

APÊNDICE F**RELATÓRIO DE CONDIÇÕES GEOLÓGICAS BASE**

**CONCESSÃO PATROCINADA DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE CONSTRUÇÃO,
OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E REALIZAÇÃO DOS INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS
PARA A EXPLORAÇÃO DO TÚNEL IMERSO SANTOS-GUARUJÁ**

1. INTRODUÇÃO

O Relatório de Condições Geológicas Base do Túnel Imerso Santos-Guarujá deve ser utilizado em conjunto com os demais desenhos e ensaios citados nesse relatório e apresentados também no Apêndice F. O objetivo deste relatório é de: (i) descrever as condições geológicas-geotécnicas do alinhamento do projeto referencial, (ii) endereçar restrições construtivas associadas a essas condições, (iii) estabelecer linhas base para serem consideradas nas propostas das licitantes, e (iv) ser utilizado de acordo com a Cláusula 21.3 e as demais cláusulas do CONTRATO associadas ao Risco Geológico.

Cabe esclarecer que a seleção dos parâmetros de projeto e seus valores é de responsabilidade da CONCESSIONÁRIA, devendo ser seguidos os requisitos do Anexo 7.

2. DESCRIÇÃO DO PROJETO REFERENCIAL

O projeto referencial, apresentado no Anexo 12, considerou a construção de um túnel imerso entre as cidades de Santos e Guarujá, a implantação de alças de conexão com o viário local e prédios de acessos para pedestres e ciclistas.

O método de construção consiste em elementos pré-moldados de concreto, que são projetados e construídos de forma que possam flutuar e ser transportados para a localização do túnel. Os elementos são então imersos em uma vala dragada no fundo do canal, onde são conectados por meio de juntas de imersão e realizados os acabamentos necessários, como a implantação dos aterros, pavimento e sistemas.

Nos municípios, serão construídas vias rebaixadas por meio do método de *cut and cover*, com o uso de paredes diafragmas estroncadas, com escavação invertida e construídas as rampas, bem como todas as estruturas necessárias para o acesso às vias locais.

O projeto referencial tratado neste Apêndice foi dividido em dois grandes grupos, considerando as características de detalhamento e de investigação dos segmentos apresentados no ANEXO 12:

- **Grupo 1:** é formado pelo TÚNEL e os ACESSOS URBANOS, de acordo com o traçado referencial apresentado no ANEXO 12, com vista geral no desenho DE-42.00.000-A08/201, e na Figura 1;
- **Grupo 2:** trata da parcela dos ACESSOS URBANOS da ligação do viário urbano da cidade do Guarujá às proximidades do km 2 da SPA-248/055.



Figura 1 - Projeto da ligação Santos-Guarujá referencial



Figura 2 – Traçado do Projeto Referencial – Ligação com a SPA-248/055

3. FONTES DE DADOS

3.1. Grupo 1

Foram previstas as investigações geológico-geotécnicas de subsuperfície no local do túnel imerso conforme constantes do relatório RT-42.00.000-G01/001 e desenho DE 42.00.000-G01/001, emitidos em julho de 2013. A programação inicial foi objeto de alterações feitas durante o acompanhamento dos trabalhos de campo para atender as necessidades do projeto e resultou

nos desenhos DE-42.02.201-G01/001, DE-42.03.301 G01/001 e DE-42.04.401-G01/001 e 002, correspondentes às plantas de localização de investigações de Santos, Canal e Guarujá respectivamente. Os trabalhos de campo foram iniciados em julho de 2013 e foram concluídos em dezembro de 2014.

O programa inclui sondagens mistas e sondagens a percussão, posicionadas nos limites previstos para a obra, com espaçamentos da ordem de 50 a 70 m no trecho da Doca Seca e da ordem de 100 m no restante do trecho do lado Guarujá até a Praça 14 Bis e no trecho de jusante do lado Santos, nesse caso devido a interferências de construções existentes. Sondagens a percussão foram previstas nas adjacências do traçado.

