

## **II.5.1.5 - Geologia e Geomorfologia**

### **A) Contexto regional estratigráfico e tectono-sedimentar**

Neste estudo a área de interesse compreende uma faixa de mais de 300 km de extensão norte-sul ao longo da margem continental sudeste e sul brasileira, envolvendo a porção sul do litoral do estado do Rio de Janeiro e o litoral dos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, entre as latitudes 23°00' S e 27°53' S.

Em direção ao mar, a área de interesse se desenvolve da porção interna da Plataforma Continental, com lâminas d'água localmente inferiores a 20 metros, até lâminas d'água de até 2500 m, no extremo leste. Este setor compreende a bacia sedimentar de Santos.

A Bacia de Santos possui uma área total de 350.000 km<sup>2</sup>, considerando a região compreendida entre a linha de costa e a extremidade leste da província fisiográfica Platô de São Paulo. Ela limita-se ao norte com a Bacia de Campos, separada desta pelo Alto de Cabo Frio, e ao sul com a Bacia de Pelotas, da qual se separa pela Zona de Fratura de Rio Grande e suas extensões em direção ao continente, marcadas pelo Alto de São Paulo e pela Plataforma de Florianópolis (Gamboa e Rabinowitz, 1981) (Figura II.5.1.5-1 – Arcabouço estrutural e Fisiografia).

A margem continental sudeste-sul brasileira é do tipo atlântica passiva, compreendendo quatro estágios de evolução tectônica: pré-rift, rift, proto-oceânica e oceânica, já definidos por Asmus, em 1975, e por Ponte e Asmus, em 1978. O estágio inicial corresponde à fase que precede a ruptura da crosta continental, tendo ocorrido no Triássico/Jurássico, a cerca de 165 milhões de anos, com o soerguimento crustal, a formação de bacias periféricas intracratônicas e predominante sedimentação continental fluvio-lacustre. A fase rift é caracterizada pela ruptura crustal e pela formação de bacias dominadas por falhamentos normais e de geometrias estreitas, alongadas e profundas. A sedimentação é continental, predominantemente flúvio-lacustre, cujo desenvolvimento se deu no Cretáceo inferior (135 Ma). O início do espalhamento oceânico, configurando um estágio marinho restrito de quiescência tectônica, com deposição expressiva de

sedimentos evaporíticos, caracterizam a fase proto-oceânica, ocorrida ao longo do Aptiano (cerca de 105 Ma). O estágio oceânico dá continuidade à fase anterior, com o contínuo espalhamento do piso oceânico e o aprofundamento gradual da margem. O registro sedimentar que marca essa mudança é caracterizado inicialmente por depósitos de ambientes transicionais e marinhos rasos, de composição siliciclástica e carbonática, incorporando gradativamente ambientes marinhos profundos marcados por sedimentos finos de talude e bacia, entremeados a depósitos arenosos transferidos por correntes de densidade (turbiditos). Vários pulsos de reativação tectônica da Serra do Mar contribuíram com o aporte de sedimentos terrígenos para o interior da Bacia de Santos através dessas correntes de gravidade, dando origem às formações Santos, Juréia e Itajaí-Açu (Pereira, 1990, 1994; Almeida e Carneiro, 1998). Prossegue até os dias de hoje a fase oceânica, iniciada a partir do Apto-Albiano.

Assim como na configuração fisiográfica, na evolução tectono-sedimentar desta porção da margem destacam-se três importantes zonas de transferência causadas por esforços extensionais diferenciados da crosta durante a fase rift, a saber: Zona de Transferência do Rio de Janeiro, de Curitiba e de Florianópolis. A primeira marca a passagem da Bacia de Santos para Bacia de Campos, ao norte, a segunda subdivide a Bacia de Santos em dois setores ou sub-bacias (Embaixamentos Norte e Sul) e a terceira ao sul marca o limite entre a Bacia de Santos e a Bacia de Pelotas (Figura II.5.1.5-1 – Arcabouço estrutural e Fisiografia).

