although initially defined for channel complexes, such hierarchy has also been observed in lobe complexes. In addition, the hierarchical scheme can also be related to the different orders of high-resolution stratigraphy. In most cases individual elements would commonly be found within 6th-order units, and composite elements within 5th-order units. 4th-order units would then envelope channel and/or lobe complexes. The three reservoir types presented here are common in the basins of the Brazilian continental margin. Even though all types are found at different ages, in the Cretaceous and Lower Tertiary (Paleocene-Eocene), narrow troughs generated by salt-tectonics are predominantly filled by amalgamated-channel complexes, which form the main reservoirs of fields like Namorado, Carapeba, Roncador, Jubarte, among others. In the upper Tertiary (Oligocene-Miocene), where salt tectonics generated a mini-basin morphology, large lobe complexes are found in fields like Marlim, Marlim Sul, and others. The recognition and differentiation of the different reservoir architectural styles is useful to collect and organize information about the reservoir

external geometry and internal heterogeneities, to guide the construction of three-dimensional models, and to orient reservoir management.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: architecture | reservoirs | deep water | turbidites | heterogeneity

introdução

Reservatórios depositados por fluxos gravitacionais em águas profundas contêm a maior parte das reservas de petróleo da margem continental brasileira, principalmente na Bacia de Campos. A distribuição e o deslocamento de fluidos no interior dos reservatórios são significativamente controlados (1) pela forma (geometria) dos corpos sedimentares, e (2) pelo arranjo (arquitetura) espacial destes corpos. Por isso, é necessário que, durante os procedimentos de modelagem de reservatórios, cada unidade (zona ou sub-zona) de produção seja representada utilizando parâmetros que descrevam adequadamente suas características de geometria e arquitetura. Os modelos de reservatório são confeccionados a partir de dados de subsuperfície (sísmica, perfis, testemunhos) obtidos diretamente no reservatório, complementados por modelos geológicos conceituais e parâmetros dimensionais, obtidos em sistemas análogos (afloramentos e sistemas deposicionais recentes). A principal razão para se utilizar sistemas análogos é a possibilidade de se complementar as lacunas dos dados de subsuperfície originadas pelo espaçamento entre poços (que pode ser de vários quilômetros em campos de águas profundas) e pelos limites de resolução sísmica. A correta integração de dados de subsuperfície com dados de sistemas análogos propicia um significativo aumento na confiabilidade dos modelos geológicos utilizados nos procedimentos de caracterização, modelagem e gerenciamento do reservatório.

Uma série de informações sobre as características de geometria e arquitetura de reservatórios de águas profundas, assim como um extenso

acervo de parâmetros dimensionais, foram reunidos, nos últimos anos, por vários projetos de pesquisa desenvolvidos pela Petrobras (Moraes *et al.* 2000, 2001, 2004). Estes projetos internos foram complementados por estudos de afloramentos análogos realizados por projetos multi-clientes (ver detalhes em Joseph *et al.* 2000; Clark, 1998, 1999; Gardner *et al.* 2000, 2003; Gaumet *et al.* 2004; Flint *et al.* 2002), aos quais foram adicionados dados de sistemas recentes (Machado *et al.* 2004), além de dados obtidos na literatura (Eschard e Doligez, 1993; Clark e Pickering, 1996). Esta extensa base de dados e modelos permite que se façam algumas generalizações sobre as características de geometria e arquitetura dos reservatórios de águas profundas, gerando-se uma tipologia e um esquema hierárquico que servem para: (1) orientar a aplicação dos conhecimentos e bancos de dados já disponíveis na caracterização dos reservatórios de subsuperfície, (2) organizar a coleta de informações adicionais em sistemas análogos, e (3) contribuir para a melhor compreensão dos sistemas deposicionais que formam esses reservatórios.

tipos de reservatórios

A integração de dados de diversos afloramentos e sistemas recentes com observações de subsuperfície permite o estabelecimento de uma classificação dos reservatórios de águas profundas consistindo em três tipos básicos de arquitetura (fig. 1), sendo eles:

- 1- complexos de canais discretos;
- 2- complexos de canais amalgamados;
- 3- complexos de canais distributários e lobos.

Esta classificação é muito simples e puramente descritiva. Ainda assim, ela tem se revelado de grande utilidade para organizar as observações e orientar os procedimentos de quantificação dos dados de afloramentos e sistemas recentes, por salientar adequadamente os contrastes básicos que diferenciam os principais tipos de reservatórios de águas profundas. Da mesma forma, pode-se utilizar a mesma abordagem nos processos

de caracterização, modelagem e gerenciamento dos reservatórios de subsuperfície.

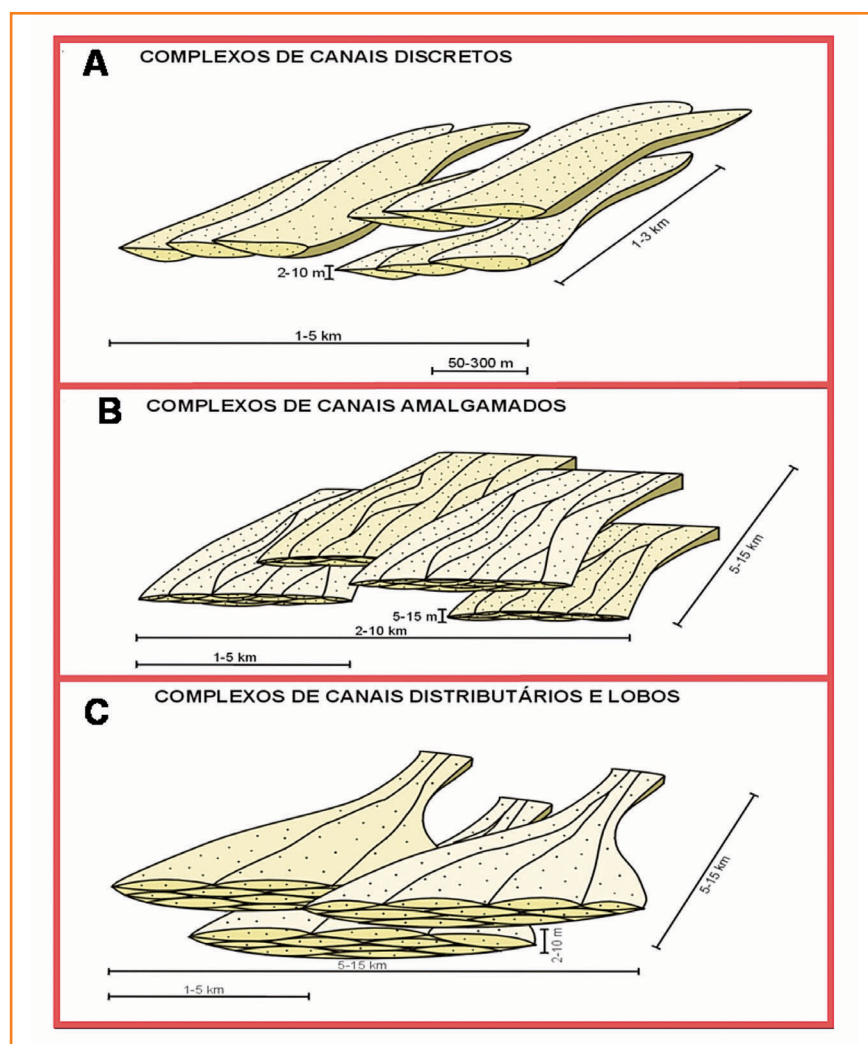
Nesse contexto, os complexos de canais discretos (fig. 1) representam o caso em que o elemento canal ou, mais especificamente, os corpos de preenchimento de canal, aparecem espacialmente segregados. Isto acontece principalmente nas situações em que os canais se empilham vertical ou obliquamente. Nesse tipo de reservatório, os parâmetros de dimensão, extensão, sinuosidade, assim como o padrão de empilhamento dos canais são os mais críticos para o controle da distribuição espacial das heterogeneidades e, conseqüentemente, do escoamento de fluidos em seu interior. Por isso, tais parâmetros devem constituir o foco principal das investigações e da definição de critérios para a interpretação e modelagem deste tipo de reservatório (Moraes *et al.* 2000a, 2000b, 2001, 2004).

Figura 1

Tipos de reservatórios de águas profundas classificados segundo padrões básicos de geometria e arquitetura.

Figure 1

Architectural types of deep-water reservoirs.



Na figura 2 apresenta-se um exemplo de um complexo de canais discretos da Formação Brushy Canyon, do Permiano do Texas (Gardner *et al.* 2000, 2003). Esta imagem, que apresenta extensões horizontais e verticais comparáveis às de uma seção típica de um reservatório de subsuperfície, mostra claramente que os limites e a proporção dos corpos de preenchimento de canais são os principais controladores do escoamento de fluidos. São também marcantes, na imagem, as significativas variações laterais que ocorrem a distâncias relativamente curtas, o que constitui outra característica importante dos reservatórios de canais discretos.

Em termos de conectividade, os complexos de canais discretos apresentam uma intrincada rede de corpos alongados segundo a direção deposicional, parcialmente segregados, mas geralmente conectados no espaço tridimensional. Por isso, as informações sobre largura, espessura, comprimento e tortuosidade dos corpos de preenchimento dos canais são tão importantes para sua caracterização e modelagem (Bruhn e Moraes, 1989; Moraes *et al.* 2004). Evidentemente, a conectividade depende da proporção arenito/folhelho (*net-to-gross ratio*). Reservatórios com alta proporção de arenitos tendem a apresentar boa conectividade, mesmo com canais discretos. No entanto, mesmo nesse caso, a estrutura espacial dos corpos deve ser muito bem caracterizada, pois o movimento dos fluidos no interior do reservatório vai ser controlado pela posição e orientação dos eixos dos canais.

O segundo tipo de reservatório de águas profundas, os complexos de canais amalgamados

(fig. 1), representa o caso em que o sistema é dominado por canais relativamente rasos, caracterizados por freqüente migração lateral. A predominância de amalgamação lateral pode ocorrer tanto em sistemas de baixa sinuosidade (que desenvolvem um padrão entrelaçado – *braided*), ou em sistemas de alta sinuosidade (que desenvolvem elementos de acreção lateral – *lateral accretion packages*). Nos canais amalgamados o componente de empilhamento vertical ou oblíquo é muito menor do que o de justaposição lateral. Ao invés de corpos arenosos discretos, o reservatório é constituído por extensos corpos de arenito com geometria externa lobada ou tabular, mas que se apresentam internamente canalizados. Em alguns casos, lobos de extravasamento lateral (*spill lobes*) podem aparecer associados às margens dos corpos de preenchimento de canal. Esses corpos são também muito arenosos, mas apresentam uma geometria mais tabular (Joseph *et al.* 2000; Gardner *et al.* 2003).