Foram efetuados ensaios de infiltração e perda d'água e instalados alguns piezômetros em alguns trechos das sondagens localizadas nos limites da obra. Além das sondagens, foram programados e efetuados em alguns locais denominados clusters, ensaios CPTU, ensaios Vane Test e coleta de amostras sheldies de 5" e 3" para execução de ensaios em laboratório, ao lado de sondagens a percussão e/ou mistas executadas previamente.

Além dessas sondagens e ensaios, outros CPTUs foram efetuados ao lado de sondagens a percussão ou mistas ou ainda intercalados a essas sondagens. Também, além das amostras sheldies, foram coletadas amostras deformadas para ensaios de caracterização e determinação de umidade a cada 2m em algumas sondagens selecionadas.

As sondagens no canal foram feitas sobre uma balsa de grandes dimensões. As sondagens mistas foram executadas com ensaios SPT a cada metro até o impenetrável, e prosseguiram com rotativa até por volta de 3 a 5m em rocha com recuperação de testemunhos no diâmetro N. As sondagens a percussão foram efetuadas, de maneira geral, até se atingir o critério de impenetrável no ensaio SPT em pelo menos três ensaios consecutivos ou ao se atingir o impenetrável no ensaio de lavagem por tempo. Nessas sondagens foram efetuados ensaios de infiltração em trechos selecionados de solo e alguns ensaios de perda d'água em trechos selecionados de rocha.

Para o canal foram previstos levantamentos geofísicos em uma área com dimensões aproximadas de 600 x 500 m. Foram efetuados 45km de levantamentos batimétricos, 19km de sonografia com o sonar de varredura lateral e 48km de perfilagem sísmica contínua. Os resultados das investigações disponíveis foram analisados em seções geológico-geotécnicas ao longo dos limites de desenvolvimento da obra, indicados em cada uma das frentes. Os resultados dos ensaios in situ e de laboratório são apresentados em relatório específico de análise de ensaios geotécnicos.

Os trabalhos geológico-geotécnicos executados estão apresentados considerando as frentes do traçado Guarujá e Doca Seca, Canal, Santos e as frentes referentes às OAEs.

- **Lado Guarujá e Doca Seca:**

As investigações efetuadas na frente Guarujá e Doca Seca estão apresentadas nos Desenhos DE-42.04.401-G01/001 e as seções geológico-geotécnicas nos Desenhos DE-42.04.402-G12/001 a 014. As investigações efetuadas e as seções geológico-geotécnicas elaboradas para as obras de arte especiais (OAE) encontram-se nos Desenhos DE-42.04.401-G07/001 a 002; DE-42.04.402-G07/001 a 002; DE-42.04.403-G07/001 a 002; DE-42.04.405-G07/001 a 004 e DE-42.04.407-G07/001.

Os totais dos serviços para frente Guarujá e Doca Seca, excluindo as OAEs, foram os seguintes:

- Sondagens a percussão – 61 sondagens e 3124,53 m de perfuração e amostragem;

- Sondagens mistas – 11 sondagens e 615,77 m de perfuração e amostragem;
- CPTUS – 21 sondagens e 799,88 m de ensaios;
- Cluster - (local com SP/SM, CPTU, Vane Test, amostragem shelby) – 6 locais;
- Amostras Shelby – 25 amostras e mais 34 amostras coletadas na SP-124 (22 amostras shelbies dos sedimentos, 8 amostras deformadas das areias e 4 amostras deformadas do solo de alteração);
- Piezômetros multiníveis – 2 locais e 7 piezômetros;
- Ensaios de infiltração – 38 ensaios;
- Ensaios de perda d'água – 5 ensaios.

Os totais dos serviços para as OAEs foram os seguintes:

- Sondagens a percussão – 42 sondagens e 2417,53 m de perfuração e amostragem;
- Sondagens mistas – 4 sondagens e 247,96 m de perfuração e amostragem.

- **Canal:**

Na região do canal foram feitas investigações indiretas através de levantamentos geofísicos. Em uma área com dimensões aproximadas de 600 x 500 m, foram efetuados 45 Km lineares de levantamentos batimétricos; 19 Km lineares de sonografia com o sonar de varredura lateral; e 48 Km de perfilagem sísmica contínua com perfilador sísmico.