### **A.1) Estratigrafia da Bacia de Santos**

A geologia regional da Bacia de Santos é caracterizada por uma suíte de rochas granito-gnáissicas de pequenas porções cratônicas de idade transamazônica, rochas remobilizadas durante o Ciclo Brasileiro (cinturões Ribeira e Dom Feliciano;  $550 \pm 150$  M.a.), rochas sedimentares fanerozóicas da porção nordeste da Bacia do Paraná, rochas mesocenozóicas das Bacias de Santos e Campos e sedimentos continentais cenozóicos (Macedo, 1987). A Figura II.5.1.5-1 apresenta para a Bacia de Santos uma seção geológica.

Foi largamente discutida por Pereira (1990) e Pereira e Feijó (1994) a organização do pacote sedimentar da Bacia de Santos. Estes autores propuseram a divisão da coluna sedimentar em mega-unidades que abrangem as fases de Lago (continental – rift), Golfo (marinho restrito) e Mar (marinho franco). Os sedimentos continentais (predominantemente conglomerados e arenitos avermelhados) da Fm. Guaratiba se depositaram discordantemente durante o Barremiano e Aptiano inferior sobre as rochas vulcânicas do Neocomiano que constituem a Fm. Camboriu. As rochas evaporíticas da Fm. Ariri, depositadas durante o Aptiano superior e início do Albiano, se sobrepõem discordantemente sobre os sedimentos continentais da Fm. Guaratiba. A passagem para o ambiente marinho que se dá durante o Albiano, é marcada pela deposição de rochas carbonáticas da Fm. Guarujá (predomínio de depósitos de águas rasas) e da Fm. Itanhaém (predomínio de carbonatos de águas profundas), que recobre a anterior. A seqüência marinha franca que se estabelece a partir do Cenomaniano é marcado pelo domínio da deposição de folhelhos da Fm. Itajaí em águas profundas, com intercalações cada vez mais freqüentes em direção ao topo do Cretáceo superior de areias originadas de correntes de turbidez. Estes arenitos turbidíticos constituem a Fm. Ilhabela. Na porção rasa da Bacia de Santos, uma intensa progradação continental se estabelece a partir do Santoniano, desenvolvendo os depósitos de sedimentos terrígenos transicionais e de plataforma da Fm. Juréia. Uma grande discordância erosiva marca a passagem do Cretáceo para o Terciário (Superfície de Aplainamento Japi, Almeida e Carneiro, 1998), onde os sedimentos finos de águas profundas constituem a Fm. Marambaia e os sedimentos de águas rasas (terrígenos e carbonáticos) caracterizam a Fm. Iguape. A coluna estratigráfica da Bacia de Santos está representada esquematicamente na Figura II.5.1.5-2.

Segundo Pereira e Feijó (1994) a litoestratigrafia da Bacia de Santos está definida pelas seguintes formações, a saber:

- Formação Camboriú: engloba os derrames basálticos Eocretáceos de coloração verde-escuro e cinza-escuro, holocristalino, granulação média, textura ofítica e constituído, principalmente por plagioclásio e augita pouco