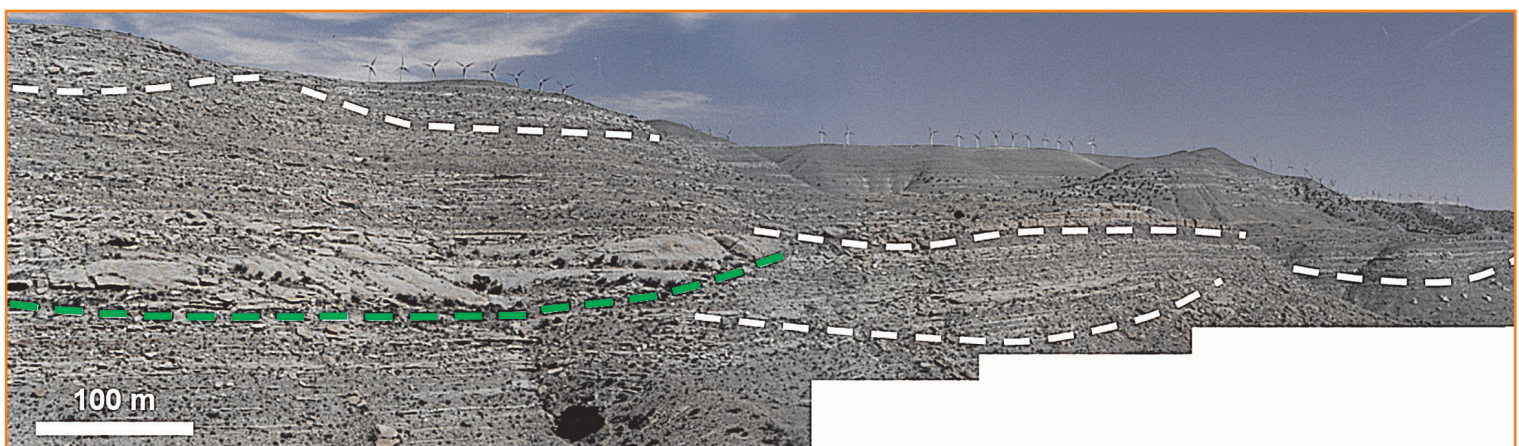
Na figura 3 apresenta-se um exemplo de canais amalgamados da Formação Brushy Canyon. Os corpos de preenchimento de canal são claramente observáveis, assim como seu padrão de amalgamação predominantemente lateral. O resultado desse processo de intensa amalgamação são reservatórios com geometria externa tabular ou lobada (em seção), comumente delimitados externamente por camadas contínuas de material fino representando níveis de condensação (Moraes *et al.* 2000). No interior da seqüência, observa-se a ocorrência de barreiras de permeabilidade descontínuas, devido à erosão pelos canais. Desse modo, embora as dimensões dos canais

Figura 2

Fotomosaico de um complexo de canais discretos da Formação Brushy Canyon, do Permiano do Texas (localidade de Popo Canyon). A feição de canal à esquerda (tracejado em verde) apresenta cerca de 600 m de largura.

Figure 2

Photomosaic of a discrete-channel complex of the Brushy Canyon Formation (Permian, West Texas) at the Popo Canyon locality. The channel feature marked in green on the left side is 600 meters wide.



ainda sejam um parâmetro importante, a heterogeneidade mais crítica deste tipo de reservatório passa a ser a extensão das barreiras de permeabilidade internas, que pode ser quantificada em afloramentos e assim incorporada aos processos de caracterização e modelagem (Moraes *et al.* 2001, 2004). A conectividade no interior dos complexos de canais amalgamados tende a ser alta devido à amalgamação dos corpos arenosos. Nesse caso, a proporção e a extensão das barreiras de permeabilidade são o aspecto mais relevante no controle do movimento de fluidos no interior do reservatório. A distribuição das barreiras de permeabilidade controla principalmente a conectividade vertical (Moraes *et al.* 2004). É importante registrar que, ainda que descontínuas, se as barreiras forem freqüentes e apresentarem certa continuidade (de várias centenas de metros, por exemplo), elas podem causar importante redução na permeabilidade vertical e assim afetar significativamente o comportamento do reservatório. Finalmente, no que se refere aos canais, tem sido também observado que, mesmo em situações de amalgamação de areia com areia, a orientação destes ainda introduz uma considerável anisotropia no sistema. Isto parece se dever ao fato de que as bordas dos canais, mesmo que muito arenosas, são regiões de contraste de fácies, e mesmo de acumulação de delgadas lentes de material fino (*by pass drapes*), ou de concentração de cimento diagenético. Ou seja, a orientação dos canais é um importante parâmetro a ser determinado na caracterização de reservatórios deste tipo.

Os complexos de canais distributários e lobos (fig. 1), por sua vez, representam a região onde se dá a transição canal-lobo, sendo caracterizados por um sistema proximal de canais distributários rasos, aos quais comumente aparecem associados lobos de extravasamento lateral (*spill lobes*), e que alimentam lobos frontais (terminais) com pequena espessura e grande extensão lateral. Na figura 4 apresenta-se um exemplo de complexo de lobos da Formação Brushy Canyon. Note que o sistema é dominado por camadas com geometria de aspecto tabular. Observa-se, no entanto, que existem suaves variações de espessura que indicam que os corpos represen-

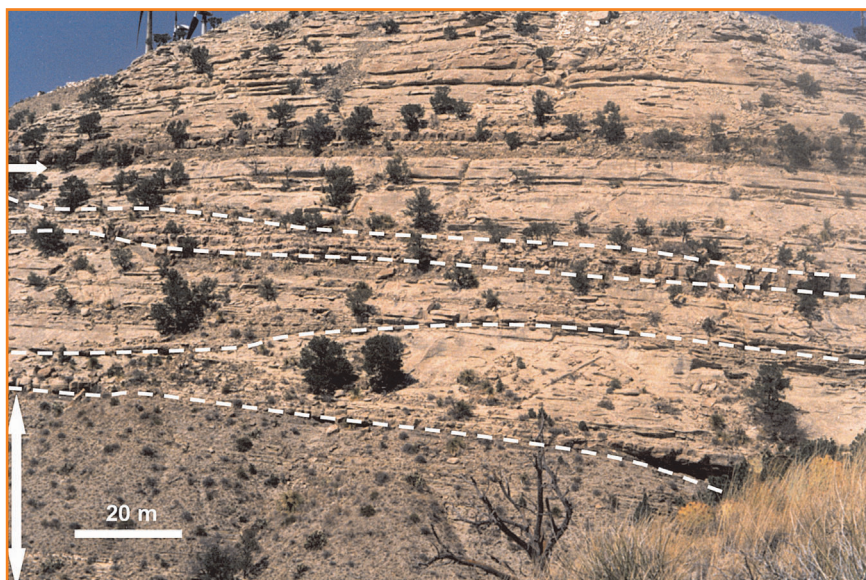


Figura 3 – Detalhe da organização interna de um complexo de canais amalgamados da Formação Brushy Canyon (afloramento de Buena Vista). Note as barreiras de permeabilidade (litologias mais escuras) descontínuas. As setas marcam zonas de condensação de 4ª (seta vertical) e 5ª (seta horizontal) ordens.

Figure 3 – Internal organization of an amalgamated-channel complex of the Brushy Canyon Formation in the Buena Vista locality. Internal dark lithologies correspond to permeability barriers. Arrows mark condensed zones of 4th- (vertical arrow) and 5th- (horizontal arrow) order.

tam lentes muito extensas, e não corpos efetivamente tabulares. O aspecto tabular dos complexos de lobos em afloramentos se deve, principalmente, à baixa relação entre espessura e largura dos lobos, que é da ordem de 1:1000 (Moraes *et al.* 2004), o que torna difícil visualizar a geometria de lobos em exposições com algumas centenas de metros de extensão, como é o caso da figura 4. Outros aspectos observáveis nesta figura são a ausência de feições erosivas na base das camadas e a grande continuidade das barreiras de permeabilidade. Ou seja, há poucas canalizações (erosões internas) no sistema, com a consequente preservação dos depósitos finos que ocorrem entre as camadas arenosas.

Em termos de conectividade, aqui também, como no caso anterior, devido à grande amalgamação dos corpos, as barreiras de permeabilidade representam as principais heterogeneidades que controlam o comportamento dos reservatórios. Nos complexos de lobos, a conectividade lateral tende a ser alta, com menor anisotropia horizontal. No entanto, nesse caso ocorre um aumento progressivo da freqüência e

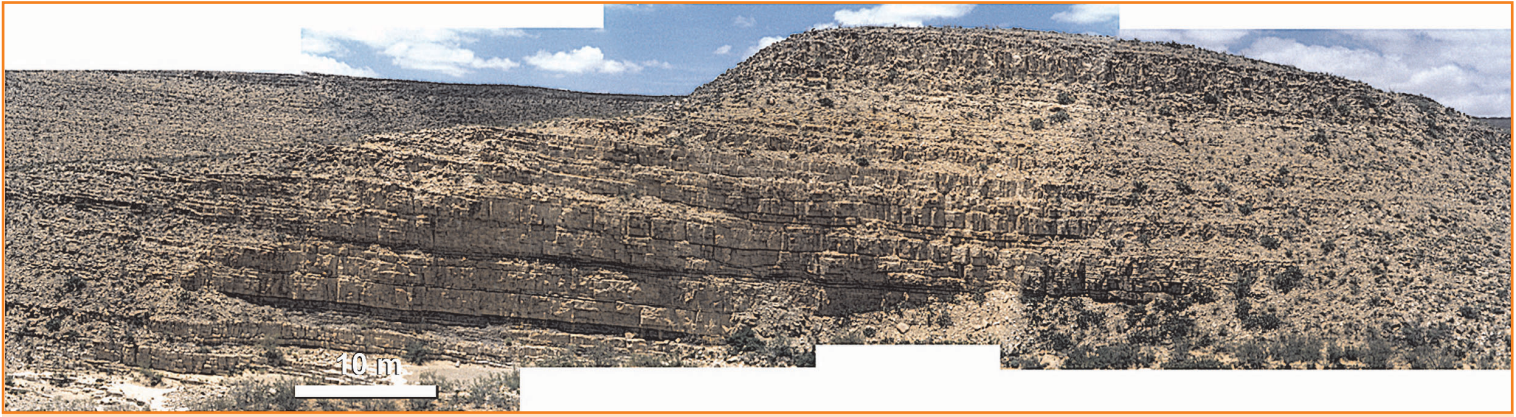


Figura 4 – Complexo de lobos da Formação Brushy Canyon na localidade de Codorniz Canyon. Note a maior continuidade e freqüência das barreiras de permeabilidade, se comparado com o afloramento da figura 3, embora ambos apresentem proporções de areia semelhantes. Extraída de Gardner et al. (2000).

Figure 4 – Photomosaic of a lobe complex deposit of the Brushy Canyon Formation at the Codorniz Canyon. Note that permeability barriers (dark layers) are much more continuous than in the outcrop of figure 3, despite both showing the same proportion of sand. From Gardner et al. (2000).

continuidade das barreiras de permeabilidade no sentido proximal-distal. Nas áreas com muitos canais distributários, as barreiras são ainda descontínuas, mas na medida em que predominam lobos frontais, a tendência é ocorrer uma grande redução na permeabilidade vertical, mesmo em áreas com proporção elevada de arenitos.

associações de fácies

Nos estudos de caracterização de reservatórios, a comparação entre as associações de fácies observadas nos afloramentos com as associações de fácies que ocorrem em subsuperfície pode ser utilizada para se inferir a geometria externa e as heterogeneidades internas dos reservatórios. Existem alguns critérios simples para se vincularem associações de fácies com padrões geométricos que podem ser utilizados numa primeira abordagem para a diferenciação dos principais estilos de arquitetura. Embora sejam relativamente simples, esses critérios têm se revelado muito eficazes, o que torna ainda mais importante se testemunhar adequadamente os reservatórios, desde o início da vida de um campo.