As investigações diretas por sondagens e ensaios efetuadas na frente Canal estão apresentadas nos Desenhos DE-42.03.301-G01/001 e as seções geológico-geotécnicas nos Desenhos DE-42.03.302-G12/001 a 011.

Os totais dos serviços foram os seguintes:

- Sondagens a percussão – 46 sondagens e 2115,78 m de perfuração e amostragem;
- Sondagens mistas – 4 sondagens e 237,22 m de perfuração e amostragem;
- CPTUS – 22 sondagens e 755,18 m de ensaios;
- Cluster - (local com SP/SM, CPTU, Vane Test, amostragem shelby) – 6 locais;
- Amostras Shelby – 17 amostras.
- Canal:

- **Lado Santos:**

As investigações efetuadas na frente Santos estão apresentadas no Desenho DE-42.02.201-G01/001 e as seções geológico-geotécnicas nos Desenhos DE-42.02.202-G12/001 a 019. As sondagens executadas e as seções geológico-geotécnicas elaboradas para as obras de arte especiais (OAE), encontram-se nos Desenhos DE-42.02.201-G07/001; DE-42.02.202-G07/001 a 002; DE-42.02.203 G07/001; DE-42.02.204-G07/001 e DE-42.02.205-G07/001.

Os totais dos serviços para frente Santos, excluindo as OAEs, foram os seguintes:

- Sondagens a percussão – 38 sondagens e 1707,19 m de perfuração e amostragem;
- Sondagens mistas – 27 sondagens e 1632,61 m de perfuração e amostragem;
- CPTUS – 20 sondagens e 758,60 m de ensaios;
- Cluster - (local com SP/SM, CPTU, Vane Test, amostragem shelby)
- Amostras Shelby – 20 amostras
- Piezômetros multiníveis – 3 locais e 7 piezômetros;
- Ensaios de infiltração – 14 ensaios;
- Ensaios de perda d'água – 4 ensaios.

Os totais de serviços para as OAEs do lado Santos foram os seguintes:

- Sondagens a percussão – 3 sondagens e 124,43 m de perfuração e amostragem;
- Sondagens mistas – 29 sondagens e 1266,64 m de perfuração e amostragem.

3.2. Grupo 2

O trecho do Grupo 2 não apresenta ensaios geológico-geotécnicos, devendo a LICITANTE considerar na sua proposta a solução adequada.

4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS E DE SISMICIDADE REGIONAIS

4.1. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

De acordo com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (PONÇANO et al., 1981), a região de interesse está inserida na Província Costeira, que compreende porções da Zona de Serrania Costeira – Subzona Serra do Mar e da Zona Baixadas Litorâneas, sendo predominantes as porções da Zona Baixadas Litorâneas, caracterizada por relevos associados à sedimentação quaternária – Planícies fluviais, Planícies flúvio-lagunares, Planícies de maré e Baixios – e por morros e morrotes isolados. Uma sucinta descrição dessas unidades de relevo é apresentada a seguir:

- Planícies fluviais: tratam-se de áreas planas, levemente inclinadas em direção ao rio e bem desenvolvidas nos sopés das serras. Constituídas por seixos, blocos de quartzito, granito e xistos, intercalados com areias médias a grossas.
- Planícies flúvio-lagunares: são áreas planas onduladas, de movimentação de canais meandrantos. Constituídas por areia, silte, argila e matéria orgânica.
- Planícies de maré: são áreas planas na faixa de oscilação das marés e de encontro de águas doce e salgada, abrigadas de circulações mais enérgicas. Constituídas por solos moles de silte e argila e grande quantidade de restos vegetais.
- Baixios: são feições de deposição submersas, expostas nas marés baixas. Constituídas por argila siltosa, silte e areia muito fina.
- Morros e morrotes isolados: são formas isoladas e desniveladas, de topos estreitos e convexos e altitudes entre 80 e 150 m. Constituídos por migmatitos estromatíticos, ofalmíticos e nebulíticos. Caracterizam os morros do Marapé e do Embaré.