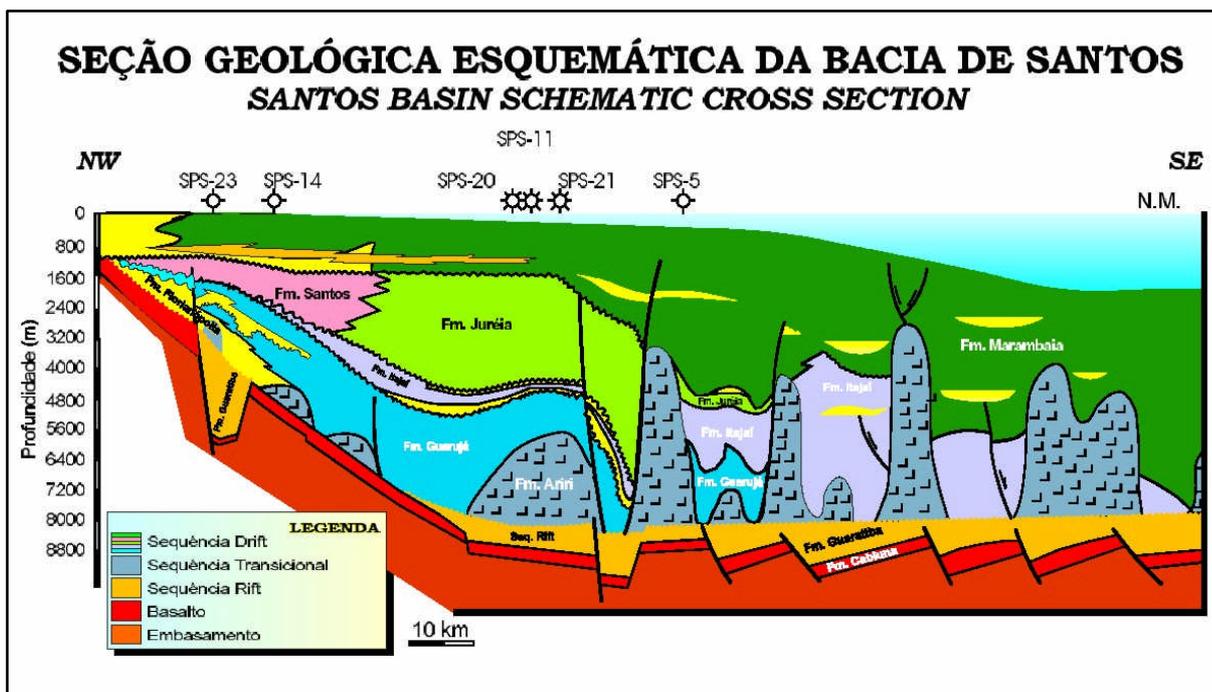
alterados. Esta formação está recoberta discordantemente pela Formação Guaratiba.

- Formação Guaratiba: composta por rochas clásticas e carbonáticas do Barremiano e Aptiano, sobrepostas aos basaltos Camboriú e sotopostas aos evaporitos Ariri. São conglomerados avermelhados, com seixos de basalto e quartzo, matriz argilo-arenosa, arenito médio e conglomerático imaturo e coquina branca-avermelhada. A coloração avermelhada e a imaturidade dos sedimentos sugerem um ambiente deposicional continental de leques aluviais progradantes sobre lagos rasos. Os contatos inferior e superior são discordantes.
- Formação Ariri: iniciada no Meso-Aptiano, é constituída por uma suíte evaporítica com espessos pacotes de halita branca, calcilito de cor creme e cinzenta, folhelho e marga. O ambiente deposicional é marinho com a formação de planícies de sabkha, sendo recoberto concordantemente pelos sedimentos clásticos da Formação Florianópolis e os carbonatos da Formação Guarujá.
- Formação Florianópolis: composta por arenito fino a grosso vermelho, matriz argilosa, folhelho e siltito vermelho micromicáceo de idade Albiana. Os clásticos avermelhados são interpretados como depósitos de leques aluviais. Há interdigitação lateral destes sedimentos com os carbonatos da Formação Guarujá e com os pelitos da Formação Itanhaém.
- Formação Guarujá: tem idade eoalbiana e é composta por calcarenito oolítico e bioclástico gradando lateralmente para calcilito creme-acinzentado e cinza acastanhado e marga cinzenta. O ambiente deposicional foi interpretado como sendo de planície de maré, laguna rasa, plataforma rasa e mar aberto. Os depósitos carbonáticos sobrepõe-se concordantemente aos evaporitos Ariri, interdigita-se lateralmente com os clásticos Florianópolis e sotopõe-se em discordância parcial com aos pelitos Itanhaém.