Nos complexos de canais discretos, a ocorrência de intercalações entre fácies de preenchimento de canais e fácies de *overbanks* constitui a feição mais diagnóstica (fig. 5a). Numa seção

vertical típica, observa-se intercalação de corpos espessos (métricos ou decamétricos) dominados por arenitos e/ou conglomerados maciços (ou com gradação normal) que representam os depósitos de canais, com níveis heterolíticos onde ocorrem corpos delgados de arenitos apresentando estratificação horizontal e *ripples* (divisões B e C da Seqüência de Bouma), siltitos, lamitos, e outras fácies de granulometria fina, que representam os depósitos de *overbanks*. Outro aspecto comum dos depósitos de canais discretos é a riqueza em intraclastos de folhelho, que é previsível (e diagnóstica) de um ambiente onde os processos erosivos são freqüentes.

A principal característica das associações de fácies de complexos de canais amalgamados é a formação de espessos pacotes de arenitos pouco estratificados, com poucas intercalações de folhelhos ou níveis heterolíticos, conforme pode ser observado na figura 5b. Sua distinção dos complexos de canais discretos é relativamente fácil em função da maior homogeneidade granulométrica, menor teor de intraclastos e menor desenvolvimento de fácies de granulometria mais fina de *overbank*. Ainda assim, devido ao alto grau de canalização, intraclastos de folhelhos são bastante comuns, assim como a amalgamação erosiva (truncamento do topo das camadas).

A associação de fácies classicamente vinculada a depósitos de lobos é a Seqüência de Bouma, que é normalmente produzida por fluxos de

baixa densidade com carga relativamente fina (Lowe, 1982). Com o reconhecimento da importância das correntes de turbidez de alta densidade (*high-density turbidity currents* – HDT, Lowe, 1982), também denominadas fluxos gravitacionais concentrados (Mulder e Alexander, 2001), complementado por observações em afloramentos, considera-se que arenitos não-estratificados, comumente exibindo gradação normal, sejam componentes importantes dos lobos (Bruhn, 1998; Gardner *et al.* 2000; Moraes *et al.* 2000; Flint *et al.* 2002). Muitas vezes, em sistema com granulometria mais homogênea, ou de deposição muito rápida, não ocorre o desenvolvimento completo da Seqüência de Bouma. Assim sendo, conforme apresentado na figura 5c, os depósitos de lobos se diferenciam dos depósitos de canais amalgamados por apresentarem menores espessuras e granulometria mais fina, e pela maior preservação de intercalações de sedimentos finos que, nesse caso, se tratam de depósitos hemipelágicos (folhelhos, margas e calcilutitos), e não de depósitos de *overbanks*.

Além disso, a quantidade de intraclastos de folhelhos tende a diminuir ao se deslocar de ambientes mais canalizados (maior energia e erosão) para ambientes dominados por lobos (menor energia e erosão). Deve-se ressaltar, no entanto, que a parte proximal dos complexos de lobos (dominada por canais distributários, e representando a zona de transição canal-lobo), pode ser semelhante, do ponto de vista faciológico, aos complexos de canais amalgamados. Nesse caso, a análise do contexto geológico deve ser utilizada para complementar sua diferenciação.

hierarquia dos elementos de arquitetura

As heterogeneidades de reservatório ocorrem em diferentes escalas, e esta hierarquia de escalas deve ser devidamente compreendida para que os processos de interpretação e modelagem sejam adequadamente conduzidos. As observações em sistemas análogos permitem o estabelecimento

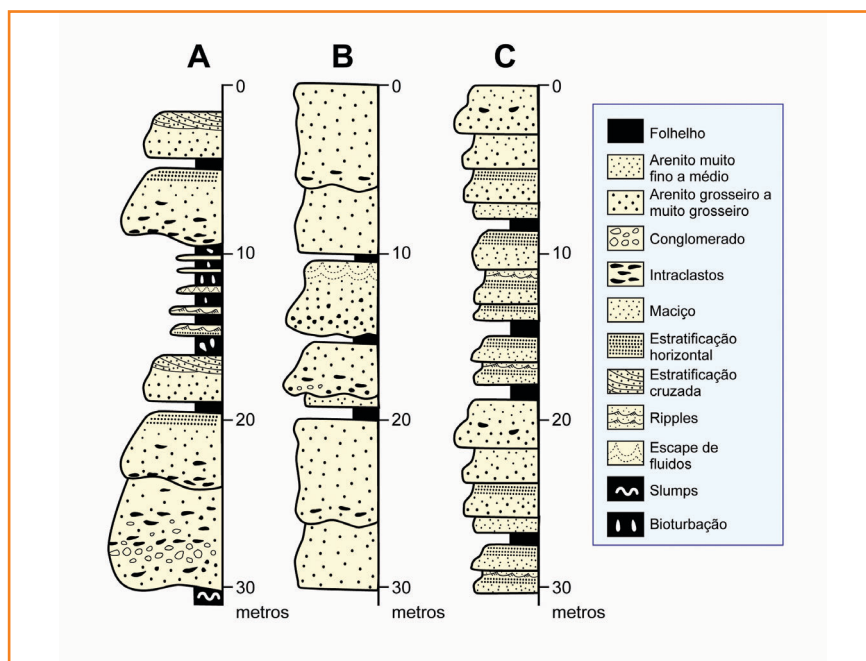


Figura 5

Associações de fácies típicas de (A) complexos de canais discretos; (B) complexos de canais amalgamados; e (C) complexos de lobos.

Figure 5

Facies associations typical of (A) discrete channel complexes; (B) amalgamated channel complexes; and (C) distributary-channel and lobe complexes.

de pelo menos três ordens de organização hierárquica dos elementos de arquitetura, exemplificadas para o caso de canais da figura 6. A primeira ordem, referente aos elementos de menor porte, é constituída pelos elementos individuais. No caso dos canais, esta ordem representa os menores elementos que se enquadram na definição de canal como uma “feição fisiográfica de relevo negativo que serviu de conduto de sedimentos por um tempo relativamente longo” (Mutti e Normark, 1987). Ou seja, são aqui enquadrados como elementos de arquitetura feições que tenham expressão fisiográfica definida, que podem ser reconhecidas, por exemplo, com o uso de dados sísmicos. Elementos menores, geralmente associados aos limites das litofácies (Pickering *et al.* 1995), não são aqui considerados como elementos da arquitetura. Definições equivalentes às utilizadas para os canais podem ser aplicadas para outros elementos na mesma escala, principalmente lobos, que são, juntamente com os canais, os principais elementos de arquitetura dos sistemas arenosos de águas profundas (Moraes *et al.* 2001).

Na figura 7 se apresenta um exemplo de canal individual da Formação Brushy Canyon, do Permiano do Texas. Note que diferentes fácies, que normalmente ocorrem associadas às sucessivas fases (*cut – fill – spill*) da formação do canal

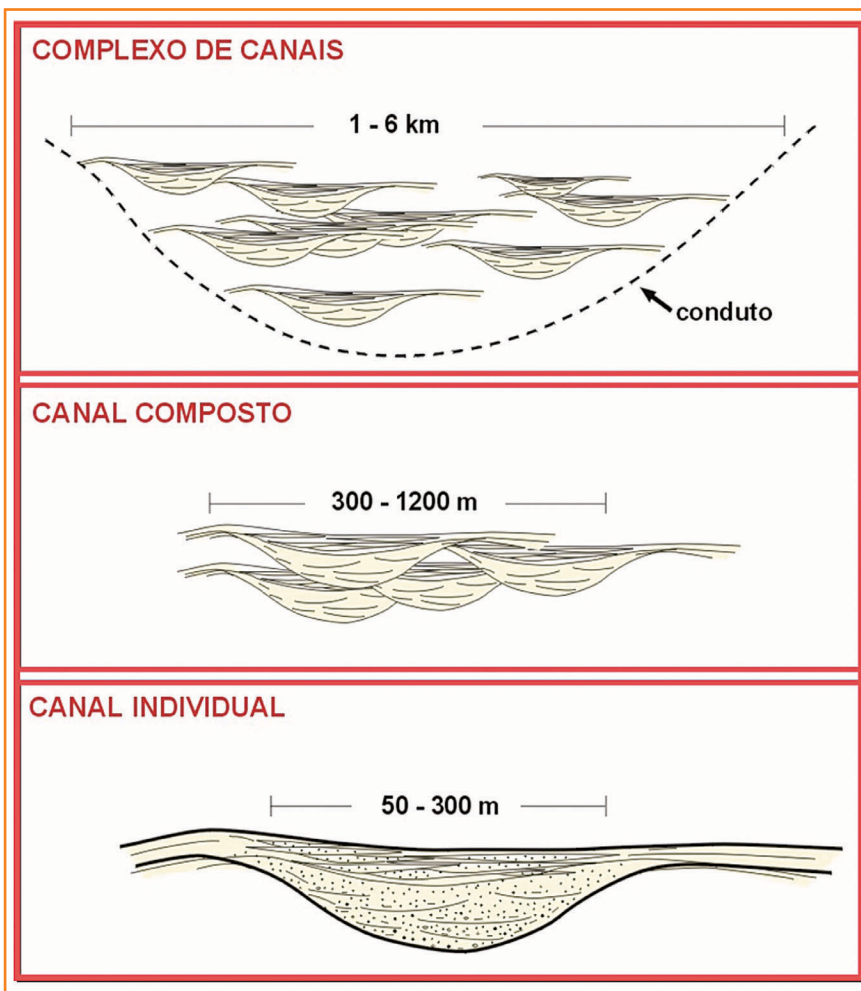


Figura 6 – Hierarquia de elementos de arquitetura observada em reservatórios de águas profundas, com exemplos dos complexos de canais discretos. Note que cada nível de hierarquia apresenta um intervalo de dimensões específico.

Figure 6 – Hierarchy of architectural elements observed in deep-water reservoirs, using the examples of discrete-channel complex. Note that each hierarchical level refers to a specific set of dimensions.

(representando níveis de energia deposicional decrescente) têm suas extensões máximas limitadas pela extensão do próprio canal (com exceção dos depósitos de extravasamento-*spills* - que se estendem pela região intercanais). Assim, os elementos de arquitetura podem ser, de certa forma, vinculados, e servirem de envoltórias para associações de fácies características. Os canais individuais apresentam tipicamente larguras da ordem de 50 m a 300 m, e espessuras da ordem de 10 m a 20 m.