Os rios na região da Baixada Santista adquirem morfologia meandrante a entrelaçada, resultado das baixas declividades, que induzem a pouca competência nos processos de erosão e transporte de sedimentos. Neste trecho as drenagens da região tendem a realizar o transporte dos sedimentos por suspensão, predominando assim os sedimentos finos, argilosos a siltosos.

O Estuário de Santos encontra-se em permanente processo de sedimentação através do aporte de material que chega a ele, através dos cursos d'água e das correntes marinhas. O material carregado é depositado gradualmente na planície, sendo que os mais grosseiros (blocos e cascalhos) se acumulam mais próximos aos sopés da serra, seguidos por cascalhos finos, areias grossas, médias e finas, e finalmente os siltes e argilas, que sob influência da água marinha proporciona a floculação de argilas, resultando na deposição de material escuro e lamacento que aumenta a cada período de maré cheia até formar o ambiente propício ao surgimento de manguezais.

Com relação à sedimentação, ainda, de acordo com FÚLFARO & PONÇANO (1976) o Estuário de Santos é considerado uma região em equilíbrio e que não apresenta características de assoreamento rápido. As maiores taxas de sedimentação ocorrem apenas no Largo do Canéu,

na extremidade sul dos canais de São Vicente e Bertioga e na saída do canal do Porto para a baía. Na região do Largo do Canéu, quando se compara a folha topográfica de Santos, elaborada com fotos aéreas de 1962, e as fotografias aéreas de 2002, constata-se que o assoreamento foi de grande magnitude, provocando mudanças significativas no relevo dessa região.

A ocorrência de processos erosivos nas escarpas da serra pode identificar o assoreamento no Largo do Canéu, e indiretamente favorecer o assoreamento do Canal do Porto de Santos. Ainda, é importante assinalar que a ocorrência de processos erosivos nas encostas do Planalto e escarpas da Serra do Mar tem intensificado o fornecimento de sedimentos para a planície costeira, provocando, nos últimos 40 anos, significativo assoreamento nas proximidades da ilha dos Bagres, praticamente interligada à planície.

No interior do canal do Estuário de Santos, além das camadas de sedimentos, existem topos de maciços rochosos correspondentes a antigas ilhas inundadas pelos processos de oscilação do nível marinho no período holocênico. Aparecem em diversas profundidades, normalmente com mais de 10 m de sedimentos recobrimo sua parte mais elevada.

4.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS

Nas proximidades do canal de Santos, o arcabouço geológico regional compreende rochas do embasamento cristalino com idades pré-cambrianas, algumas manifestações ígneas cambrianas e depósitos sedimentares quaternários. A formação e disposição atual dessas rochas foram controladas pela evolução geológica do litoral paulista, que proporcionou uma grande estruturação geológica, impressa principalmente nos terrenos cristalinos mais antigos e marcada por zonas de cisalhamento transcorrentes, com direção ENE, desenvolvidas entre o final do Pré-Cambriano e início do Paleozóico. A mais proeminente dessas estruturas é a zona de cisalhamento ou falha de Cubatão.

Cabe ressaltar que, grosso modo, a orientação da linha de costa é condicionada pelas estruturas geológicas e até mesmo as unidades ígneas cambrianas e sedimentares cenozóicas mostram algum condicionamento, por vezes, através da reativação dessas estruturas nos períodos mais modernos. Regionalmente, o arcabouço tectônico da região da Baixada Santista compreende os Domínios Embu (Complexo Embu – Mesoproterozóico) e Costeiro (Complexo Costeiro – Neoproterozóico), os quais são separados pela Zona de Cisalhamento Cubatão (CPRM, 1999).

As unidades metamórficas desses complexos são intrudidas por rochas granitóides. Tanto unidades metamórficas como ígneas podem ser recobertas parcialmente por coberturas sedimentares quaternárias. Estas coberturas constituem em grande parte a Planície Costeira e correspondem a depósitos marinhos e lagunares holocênicos e depósitos continentais, como aluviões, corpos de tálus e coluviões. Na região do Estuário de Santos, são encontradas unidades do Domínio Costeiro e das Coberturas Sedimentares Quaternárias. A distribuição das unidades pode ser observada na Figura 3 – Mapa Geológico Regional.