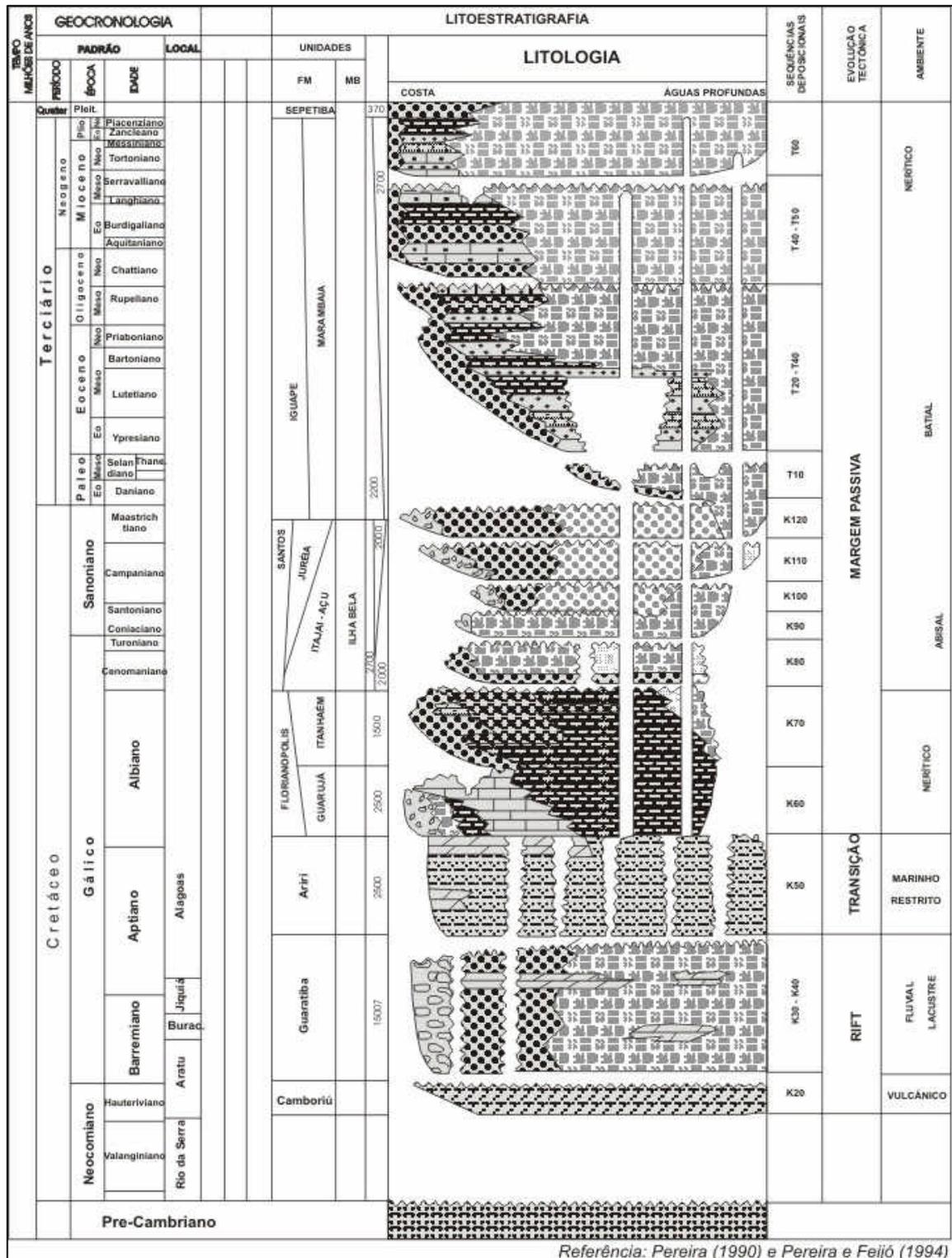
- Formação Itanhaém: é caracterizada pela presença de folhelho cinza-escuro, siltito e marga cinza-clara, calcilito creme-acastanhado e arenito subordinado, datados do Neo-Albiano. Os depósitos sugerem um ambiente deposicional nerítico interno a externo. Os pelitos se interdigitam lateralmente com os clásticos Florianópolis.
- Formação Santos: conglomerado e arenito lítico avermelhado, intercalados com folhelho cinzento e argila vermelha de idade cenomaniana a maastrichtiana. O ambiente deposicional é continental/transicional, na forma de leques aluviais, rios entrelaçados e deltas. A Formação Santos interdigita-se lateralmente com as formações Juréia e Itajaí-Açu, recobre discordantemente a Formação Florianópolis e sotopõe-se discordantemente às Formações Iguape e Marambaia.
- Formação Juréia: folhelhos cinza-escuro, esverdeado e castanho-avermelhado, siltito cinza-escuro, arenito fino e muito fino e calcilito creme-claro de idade santoniana a maastrichtiana. O ambiente deposicional é de plataforma marinha, apresentando contato superior discordante com as Formações Iguape e Marambaia e contatos laterais com os clásticos da Formação Santos e os pelitos da Formação Itajaí-Açu.
- Formação Itajaí-Açu: tem idade cenomaniana a maastrichtiana, sendo formada por uma espessa seção de clásticos finos, principalmente folhelho cinza-escuro, e arenitos turbidíticos médios do Membro Ilhabela dispersos na seção. O ambiente deposicional é de talude continental e bacia oceânica e o pacote pelítico está sotoposto e interdigitado com os clásticos Juréia e Santos.
- Formação Iguape: sedimentos terciários constituídos por calcarenito e calcirudito bioclástico (briozoários, equinóides, corais, foraminíferos, fragmentos de moluscos e algas), intercalados com argilito cinza-esverdeado, siltito, marga e conglomerado variegado. O ambiente deposicional é de plataforma carbonática com influência de leques aluviais