A segunda ordem na hierarquia de elementos de arquitetura refere-se aos elementos compostos, resultantes do empilhamento de vários elementos individuais. Essa feição é comum nos complexos de canais discretos, tal como é apresentado na figura 8 (detalhe da fig. 2). Neste caso, o empilhamento oblíquo de três canais individuais dá origem a um corpo maior, denominado canal composto, o qual também apresenta geometria externa típica de canal, embora esta represente uma composição de várias superfícies erosivas, não uma superfície única. Os canais compostos, com larguras típicas da ordem de 300 m a 900 m, e espessuras de algumas dezenas de metros, são a feição de canal mais freqüentemente detectada na sísmica (veja exemplos no capítulo sobre reservatórios brasileiros), sendo que sua ocorrência constitui um critério muito usado para a identificação dos reservatórios do tipo complexo de canais discretos em subsuperfície. Os elementos compostos são mais difíceis de se detectar nos complexos de canais amalgamados e lobos devido à grande

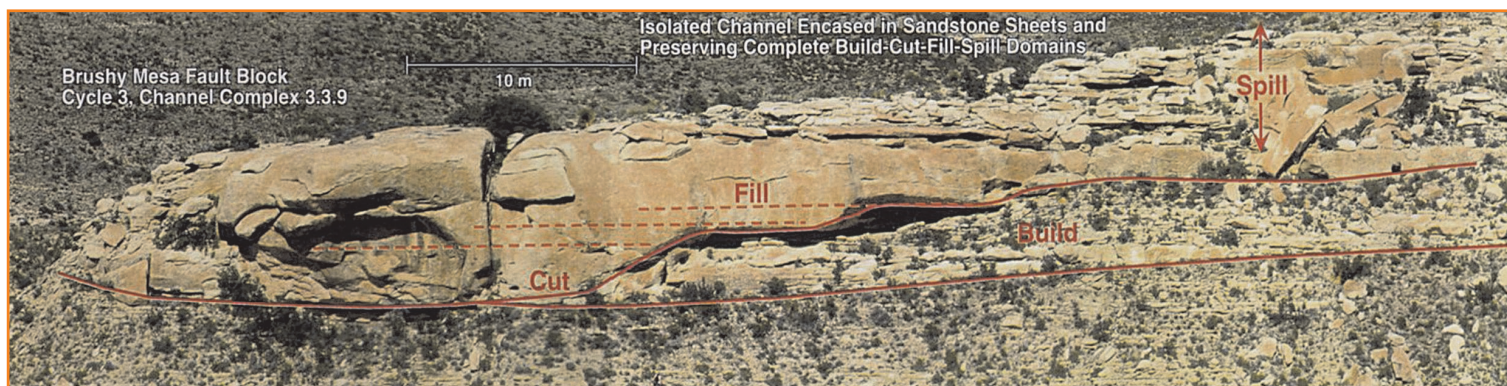


Figura 7 – Fotografia de canal individual da Formação Brushy Canyon (localidade de Brushy Mesa). Extraída de Gardner et al. (2000).

Figure 7 – Individual channel of the Brushy Canyon Formation. Extracted from Gardner et al. (2000).

amalgamação dos corpos individuais. Nesse caso, inclusive, sua distinção é menos relevante, por não controlarem, pelo menos diretamente, as propriedades mais críticas para o comportamento do reservatório (ou seja, a continuidade das barreiras de permeabilidade).

Os limites dos complexos (e dos conjuntos de complexos – denominados de condutos) podem consistir em superfícies erosivas, principalmente nas regiões mais proximais (*canyons* ou calhas), ou, simplesmente, representarem regiões topograficamente mais baixas, onde se concentrou a sedimentação arenosa. Tanto em afloramentos quanto em subsuperfície, o topo dos complexos costuma ser limitado por zonas de condensação (folhelhos ou margas, que representam paradas na sedimentação arenosa), e tendem a apresentar grande extensão lateral.

relação entre as hierarquias deposicional e estratigráfica

Um aspecto relevante para a caracterização de reservatórios é se fazer uma vinculação entre as escalas da análise de arquitetura e as várias ordens da Estratigrafia de Sequências. Estas últimas são freqüentemente utilizadas para estabelecer o zoneamento dos reservatórios. A referida vinculação é apresentada na figura 9. Evidentemente, esta vinculação deve ser ajustada de acordo com as variações na taxa de sedimentação. As relações apresentadas na figura 9 são válidas principalmente para os reservatórios oligocênicos-miocênicos da Bacia de Campos, assim como para os afloramentos análogos mais utilizados, como a Formação Brushy Canyon, do Permiano do Texas (Gardner *et al.* 2000), o Arenito Annot, do SE da França (Joseph *et al.* 2000), a Formação Pab, do Maastrichtiano do Paquistão (Gaumet *et al.* 2004), e o Supergrupo Karoo, da África do Sul (Flint *et al.* 2002), todos apresentando taxas médias de sedimentação (após compactação) estimadas em torno de 10 cm/1 000 anos. Conforme pode ser deduzido da figura 9, as

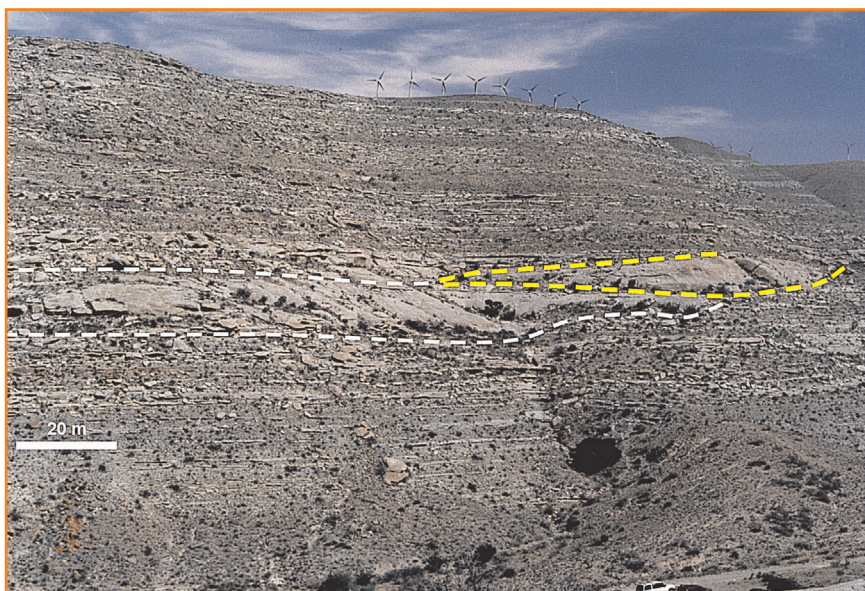


Figura 8

Outra imagem dos canais discretos da Formação Brushy Canyon apresentados na figura 2. Note que a principal feição de canal se trata de um canal composto com cerca de 600 m de largura. Em seu interior são identificados canais individuais menores (como o marcado em amarelo) com largura em torno de 200 m. As paleocorrentes são ligeiramente oblíquas, para a esquerda, no sentido do afloramento.

Figure 8

Another view of the discrete channels of the Brushy Canyon Formation shown in figure 2. Note that the main channel feature, which is around 600 meter wide, is composed of smaller individual channels (like the one marked in yellow), which are around 200 meter wide. Paleoflow is slightly oblique (to the left) towards the outcrop face.

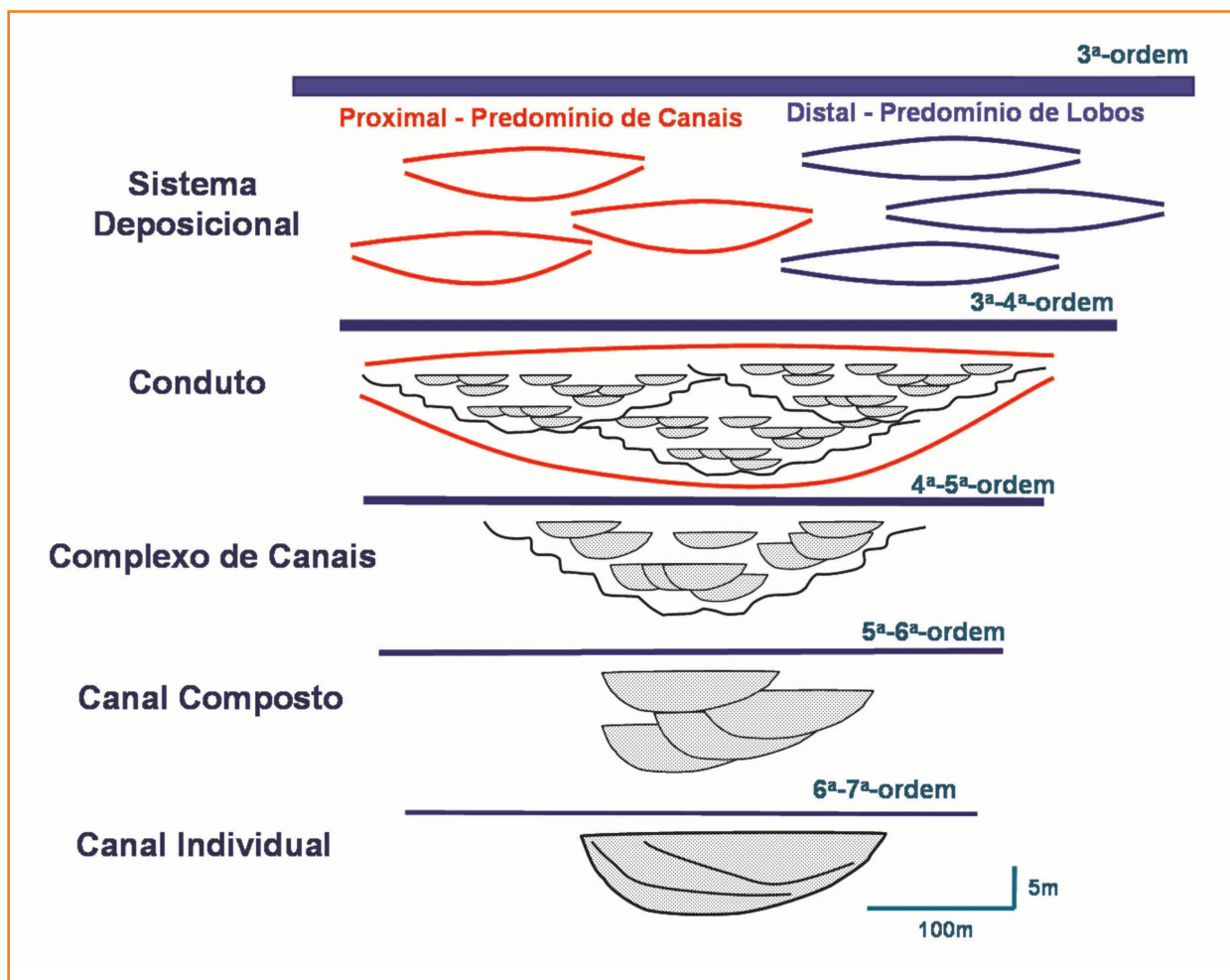
principais mudanças na fisiografia estão relacionadas às unidades de 4ª ordem, que abrigam os complexos. Nas unidades de mais alta freqüência (5ª e 6ª ordens) devem ser esperadas mudanças na posição dos elementos individuais e compostos (estruturas de compensação), sem mudanças significativas na posição dos principais eixos deposicionais em escala regional. Assim sendo, as unidades de 4ª ordem é que devem ser, na maior parte dos casos, utilizadas como referência para a definição do tipo de reservatório e, conseqüentemente, dos parâmetros que serão utilizados na sua caracterização e modelagem. Assim, é importante que as zonas de condensação de 4ª ordem sejam reconhecidas e mapeadas em subsuperfície, pois elas tendem a separar unidades muito diferentes do ponto de vista de fisiografia e, conseqüentemente, de arquitetura de reservatórios. Na maior parte dos campos de águas profundas da Bacia de Campos, as unidades de 4ª ordem são equivalentes às zonas de produção, e as de 5ª ordem às sub-zonas de produção. Tal vinculação depende, conforme mencionado, das taxas de sedimentação, e também do tipo de reservatório. Em complexos de lobos, por exemplo, devido à maior continuidade das camadas de sedimentos finos, muitas vezes é possível mapear regionalmente até mesmo limites de 5ª ordem. Alguns exemplos dessas situações serão apresentados no próximo capítulo.