- **Domínio costeiro:** ocorre na região na forma de morros isolados inseridos na Planície Costeira ou como uma grande faixa na Serra do Mar, encaixada entre as Zonas de Cisalhamento Cubatão e Freires-Lourenço. Segundo CPRM (1999), dentro do contexto regional de interesse encontram-se três unidades deste Complexo: unidade de migmatitos com estruturas diversas, notadamente nebulítica, schlieren e estromatítica (esta unidade sustenta os morros do Botelho, Tejereba e Engenho, no Guarujá), unidade de (hornblenda)-biotita migmatito e/ou granito-gnaisses porfiroclástico e unidade de biotita gnaisses que gradam para migmatitos estromatíticos.
- **Rochas granitóides:** de idade Neoproterozóica-Paleozóica, são consideradas intrusivas no Complexo Costeiro e constituem, na região da Baixada Santista, cinco

maciços rochosos. Dentro do contexto regional destaca-se o maciço rochoso granitóide dos Morros de São Bento, Santa Maria, da Cachoeira, do Marapé e Voturuá, cuja composição é de biotita granito, cinza-rosado, porfirítico, correspondente aos Maciços Granitóides Santos e Guarujá, e o maciço rochoso dos morros do Itararé, Santa Terezinha e José Menino, constituídos por (muscovita)-biotita granito, róseo, maciço e equigranular, correspondente ao Maciço Granitóide Santos-Itararé.

- **Coberturas Sedimentares Quaternárias:** recobrem parcialmente as unidades do Complexo Costeiro e alguns maciços granitóides e constituem a Planície Sedimentar de Santos. Esta planície é formada por depósitos marinhos pleistocênicos, marinhos e lagunares holocênicos e depósitos continentais (SUGUIO & MARTIN, 1978). Os depósitos pleistocênicos correspondem a depósitos formados em ambiente transicional, continental-marinho, formados na base por sedimentos argilo-arenosos, e no topo, por sedimentos arenosos (MARTIN & SUGUIO, 1976). Estes depósitos pertencem a Formação Cananéia, definida por SUGUIO & PETRI (1973). As argilas recebem o nome de “transicionais” por sua gênese estar associada a ambiente marinho-continental (SUGUIO & MARTIN, 1978) e podem conter folhas vegetais carbonizadas.

Os sedimentos argilo-arenosos formaram-se em ambiente deposicional que grada de continental para marinho, enquanto os sedimentos arenosos do topo da Formação resultaram da deposição em ambiente litorâneo (MARTIN & SUGUIO, 1976). É comum a ocorrência de tubos fósseis de Callianassa, indicadores da posição do nível médio da maré na época em que viviam estes organismos (SUGUIO & MARTIN, 1976b).

Acima da Formação Cananéia são encontradas areias marinhas litorâneas com estruturas de cordões litorâneos, que indicam fase regressiva. Estas areias afloram atualmente na região de Samaritá e de São Vicente (MARTIN & SUGUIO, 1976). Os depósitos holocênicos correspondem a depósitos marinhos e lagunares, os quais podem ser constituídos por sedimentos flúvio-lagunares e de baías, sedimentos de mangues e pântanos ou sedimentos de baixios.

Os sedimentos flúvio-lagunares são formados por sedimentos, predominantemente, argilo-arenosos. Ocorrem também camadas de areias resultantes do retrabalhamento dos sedimentos da Formação Cananéia, mais antiga. Os sedimentos flúvio-lagunares são correlacionáveis com a Formação Ilha Comprida (SUGUIO & MARTIN, 1994). Tratam-se de argilas com restos de conchas e vegetais, cinza-escuras.

Sedimentos de mangues e pântanos constituem os depósitos mistos atuais e compreendem argilas e areias. Ocorrem restritos às margens de lagunas, canais de maré e cursos inferiores de rios da Planície Costeira.

Os sedimentos de baixios são constituídos por areias finas. Estes depósitos resultam da movimentação de correntes associadas à variação de maré, que coloca argilas em suspensão e provoca a concentração das areias. As maiores ocorrências de baixios podem ser encontradas no Largo do Canéu e no Largo de Santa Rita.