nas áreas mais proximais e os depósitos interdigitam-se lateralmente com a Formação Marambaia, recobridando discordantemente as Formações Santos e Juréia.

- Formação Marambaia: espessa seção composta por folhelho cinzento e marga cinza-claro com arenitos finos turbidíticos finos de idade terciária. O ambiente deposicional é de talude continental e bacia oceânica. Esta formação aflora no fundo do mar, tendo um contato inferior concordante/interdigitado com a Formação Iguape, concordante com a Formação Itajaí-Açu e discordante com as Formações Santos e Juréia.



**Figura II.5.1.5-1:** Seção Geológica da Bacia de Santos. Fonte: Pereira (1990) e Pereira e Feijó (1994).



**Figura II.5.1.5-2: Coluna estratigráfica da Bacia de Santos.** Fonte: Pereira (1990) e Pereira e Feijó (1994).

## **B) Aspectos Fisiográficos**

A região de interesse deste estudo se situa ao largo de uma extensa faixa litorânea de características variáveis controladas pela topografia local e pela presença de desembocaduras de pequenos rios, golfos e baías naturais.

O polígono que delimita a área de interesse compreende as províncias fisiográficas da plataforma e talude continentais, além do Platô de São Paulo e o sopé continental em sua porção superior.

Esta porção da margem continental sudeste-sul do Brasil apresenta modificações em sua orientação: entre Ilhabela e Paranaguá, a margem tem uma orientação NE-SW, enquanto que desta localidade até a Ilha de Santa Catarina predomina uma direção N-S.

A margem da área estudada foi compartimentada por Zembruski (1979) em três setores: Embaiamento de São Paulo, Florianópolis-Mostardas e Cone do Rio Grande, respectivamente de norte para sul (estes dois últimos setores estão fora da área de interesse específica deste estudo). A fisiografia submarina é marcada por uma Plataforma Continental de baixa declividade (entre 1:600 e 1:1300), de largura variando entre 70 e 230km, bastante estreita no extremo norte da área estudada e mais larga até o limite sul.

O talude continental tem declividade e extensão que se modificam localmente, ora bastante homogêneo, ora dissecado por cânions, ravinas e feições de desabamento submarino enquanto o sopé continental tem relevo bastante acidentado, ocorrendo a partir de distâncias variáveis da costa, que podem atingir mais de 500km. Ocorre na área de interesse uma província fisiográfica conhecida como Platô de São Paulo, separando o talude do sopé continental, entre Ilhabela e o sul de Santa Catarina.