Figura 9

Relação entre a hierarquia de elementos de arquitetura e as ordens da Estratigrafia de Sequências de alta resolução. Aplicável em sistemas com taxas de sedimentação da ordem de 10 cm/1 000 anos.

Figure 9

Relationship between architectural elements and high-resolution sequence-stratigraphy orders. Applicable to systems with sedimentation rate around 10 cm/1000 years.



exemplos em reservatórios brasileiros

Este capítulo apresenta alguns exemplos de reservatórios brasileiros enquadrados na classificação geométrica discutida anteriormente. Nesse contexto, os reservatórios brasileiros do tipo complexo de canais discretos melhor documentados incluem os depósitos conglomeráticos de preenchimento de *canyons* na Bacia do Espírito Santo, como os do campo de Lagoa Parda (Bruhn, 1993, 1998; Bruhn e Moraes, 1989), e os reservatórios oligocênicos-miocênicos do Campo de Albacora (Bruhn, 1998, Arienti *et al.* 2000), entre outros. Os casos mencionados representam sistemas ricos em areias. Sistemas mistos ou pobres em areia também ocorrem, embora sejam menos comuns. Alguns exemplos incluem os reservatórios oligocênicos-miocênicos do

Campo de Moréia, parte dos reservatórios do Campo de Caratinga, e vários arenitos delgados de idades diversas que aparecem preenchendo *canyons* na Bacia de Campos. A maior parte dos reservatórios da Formação Calumbi, na Bacia de Sergipe/Alagoas, também depositados em *canyons* ou pequenas depressões intra-talude, também se enquadram nessa categoria.

Na figura 10 são apresentados detalhes da geometria dos complexos de canais do Campo de Lagoa Parda. Observa-se que a maior parte dos canais identificados em subsuperfície se trata de canais compostos. O uso de afloramentos análogos, como no caso da figura 8, serve para se entender as características internas dos canais compostos cujas envoltórias estão mapeadas em subsuperfície e podem ser utilizados para o refinamento de modelos ou cálculo de propriedades equivalentes. Na figura 10 mostra-se, ainda, que os complexos de canais de Lagoa Parda evo-

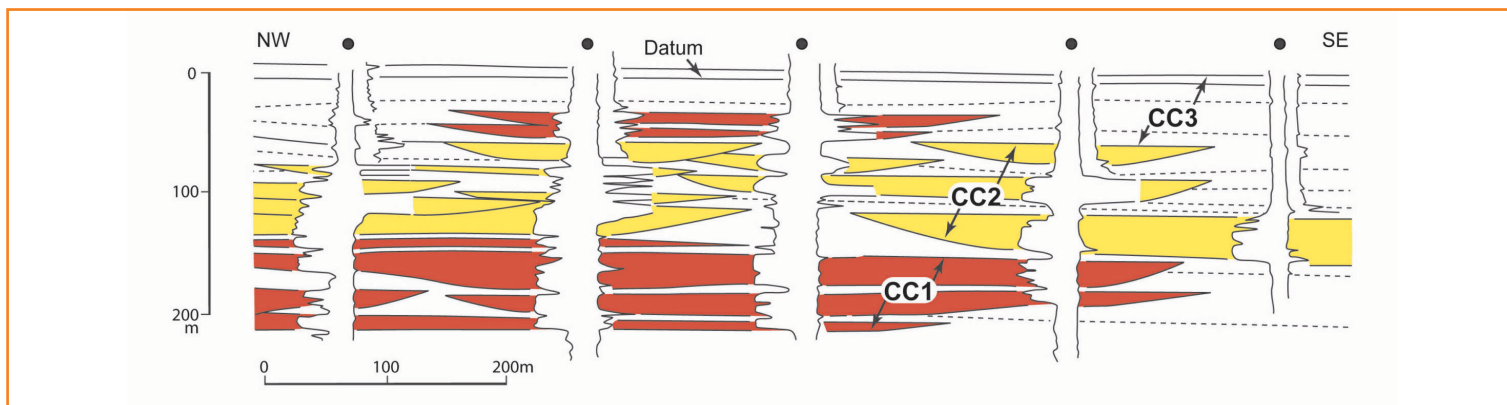


Figura 10

Seção estratigráfica do Campo de Lagoa Parda (Bacia do Espírito Santo), apresentando a arquitetura típica do complexo de canais discretos que constitui os reservatórios eocênicos. Note a mudança vertical na intensidade de amalgamação e no porte dos canais em três complexos de canais superpostos (CC1, CC2, CC3). Adaptado de Bruhn (1998).

Figure 10

Stratigraphic section of the Lagoa Parda Field (Espírito Santo Basin) showing the architectural styles typical of discrete-channel complexes. Note the vertical change in the intensity of amalgamation and in the size of channel elements in the three superposed complexes (CC1, CC2, CC3). Adapted from Bruhn (1998).

luem, da base para o topo, de um sistema muito rico em areia (e na fração conglomerática), em que os canais se apresentam praticamente amalgamados (CC1), para um típico complexo de canais discretos ricos em areia (CC2), e deste para um complexo do tipo misto a rico em lama. Esta evolução é comum em complexos de canais discretos. No complexo basal (CC1) apenas canais compostos ou envoltórias de canais compostos podem ser identificados. Nos complexos superiores (CC2 e CC3) identificam-se canais compostos e, em alguns casos, já que se trata de um reservatório densamente perfurado, até mesmo alguns canais individuais.

Um outro exemplo importante de complexo de canais discretos é o Campo de Albacora da Bacia de Campos (fig. 11). Neste caso, devido ao maior espaçamento dos poços, típico dos campos do mar, só é possível identificar canais compostos, ou mesmo envoltórias de canais compostos (tais como os canais 406 e 503 da figura 11). Mesmo com sísmica de excelente resolução, é difícil se conseguir identificar canais individuais (fig. 12). Ainda assim, como o modelo de geometria interna de canais compostos é bem substantiado pelos dados de afloramentos, a interpretação e modelagem desses reservatórios ficam muito facilitadas se a resolução sísmica for suficiente para delinear os elementos compostos.

No caso do segundo tipo de reservatórios, os complexos de canais amalgamados, estes não tem sido reconhecidos exatamente como tal em muitos estudos de reservatório. Desde o trabalho de Bruhn e Moraes (1989), muitos reservatórios constituídos por seqüências espessas de arenitos maciços (não-estratificados), têm sido

denominados de lobos canalizados, expressão que, na sua concepção original, corresponde aos reservatórios que aqui são classificados como complexos de canais amalgamados. O mesmo é válido para boa parte dos reservatórios denominados de lobos confinados por Bruhn (1998). Exemplos notáveis desse tipo de reservatório são as espessas seqüências que preenchem calhas cretácicas, e que constituem os reservatórios de campos como Carapeba (fig. 13), na Bacia de Campos. De fato, a predominância de arenitos maciços, com ocorrência restrita ou ausência de depósitos finos de *overbanks* é uma característica marcante desse tipo de reservatório, conforme foi visto na seção sobre fácies. Ao se observar a seqüência de preenchimento dessas calhas, é bastante evidente a ocorrência de um padrão característico, conforme foi documentado por Bruhn (1993) e Bruhn e Walker (1995) para o Campo de Carapeba (fig. 13). A seqüência inicia com depósitos extremamente confinados formando corpos espessos e intensamente amalgamados. Progressivamente, há uma redução do confinamento. No topo, o sistema se desenvolve de maneira não-confinada e, nesse caso, é possível que, além dos canais amalgamados, ocorram também lobos. Outros sistemas de canais amalgamados da Bacia de Campos incluem os principais reservatórios de campos como Namorado, Cherne, Marimbá, Espadarte, Roncador e, possivelmente, os reservatórios do Campo de Jubarte.

Os complexos de canais distributários e lobos se desenvolvem na região de deposição terminal dos sistemas turbidíticos, conforme documentado por Twichell *et al.* (1992) no Leque do Mississipi, e

Figura 11

Seção estratigráfica dos reservatórios oligocênico-miocênicos do Campo de Albacora (Bacia de Campos) apresentando arquitetura típica de canais discretos. Devido ao espaçamento dos poços (e aos limites da resolução sísmica – ver figura 12) todos os canais mapeados (referidos por números) representam canais compostos ou grupos de canais compostos. Superfícies denominadas de LS separam diferentes complexos. Zonas de condensação de 4ª ordem são reconhecidas (marcos estratigráficos), embora parcialmente erodidas devido ao caráter muito proximal do sistema. Modificada de Arienti et al. (2000).

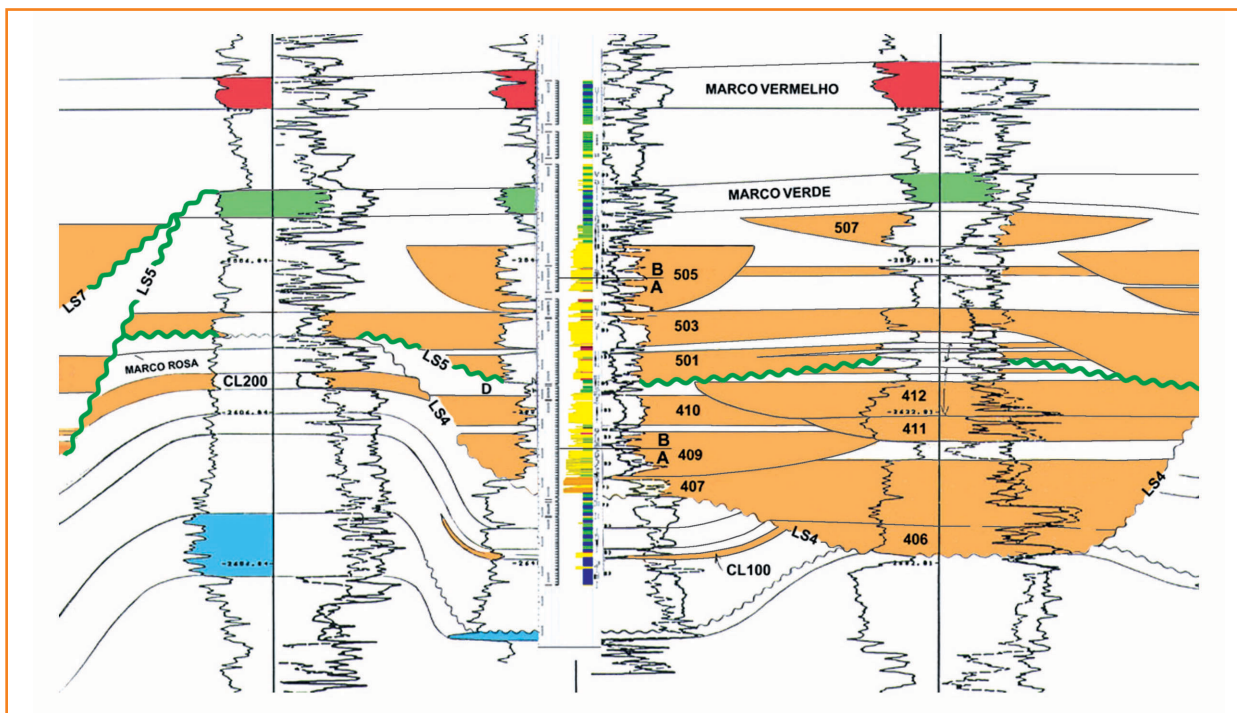


Figure 11

Stratigraphic section of the oligomiocene reservoirs of the Albacora field (Campos Basin) presenting discrete-channel architecture. Due to well spacing (and seismic resolution limits – see figure 12) all mapped channels (numbered) are composite or even groups of composite channels. Surfaces named LS limit different channel complexes. 4th-order condensed zones (stratigraphic markers – colored) are recognized, although partially eroded due to the proximal character of the system. Modified from Arienti et al. (2000).