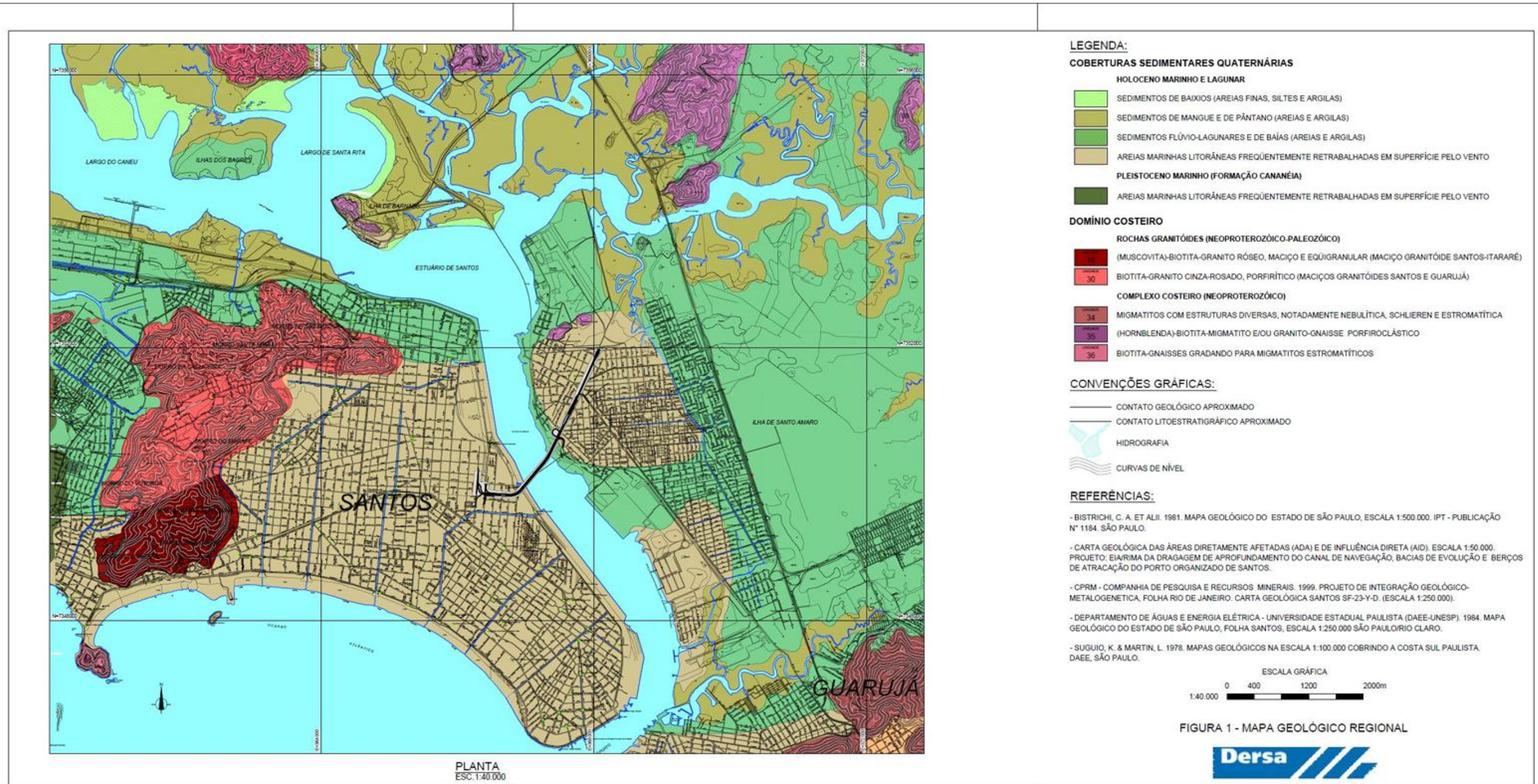


Figura 3 – Mapa Geológico Regional

4.3. ASPECTOS GENÉTICOS DAS COBERTURAS SEDIMENTARES

A região da Baixada Santista foi profundamente afetada pelas mudanças no nível do mar (MNM) ocorridas nos últimos 25.000 anos conforme indicado na Figura 4. Por volta de 17.000 anos A.P., ocorreu um intenso resfriamento da Terra, com o gelo dos polos avançando para o equador. O congelamento da água provocou o abaixamento do nível do mar em cerca de 110m, estabelecendo-se um novo nível de base para as drenagens que desciam da Serra do Mar. Com maior poder erosivo os rios foram aprofundados, seus vales se alargaram e coalesceram dando origem a uma baía na região de Santos.