Esta feição é controlada pela presença de depósitos evaporíticos do Aptiano. O arcabouço estrutural e a fisiografia da área de interesse estão apresentados na Figura II.5.1.5-3.

## **B.1) Plataforma Continental**

A Plataforma Continental no Embaiamento de São Paulo ocupa uma área de mais de 140.000 km<sup>2</sup>. A sua largura varia de cerca de 70km à leste de Ilhabela (São Paulo), até mais de 230 km na região entre Iguape e Florianópolis. A declividade desta plataforma é suave, em média 1:1000, oscilando entre 1:600 e 1:1300. Zembruski (1979) relata que ao longo da plataforma interna, geralmente próximo a isóbata de 20 metros, se desenvolve um pequeno declive, correspondendo à zona de transição entre a parte emersa da margem e a Plataforma Continental. Entre Ilhabela e Santos, este declive define uma pequena escarpa com declividade que pode atingir até 1:200, separando a plataforma em dois setores, um interno e outro externo. De Santos até o limite sul da Bacia de Santos, em Florianópolis, este declive se alarga e define um setor intermediário da plataforma, a plataforma média.

A plataforma externa tem declividade e extensão variáveis, e a sua borda ocorre em lâminas d'água entre 90 e 170 metros. Apesar da ausência de rios de grande porte, a plataforma ao largo do Embaiamento de São Paulo é recortada por vários canais que avançam desde a linha de costa e, em alguns casos, se prolongam além do talude continental. Estes canais alongados são rasos e estreitos, dificultando sua representação em mapas de escalas regionais. Ao largo do estado de São Paulo, destacam-se os canais de São Sebastião, Queimada e Cananéia. O canal de Itajaí marca o extremo sul da plataforma no Embaiamento de São Paulo. Segundo Zembruski (*op.cit.*), estes canais têm uma expressão topográfica irrelevante e são de difícil percepção nas cartas batimétricas geradas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN.

A Plataforma Continental na área sul da bacia (frontal à Itajaí) tem cerca de 56 mil km<sup>2</sup>, com largura média de 130km e variando entre 100 e 160km (Zembruski, 1979). A declividade é baixa, entre 1:600 e 1:1000, com a passagem para o talude continental situada em lâminas d'água oscilando entre 140 e 180m. A plataforma tem um relevo bastante suave nessa região.

## **B.2) Talude Continental**

Na área de interesse deste estudo o talude continental caracteriza-se por uma feição de geometria geral convexa, formada pelo empilhamento de quilômetros de sedimentos depositados sobre a margem continental desde o Cretáceo. Na área de interesse, coincidente com o setor do Embaiamento de São Paulo, o talude é influenciado pela movimentação das camadas de evaporitos do Aptiano. A sua largura média oscila em torno de 130km, sendo mais estreito (cerca de 70km) na porção central do Embaiamento de São Paulo (Zembruski, 1979). A passagem da plataforma para o talude é marcada pela presença quase que conspícua de um escarpamento de declividade variando entre 2 e 4°, podendo atingir até mais de 7° onde a remoção de material por movimentos de massa é mais bem marcada (principalmente no norte do setor Embaiamento de São Paulo). O talude superior, sempre mais íngreme e estreito dá lugar a um talude inferior, a partir de 500/800m, com larguras médias de 100km, podendo atingir até mais de 150km localmente.

O talude apresenta uma declividade média oscilando entre 1° e 1,5° e largura que varia entre 60 e 120km no setor Embaiamento de São Paulo. Vários cânions são identificados, alguns dando continuidade mar afora aos canais observados em plataforma (Cânion São Sebastião), outros iniciando no próprio talude (Santos e São Paulo), com direção ortogonal as isóbatas. O talude no setor é ligeiramente côncavo e com poucas perturbações fisiográficas de larga escala, segundo os perfis sísmicos apresentados por Mohriak *et al.* (1995). A base do talude ocorre em torno de 2000m de lâmina d'água devido à presença do Platô de São Paulo, província intermediária entre o talude e o sopé.