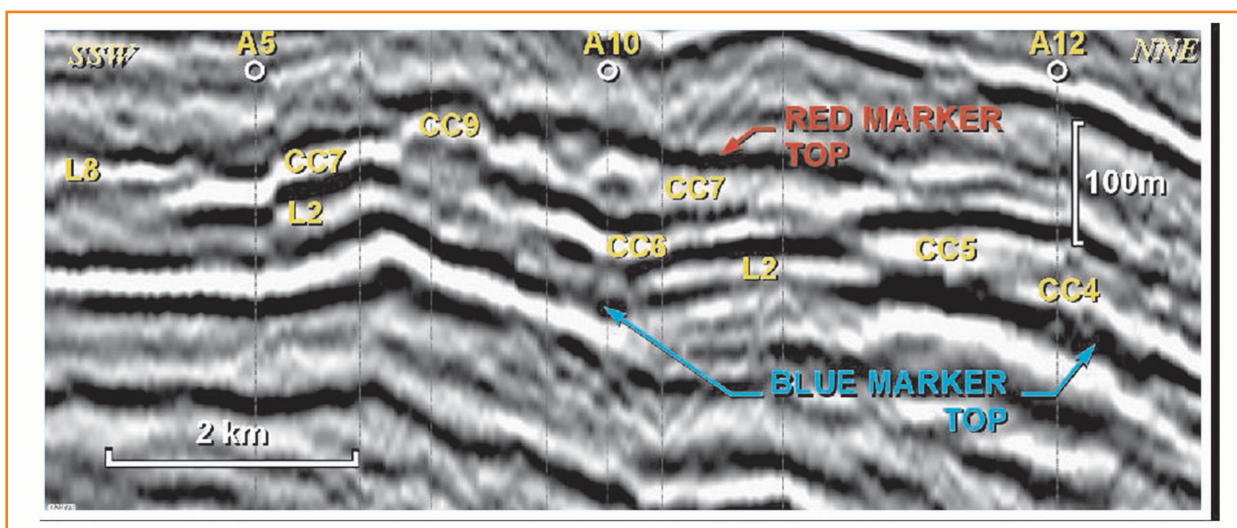


Figura 12 – Seção sísmica de amplitude apresentando o padrão característico do complexo de canais discretos no Campo de Albacora (ver figura 11). Notar que a resolução sísmica só permite a definição de canais compostos (extraída de Bruhn, 1998).

Figure 12 – Amplitude seismic section showing the characteristic pattern of the discrete channel complexes of the Albacora Field (see figure 11). Note that seismic resolution only allows composite channel bodies to be recognized. From Bruhn (1998).

por Machado et al. (1998) no sistema recente de Almirante Câmara, na Bacia de Campos. A maior parte dos reservatórios brasileiros foi depositada num padrão retrogradacional, aparentemente controlado por ciclos de variação do nível do mar. Desse modo, mesmo nos casos em que a porção principal da seqüência se constitui de canais amalgamados preenchendo calhas, é possível que

complexos de lobos se desenvolvam na sua parte superior. Este pode ser o caso da parte superior dos reservatórios do Campo de Carapeba (Bruhn, 1993; Bruhn e Walker, 1995), e também das zonas superiores do Campo de Roncador (Sombra et al. 2001). Em outras situações, em que os sistemas são inteiramente pouco confinados, há um predomínio de complexos de canais distributários

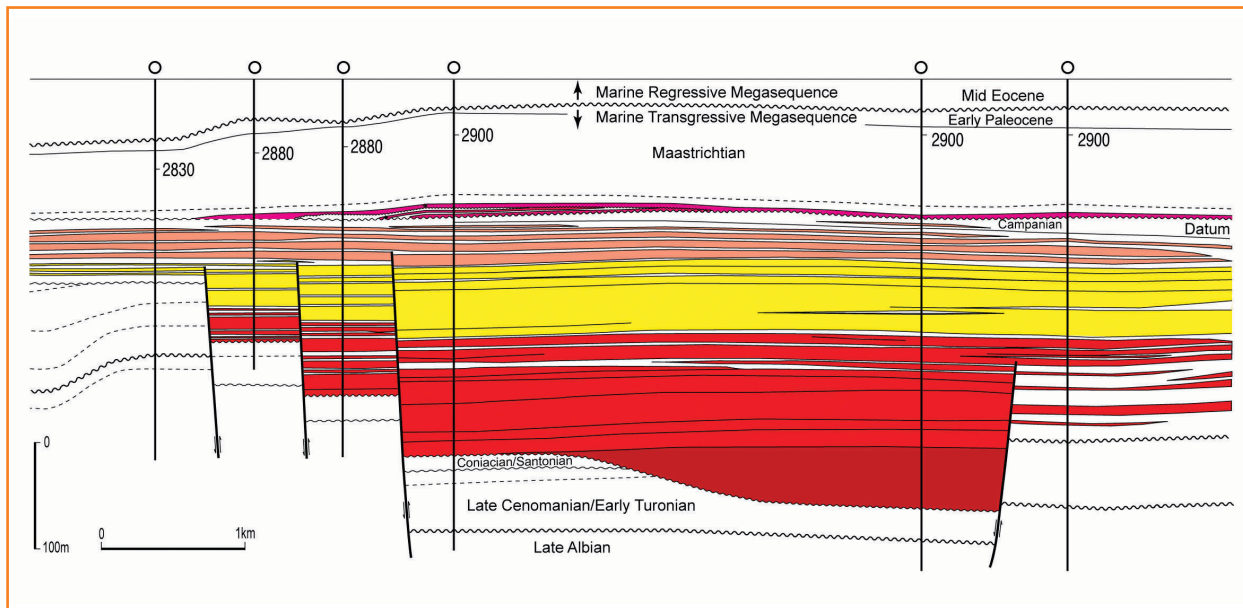


Figura 13

Seção estratigráfica dos reservatórios cretácicos do Campo de Carapeba (Bacia de Campos) apresentando a arquitetura típica de complexos de canais amalgamados. Note a elevada proporção de arenitos (acima de 80%) e a descontinuidade das barreiras de permeabilidade caracterizando principalmente o eixo da calha. As cores representam unidades de 4ª ordem. Modificado de Bruhn (1993).

Figure 13

Stratigraphic section of the Carapeba Field (Campos Basin) showing the typical architectural pattern of amalgamated-channel complexes. Note the high net-to-gross ratio (above 80%) and the discontinuity of permeability barriers characterizing especially the trough axis. Different colors represent 4th-order units. Modified from Bruhn (1993).

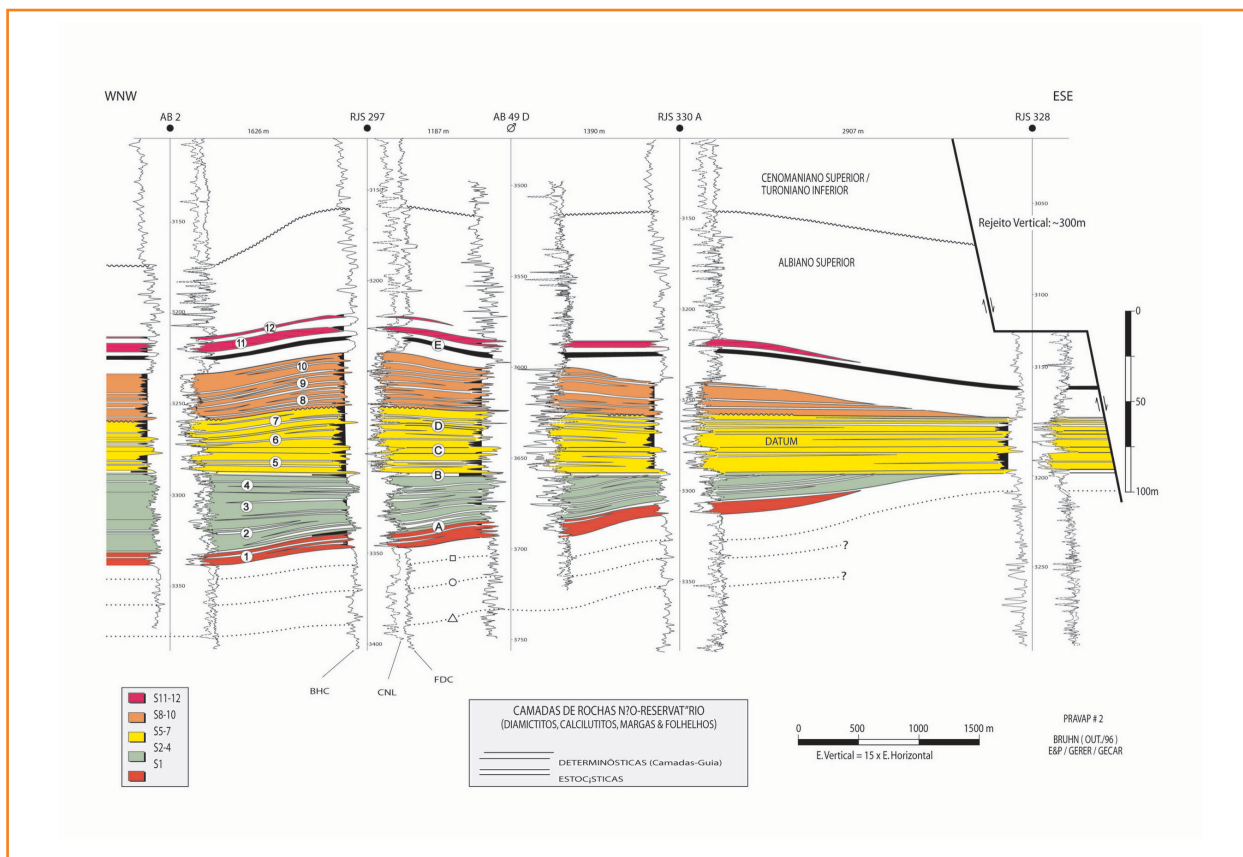


Figura 14 – Seção estratigráfica dos reservatórios albianos (Arenito Namorado) do Campo de Albacora apresentando geometria típica de complexos de lobos. Note que, apesar da alta proporção de arenitos (acima de 80%), há maior frequência e preservação das barreiras de permeabilidade internas aos reservatórios se comparada com a figura 13. Unidades de 4ª (coloridas) e 5ª ordens (numeradas) são identificadas. Extraída de Bruhn (1998).

Figure 14 – Stratigraphic section of the Albian reservoirs (Namorado Sandstone) of the Albacora Field (Campos Basin) showing the architectural pattern typical of lobe complexes. Note that, even with a net-to-gross ratio above 80%, there is an increase in the frequency and in the continuity of permeability barriers compared to the reservoirs shown in Figure 13. 4th- (colored) and 5th- (numbered) order units have been identified. From Bruhn (1998).

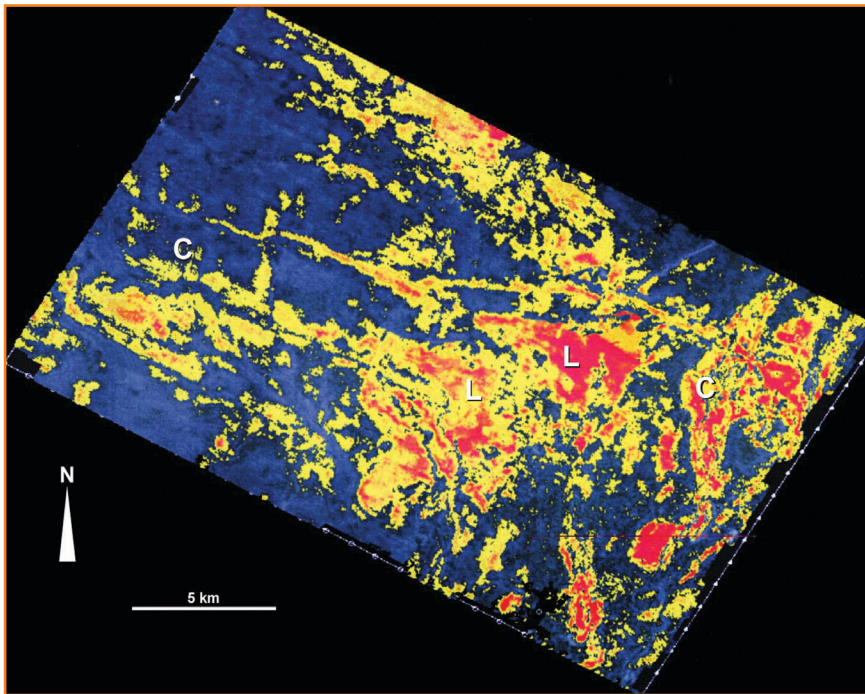


Figura 15

Mapa sísmico de amplitude dos reservatórios oligocênicos-miocênicos de campos de águas profundas da Bacia de Campos, apresentando a morfologia típica (padrão radial) de complexos de canais distributários e lobos (L). Note que há canais discretos (C) conectando os reservatórios dominados por lobos (modificado de Lopes et al. 1999).

e lobos, como ocorre no Arenito Namorado do Campo de Albacora (fig. 14), e na maior parte dos arenitos oligocênicos-miocênicos de campos como Marlim e Marlim Sul, entre outros (fig. 15), em que a forma lobada é claramente visualizável nos mapas sísmicos (Bruhn, 1998; Lopes et al. 1999).

conclusões

A integração de dados de diversos afloramentos e sistemas recentes com observações de subsuperfície permite classificar os reservatórios de águas profundas, quanto ao estilo de arquitetura, em três tipos básicos, sendo eles: (1) complexos de canais discretos; (2) complexos de canais amalgamados; (3) complexos de canais distributários e lobos. Esta classificação, embora simples, é muito eficaz para a organização das informações sobre geometria e heterogeneidades dos reservatórios.

Cada um dos tipos apresenta características espaciais significativamente distintas. Nos complexos de canais discretos os corpos de preenchimento de canal aparecem individualizados no espaço, devido ao empilhamento oblíquo ou vertical. Nos complexos de canais amalgamados

o sistema é dominado por canais apresentando predominância de amalgamação lateral, produzindo corpos arenosos de grande extensão. Nos complexos de canais distributários e lobos, que representam a região onde se dá a transição canal-lobo, um sistema proximal de canais distributários rasos alimenta lobos frontais com pequena espessura e grande extensão lateral. Esses padrões implicam em diferentes estruturas de permeabilidade, com maior permeabilidade vertical mas significativa anisotropia horizontal nas regiões mais canalizadas, e progressiva redução da permeabilidade vertical, acompanhada de redução da anisotropia horizontal, no sentido das regiões dominadas por canais mais rasos e lobos.

Existe uma relação entre os tipos de arquitetura e as associações de fácies neles observadas. Os complexos de canais discretos são caracterizados pela intercalação de fácies de granulometria mais grossa de preenchimento de canal com fácies de granulometria mais fina de extravasamento. Os complexos de canais amalgamados são caracterizados pela alta proporção de areia, resultante da amalgamação erosiva das camadas, e os complexos de lobos pela ocorrência de seqüências mais completas, com preservação do topo das camadas e dos finos hemipelágicos. A proporção e o tamanho dos intraclastos de folhelho é um excelente indicador do grau de canalização do sistema, principalmente porque pode ser utilizado mesmo em sistemas com granulometria muito homogênea.

Quanto a dimensões, uma hierarquia repetitiva de elementos de arquitetura tem sido registrada, incluindo (1) elementos individuais, (2) elementos compostos, e (3) complexos. Ainda que inicialmente definida para canais, a mesma hierarquia tem sido reconhecida em complexos de lobos. Além disso, é possível relacionar as hierarquias de elementos de arquitetura com as ordens da estratigrafia de alta resolução. Nesse contexto, na maior parte dos sistemas os elementos individuais podem ser associados com unidades de 6ª ordem, os elementos compostos com unidades de 5ª ordem e os complexos com unidades de 4ª ordem.

Os três tipos de reservatórios aqui apresentados são comuns nas bacias da costa brasileira.

Embora todos os três tipos sejam encontrados em diferentes idades, no Cretáceo e no Terciário Inferior predominam complexos de canais amalgamados formando espessas seqüências de preenchimento de calhas formadas pela tectônica salífera. No Terciário Superior (Oligoceno-Mioceno), como a expansão das estruturas do sal originou uma topografia de mini-bacias, os complexos de lobos são mais comuns, formando os principais reservatórios de campos como Marlim e Marlim Sul, entre outros. A identificação dos diferentes tipos de arquitetura é importante não apenas na coleta e organização das informações sobre a geometria externa e as heterogeneidades internas dos reservatórios, mas também por servir de referência para a construção de modelos tridimensionais e orientar o processo de gerenciamento dos reservatórios.

agradecimentos

Muitos colegas contribuíram ao longo dos vários projetos que deram origem a este trabalho, com sugestões, críticas e contribuições técnicas específicas. Alguns nomes serão citados a seguir, e desde já nos desculpamos por eventuais omissões. Aos colegas Carlos H. L. Bruhn, Sylvia M. C. Anjos, Farid S. Shecaira, João C. J. Conceição, Anelise Q. Lara, Paulo R. S. Johann, Mauro R. Becker e Maria Dolores de Carvalho pelo apoio gerencial e técnico, e aos colegas Eduardo B. Rodrigues, Walter B. Maciel, Luis Cláudio R. Machado, Gilberto Athayde Albertão, Marcelo S. de Almeida, Luci M. Arienti, Evaldo Cesário Mundim, Gilberto M. Ragagnin, Adriano Roessler Viana, Mário Sérgio Santos Braga, Helga E. Voelcker e Marcos Klotz de Souza, por sua contribuição técnica. Agradecemos, ainda, à Petrobras pela permissão para publicar o trabalho.

referências bibliográficas

ARIENTI, L. M.; RODRIGUES, R.; STROHSCHOEN JUNIOR., O.; MESQUITA, A. C. **Aplicação de técnicas multidisciplinares avançadas para o refinamento estratigráfico-faciológico do reservatório oligo-miocênico do Campo de Albacora** : relatório final. Rio de Janeiro : PETROBRAS. CENPES. DIGER. SEGRES, 2000. 32 p. Relatório Interno.

BRUHN, C. H. L. **High-resolution stratigraphy, reservoir geometry, and facies characterization of Cretaceous and Tertiary turbidites from Brazilian passive-margin basins**. Hamilton : McMaster University, 1993. 433 p. Tese (Doutorado).

BRUHN, C. H. L. Deep-water reservoirs from the eastern Brazilian rift and passive-margin basins. AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 1998, Rio de Janeiro. **Abstracts...** Tulsa : American association of Petroleum Geologists, 1998. p. 14-15. Course n. 6. Part 2.

BRUHN, C. H. L.; MORAES, M. A. S., Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada, Bahia : um laboratório de campo para o estudo de reservatórios canalizados. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p. 235-267, jul./set. 1989.

BRUHN, C. L. H.; WALKER, R. G. High-resolution stratigraphy and sedimentary evolution of coarse-grained canyon-filling turbidites from the Upper Cretaceous transgressive megasequence, Campos Basin, offshore Brazil. **Journal of Sedimentary Research, section B** : stratigraphy and global studies, Tulsa, v. 65, n. 4, p. 426-442, Nov. 1995.

CLARK, J. D. **Scales of heterogeneity within the Ross Formation turbidite system, County Clare, west Ireland**. Genetic Units Project, Heriot-Watt University, 79 p. 1998. Relatório de Projeto Multicliente.

CLARK, J. D. **Quantitative characterization of deep-water genetic units in the Grès d'Annot Formation, southeast France**. Genetic Units Project, Heriot-Watt University, 100 p. 1999. Relatório de Projeto Multicliente.

- CLARK, J. D.; PICKERING, K. T. **Submarine channels** : processes and architecture. London : Vallis, 1996. 231 p.
- ESCHARD, R.; DOLIGEZ, B. (Ed.) **Subsurface reservoir characterization from outcrop observations**. Paris : Éditions Technip, 1993. 189 p. (Institut Français Du Pétrole, Collection Colloques et Séminaires, 51). Seleção de trabalhos apresentados no IFP RESEARCH CONFERENCE ON EXPLORATION PRODUCTION, 7., 1992, Scarborough.
- ESCHARD, R.; ALBOUY, E.; GAUMET, F.; LETOUZEY, J. **Stratigraphic architecture of turbiditic reservoirs, Pab Range, Pakistan**. Paris : Institut Français Du Pétrole, 2002. 83 p. Relatório de Projeto Multicliente.
- FLINT, S.; SIXSMITH, P.; GRECUA, M.; WICKENS, D. V. **Facies, architecture, and predictive stratigraphy of deepwater sandstones, Tanqua and Laigsburg sub-basins, Karoo of South Africa**. In : INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGICAL CONFERENCE, 16., 2002, Johannesburg. 113 p. 2002.
- GARDNER, M. H.; CARR, M. M.; BATZLE, M. L.; BORER, J. M.; WAGERLE, R. N.; MELICK, J. **Hydrocarbon play atlas for slope and basin reservoirs, illustrated with outcrop examples from the Brushy Canyon Formation, west Texas, USA, Colorado**. Golden : Colorado School of Mines Slope and Basin Consortium. 2000. 138 p. Relatório de Projeto Multicliente.
- GARDNER, M. H.; BORER, J. M.; MELICK, J. J.; MAVILLA, N.; DECHESNE, M.; ROGER N. WAGERLE, R. N. Stratigraphic process-response model for submarine channels and related features from studies of Permian Brushy Canyon outcrops, West Texas. In MUTTI, E. G.S.; STEFFENS, G. S.,C.; PIRMEZ, C., M.; ORLANDO, M.; D. Roberts, D. (Ed.). **Turbidites: Models and Problems. Marine and Petroleum Geology**, Amsterdam, v. 21, n. 6, Jun. 2004, p. 779-781.
- GAUMET, F.; JOSEPH, P.; ESCHARD, R. **Thin turbidite reservoirs**: reservoir characterization and uncertainty estimation. 2004. 104 p. Relatório Interno do Instituto Francês do Petróleo.
- JOSEPH, P.; BABONEAU, N.; BOURGEOIS, A.; COTTERET, G.; ESCHARD, R.; GARIN, B.; GRANJEON, D.; LERAT, O.; RAVENNE, C.; SOUZA, O. G.; GUILLOCHEAU, F.; QUEMENER, J. The Annot Sandstone outcrops (French Alps) : architecture description as an input for quantification and 3D reservoir modeling. In : WEIMER, P. *et al.* (Ed.) ANNUAL BOB F. PERKINS RESEARCH CONFERENCE, 20., 2000, Houston. **Proceedings...** [Houston] : Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 2000. Deep-Water Reservoirs of the World. Gulf Coast Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. p. 422-446.
- LOPES, M. F.; BRUHN, C. H. L.; SANTOS, R. A.; CORÁ, C. A. G.; BECKER, M. R.; ALVES, R. R. P.; SARZENSKI, D. J. Architecture of sand-rich, turbidite reservoirs from deep-water Campos Basin, Brazil. In : AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS ANNUAL CONVENTION, San Antonio, Tex. 1999. **Abstracts...** [S.l. : s.n.], 1999.
- 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.; KOWSMANN, R. O.; ALMEIDA JUNIOR, W.; MURAKAMI, C. Y.; SCHREINER, S.; MILLER, D. J.; PIAULINO, P. O. V. Geometria da porção proximal do sistema deposicional turbidítico moderno da Fm. Carapebus, Bacia de Campos : modelo para heterogeneidades de reservatório. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 287-315, mai./nov. 2004.
- MORAES, M. A. S.; BLASKOVSKI, P. R.; ALMEIDA, M. S. **Parametrização de sistemas turbidíticos análogos**. Rio de Janeiro : PETROBRAS. CENPES, 2000. 96 p. Relatório Interno.
- MORAES, M. A. S.; BECKER, M. R.; MONTEIRO, M. C.; NETTO, S. L. A. Using outcrop analogs to improve 3D heterogeneity modeling of Brazilian sand-rich turbidite reservoirs.. In : WEIMER, P. *et al.* (Ed.) ANNUAL BOB F. PERKINS RESEARCH CONFERENCE, 20. 2000, Houston. **Proceedings...** [Houston] : Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 2000. Deep-Water Reservoirs of the World.