## **B.3) Platô de São Paulo**

O Platô de São Paulo é um platô marginal de grande porte, ocorrendo desde o flanco sul da Cadeia de montes submarinos Vitória-Trindade até o extremo sul da bacia de Santos, na altura da Plataforma de Florianópolis (Zembruski, 1979).

A porção sul do Platô coincide com o setor Embaiamento de São Paulo e é onde o maior número de trabalhos científicos foi desenvolvido (Demercian *et al.*, 1993; Mohriak *et al.*, 1995; Cobbold *et al.*, 2001). O Platô se desenvolve em

função da espessa acumulação de camadas evaporíticas que se deformam com a sobrecarga dos sedimentos do Cretáceo superior e Terciário, formando uma vasta província de diápiros, domos e muralhas de sal que até hoje se encontram em movimento. A movimentação do sal deve ter formado caminhos preferenciais para a passagem de sedimentos em direção ao mar profundo, conforme sugerido em Cobbold *et al.*(2001).

Considerando a semelhança fisiográfica e genética entre as porções norte (Bacias de Campos e Espírito Santo) e sul do Platô de São Paulo, pode-se supor que ele, na área estudada, mantenha o mesmo padrão de feições associadas a movimentos de massa como aquelas apresentadas recentemente por Kowsmann *et al.* (2002) para a Bacia de Campos.

Varia entre 1:400 e 1:500 a declividade geral do Platô, com uma largura máxima atingindo cerca de 500km, se estendendo entre as isóbatas de 2000 e 3600m. Duas grandes escarpas subdividem o Platô: uma interna, com desníveis da ordem de 500m e outra externa, que o separa do sopé continental, onde os desníveis podem atingir 1000m junto aos montes submarinos da Cadeia de São Paulo.

#### **B.4) Sopé Continental**

O sopé continental ocorre nos dois setores meridionais, enquanto que no setor Embaiamento de São Paulo apenas uma mínima parte de sua porção proximal está inserida.

O sopé continental caracteriza a transição entre o relevo abrupto dominado pela transferência de sedimentos terrígenos característico do talude continental para um ambiente oceânico abissal, distante de todo aporte de sedimentos da margem.

Segundo Zembruski (1979) a extensão do sopé varia entre 220 e 750km atingindo na sua porção mais externa lâminas d'água superiores a 3000m na área de interesse, com declividades da ordem de 1:150 a 1:400.

### **C) Cobertura Sedimentar**

Ao longo de toda a área estudada, a cobertura sedimentar segue uma distribuição bem organizada. Essa distribuição é caracterizada pela presença de sedimentos terrígenos de composição siliciclástica na plataforma interna e média, e sedimentos de composição carbonática na plataforma externa (Kowsmann e Costa, 1979). São dominados por sedimentos finos pelágicos e hemipelágicos (Figura II. 5. 1. 5- 4) o talude, o Platô de São Paulo e o sopé continental.

Em toda a região de estudo, a Plataforma Continental apresenta fácies sedimentares bastante homogêneas e praticamente contínuas. A plataforma interna é dominada por areias subarcosianas a subortoquartzíticas (Martins *et al.*, 1985; Correa, 1987), com boa seleção e arredondamento, indicando alta maturidade sedimentar. Somente ao norte de Florianópolis e em frente à desembocadura da lagoa dos Patos, lamas de características fluviais interrompem a continuidade dos domínios arenosos da plataforma interna.

Distribui-se por toda a plataforma média as lamas marinhas de plataforma, alcançando em alguns trechos a borda da mesma (em frente à Cananéia e da Ilhabela ao sul de Imbituba). Esta distribuição é interrompida por uma paisagem submarina arenosa, em frente a Santos.