Gulf Coast Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 422-446. 2000b.

MORAES, M. A. S.; BLASKOVSKI P. R.; PARAÍZO, P. L. B.; PORTELLA, R. C. M.; CARRASCO, B. N.; ROMEU R. K. **Heterogeneidades críticas em turbiditos**. Rio de Janeiro : PETROBRAS. CENPES. PRAVAP, 2001. Relatório Interno, 55 p.

MORAES, M. A. S.; BLASKOVSKI, P. R.; JOSEPH, P. The Grès d'Annot as an analogue for Brazilian Cretaceous sandstone reservoirs : comparing convergent to passive-margin confined turbidites. In : JOSEPH, P.; LOMAS, S. A. (Ed.). **Deep-Water Sedimentation in the Alpine Basin of SE France**. London : Geological Society of London. 2004. p. 420-437. (Geological Society of London. Special publication, 221).

MULDER, T.; ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density currents and their deposits. **Sedimentology**, Oxford, v. 48, n. 2, p. 269-299. Apr. 2001.

MUTTI, E.; NORMARK, W. R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and

concepts. In : LEGGETT, J. K.; ZUFFA, G. G. (Ed.). **Marine Clastic Sedimentology**, p. 1-38. 1987.

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 and Hall, 1995. 333 p.

SOMBRA, C. L.; SOUZA, R. S.; RODRIGUES, C. R. O.; SILVA, C. M. A.; ALMEIDA, M. S.; MORAES, M. A. S.; BLASKOVSKI, P. R.; FERRER, J. E. P.; ALVES, D. B.; SANTOS, V. S. S.; ELIAS, V. L. G.; CERQUEIRA, J. R.; SANTOS NETO, E. V.; STROCHOEN JUNIOR, O.; RODRIGUES, R.; BARROSO, A. S.; ADAMS, T.; SARZENSKI, D. J.; STANK, C. V.; SOUZA, M. K.; CALAZANS, M. M. **Detalhamento Geológico do Campo de Roncador**. Rio de Janeiro : PETROBRAS. CENPES, 2001. 68 p. Relatório Interno.

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 seaMARC IA sidescan sonar images. **Geology**, Boulder, Colo., v. 20, p. 689-692. 1992.

expanded abstract

By integration subsurface observations with analog data (outcrop and modern systems) three basic architectural types can be defined by deep-water reservoirs: (1) discrete-channel complexes, (2) amalgamated-channel complexes, and (3) distributary-channel and lobe complexes. This classification is essentially descriptive and it is used to organize observations and choose the method of reservoir model building. Each type of reservoir and the different architectural elements are discussed in terms of typical geometrical patterns, internal connectivity, facies associations and dimensions. Examples from Brazilian reservoirs are also given.

Discrete-Channel Complexes is the type in which channel fills can be recognized as separate elements, i.e., as discrete objects in the three-dimensional space. Reservoirs dominated by discrete channel fills can be recognized, at the subsurface, by the occurrence of significant thickness variations at relatively short distances. Even though channel-fill bodies appeared as separate individuals, they often show three-dimensional connectivity, which increases as the reservoir net-to-gross ratio increases. As such, some reservoirs dominated by discrete-channel fills but presenting high net-to-gross ratio, can show high productivity and recovery especially if the architectural framework is correctly understood, and managed in such a way that makes the best use of the vertical and lateral connectivity patterns.

Amalgamated-Channel Complexes refer to reservoirs formed by shallow channels in systems marked by frequent lateral shifts of channel thalweg. The intensity of lateral channel juxtaposition prevents channel-fill spatial segregation, resulting in a sheet-like or lobate external geometry. These reservoirs tend to show better connectivity than discrete-channel complexes, especially in terms of vertical permeability. It has been observed, however, that the connection of juxtaposed channel fills tend to show some permeability reduction, even in sand-sand contact areas. This is probably due to the undetected occurrence of thin by-pass drapes, or even the precipitation of diagenetic phases due to grain size changes along the channel margins. This feature commonly generates a significant degree of horizontal anisotropy, even in situations of very high net-to-gross ratio.

Distributary-channel and lobe complexes are formed by a radial network of shallow distributary channels with associated lateral (spill) and frontal (ter-

minal) lobes. These complexes tend to show less erosion than the former cases, with better preservation of muddy turbidites and hemipelagic deposits. Lobe-dominated reservoirs tend to show good lateral connection but increasingly poor vertical connection, as distributary-channel dominated regions pass distally into lobe dominated regions.

For linking outcrop architectural elements with subsurface seismic elements with more confidence, the observation that elements of similar geometry (at the same scales) show similarities in facies associations increases the confidence for the use outcrop data for predicting sub-seismic properties. The three architectural types defined herein present distinct facies associations. Discrete-channel complexes are characterized by intercalations of thick-bedded, coarse-grained channel-fill deposits with fine-grained, thin-bedded, fine-grained overbank deposits. Another typical feature of channel fills is the presence of large shale intraclasts, which result from erosional processes that formed the channels. Frequency and size of shale intraclasts are very good indicators of the intensity of systems' erosion, and hence good indicators of the degree of channelization. Amalgamated channel complexes, differently from discrete channel complexes, are characterized by the relative absence of fine-grained overbank deposits. As such complexes are produced by shallow, laterally-amalgamated channels, any fine-grained material initially produced is inferred to have been later destroyed by the channel amalgamation process. Thus, the more typical facies association that represents amalgamated channel complexes is thick successions of unstratified sandstones, relatively coarse grained, with few intercalations of fine-grained material. In this case, overbank material will be expected to occur only at the complex margins. Despite the lack of well-defined stratification, most of these sandstones show normal grading. And, since, erosive processes would still be quite important, shale intraclasts are also common and relatively large.

In terms of lobes, their distinction from amalgamated channels might be difficult in some cases, especially in the case of proximal lobes, which can present thick and high net-to-gross sandstone sequences. However, as the systems become unconfined in lobes, less erosion is expected. Thus, lobe deposits typically present lower proportion of scour features and shale intraclasts. In addition, lobes are characterized by rapidly waning flows and less by pass. As a result, the development of Bouma sequences with horizontal (B division) and ripple-

cross stratification (C division) at their tops is a common feature, especially in systems presenting wide grain-size range. Finally, since less erosion is characteristic of the lobe environment, better preservation of interbedded fines should also be expected

Studies relating architectural elements observed in outcrops to morphological elements observed in the subsurface show that a repetitive hierarchy of architectural elements, in terms of size and types, can be recognized in different systems. The most widely documented elements are the channel-fills, where three basic scales are recognized, and are here called (1) individual, (2) composite, and (3) complex. Although initially defined for channel complexes, it has been observed that lobe complexes also show a comparable hierarchy. In some cases, a fourth level, denominated channel-complex set, can be added to the scheme.

Finally, it's also possible to relate the hierarchical scheme presented herein to the different orders of high-resolution stratigraphy. Individual elements would commonly be found within 6th-order units, and composite elements within 5th-order units. 4th-order units would then envelope channel and/or lobe complexes, and complex sets would be found within 3rd-order units. Such relationships vary depending on the sedimentation rate. Nevertheless, it has been observed to work in most sequences with a compacted sedimentation rate around 10 cm/1000 yrs.

The three reservoir types presented herein are common in the Brazilian continental margin basins. In the Cretaceous and Lower Tertiary (Paleocene-Eocene), due to the development of narrow troughs generated by salt-tectonics, amalgamated-channel complexes formed the main reservoirs in large fields such as Namorado, Carapeba, Roncador, Jubarte, among others. Lobe complexes appeared in the upper part of the trough-filling sequences, and discrete-channel complexes were found in the more proximal canyons. In the upper Tertiary (Oligocene-Miocene), salt-controlled structures expanded to generate mini-basins, where large lobe complexes were found. Discrete-channel complexes and amalgamated channel complexes were found connecting mini-basins or where topographic depressions became too narrow.

The recognition and differentiation of the reservoir architectural styles is useful to collect and organize information about reservoir external geometry and internal heterogeneities, to guide the construction of three-dimensional models, and to orient reservoir management.

autor principal



Marco Antônio Schreiner Moraes

Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)

Gerência de Sedimentologia e Petrologia

e-mail: masmoraes@petrobras.com.br

O geólogo **Marco Antônio Schreiner Moraes** é Consultor Sênior lotado na Gerência de Sedimentologia e Petrologia (GSEP) do Cenpes, tendo se formado pelo Convênio Petrobras/Universidade Federal da Bahia - UFBA (Curso de Geólogo de Petróleo - GEOPET) em 1980. Obteve Mestrado em Geologia de Reservatórios pela Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP em 1985, e doutorado pela Universidade do Wyoming, nos Estados Unidos, em 1991. Iniciou sua carreira na Petrobras em 1981, no Distrito de Exploração da Bahia. No final de 1982 transferiu-se para o Setor de Ensino do Rio de Janeiro e, em 1987, para o Cenpes. De 1994 a 1999 foi gerente do Setor de Geologia e Geofísica de Reservatórios. Desde 1999 têm coordenado vários projetos e ministrado cursos voltados para a caracterização da arquitetura e geometria de reservatórios. É também representante da Petrobras em diversos projetos multiclientes de estudos de afloramentos análogos.