Na área de estudo os sedimentos carbonáticos são mais desenvolvidos na plataforma externa, onde os teores de carbonato de cálcio raramente ultrapassam 70%. Segundo Kowsmann e Costa (*op.cit*), entre Ilhabela e Santos os principais sedimentos carbonáticos encontrados provém da desintegração mecânica de recifes algálicos e misturas de moluscos com briozoários. Para o sul de Santos, muda a contribuição faunística para a composição dos sedimentos. Passam a predominar areias a base de fragmentos de moluscos, cirrípedes e foraminíferos bentônicos e plantônicos. Esta diferenciação, segundo aqueles autores denota o efeito de uma forte influência terrígena na sedimentação. Um forte retrabalhamento mecânico em ambiente de alta energia é sugerido para a plataforma externa em toda a região (Correa, 1987).

No que concerne à distribuição de sedimentos recentes, o talude continental foi alvo de poucos estudos. A maior parte dos trabalhos data ainda das campanhas efetuadas ao longo do Projeto Remac (Kowsmann e Costa, 1979).

Trabalhos mais recentes pouco se aventuraram na porção mais profunda da margem neste setor. Entre eles pode-se citar trabalhos onde foram identificadas feições anômalas no talude superior na porção sul do Embaiamento de São Paulo (Correa e Abreu, 1984).

No talude, grande parte da sedimentação está associada à cobertura de sedimentos finos, lamosos a silto-arenosos, de origem hemipelágica e de forte contribuição de correntes de turbidez. Igualmente, a remoção de sedimentos associada a movimentos de massa ocasiona localmente o afloramento de sedimentos mais antigos pré-consolidados e a possível acumulação junto à base do talude de aventais de sedimentos desabados do talude acima, cuja composição pode ser desde conglomerados intraformacionais de sedimentos lamosos do talude como olistostromas originados a partir do desabamento de blocos da plataforma carbonática adjacente.

Os poucos dados disponíveis, principalmente linhas sísmicas multicanal (Demercian *et al.*, 1993; Mohriak *et al.*, 1995) indicam para a ação de correntes de fundo remodelando a geometria deposicional destes sedimentos. Kowsmann e Costa (1979) e Zembruski (1979) identificaram feições na bacia oceânica características da ação de correntes de fundo. Flood e Shor (1988) e Gonthier *et al.* (2000) comprovaram a presença de correntes de fundo na porção mais externa da margem nas bacias oceânicas da Argentina e do Brasil, associada à passagem da Água de Fundo Antártica, que teria redistribuído o material transferido das águas rasas formando uma província de sedimentação mista turbidítica-contornítica, onde predominam argila e silte hemipelágicos a pelágicos (os sedimentos finos) nas áreas desconfinadas e siltes e areias muito finas (sedimentos mais grossos) nas zonas confinadas aos cursos dos vales submarinos.

#### **D) Caracterização Geotécnica**

As informações disponíveis para a área de interesse referem-se às características do substrato e estabilidade entre o Campo de Merluza e a costa, e são aqui apresentadas.

Na área de interesse o assoalho oceânico apresenta um padrão predominantemente plano, com uma ligeira inclinação para sudeste. O gradiente entre a isóbata de 6 m (próximo à costa) e a plataforma está em torno de 0,1%, podendo ser representado como uma sucessão de declives curtos e extensos terraços planos. Dados provenientes de levantamentos com *Side-Scan-Sonar* mostraram um fundo homogêneo com rara presença de feições isoladas.

Análises de perfis de sub-fundo indicaram a presença de camadas refletoras irregulares, com zonas anômalas, também evidenciando a ocorrência de estruturas de paleo-canal amplamente distribuídas entre a área de Merluza e áreas menos profundas. Com bases nos dados existentes, não foram encontradas evidências da presença de exsudações de gás ou de diápiros de lama.

Resultados de análises granulométricas realizadas em amostras obtidas em furos de sondagem realizados no Campo de Merluza (coletados pela embarcação *Mariner*, 1987, armazenados no Banco de Dados do CENPES), mostram que o substrato é constituído predominantemente por uma areia siltosa, com peso específico médio de  $8 \text{ kN/m}^3$ . Estes valores possibilitam o cálculo do ângulo de atrito da areia para projeto geotécnico (de acordo com a Norma API RP 2 A), com sendo de 30 graus.