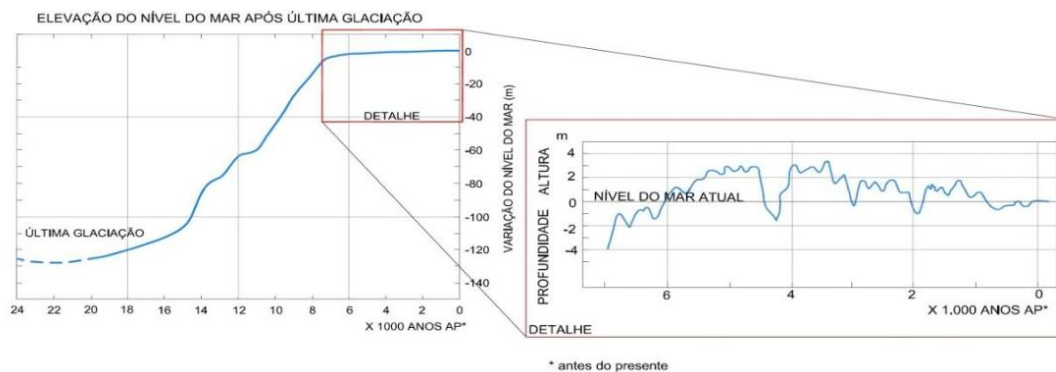


Figura 4 - Variação do Nível do Mar nos Últimos 25.000 anos.

Com o aquecimento do planeta, o nível do mar voltou a subir estabelecendo ambientes de praias, mangues e lagunas, com deposição de sedimentos marinhos e flúvio-lagunares, em substituição ao ambiente anterior predominantemente erosivo. Como a elevação do nível do mar apresentou oscilações, ocorreram avanços da linha de praia em direção ao continente (transgressões marinhas) e recuos (regressões). Esses processos repetiram-se ao longo do tempo, resultando em complexas intercalações de camadas argilosas e arenosas. Na fase inicial da elevação do nível do mar os sedimentos marinhos tiveram contribuição dos materiais carregados pelos rios que abasteciam o estuário.

Assim, a gênese dos sedimentos flúvio-lagunares holocênicos e transicionais pleistocênicos estão relacionadas a variações do nível do mar ligadas a flutuações glácio eustáticas, conforme elucidado por SUGUIO & MARTIN (1978). Os depósitos pleistocênicos e holocênicos associam-se a eventos de transgressão e regressão iniciados entre 120.000 e 100.000 anos A.P. (SUGUIO & MARTIN, 1978), entremeados por um intenso processo erosivo. Os depósitos pleistocênicos compreendem sedimentos marinhos-continentais constituídos por areias, em parte retrabalhadas pelo vento, e argilas, estas últimas denominadas por MASSAD (1986, 1996) “Argilas Transicionais” (AT). De acordo com CPRM (1999), estes depósitos pertencem à Formação Cananéia, formada durante uma fase transgressiva, denominada Transgressão Cananeense (120.000 – 100.000 anos A.P.), durante a qual o nível do mar estaria 7 m acima do atual. Uma fase regressiva posterior (17.000 anos A.P.), em função de um evento de glaciação, teria abaixado 110 m o nível do mar, implicando em forte erosão dos sedimentos da Formação Cananéia (SUGUIO & MARTIN, 1978).

Os sedimentos flúvio-lagunares e de baías, denominados SFL (MASSAD, 1985, 1986, 1996), na região de interesse, compreendem argilas moles a muito moles. Estes depósitos têm sua gênese associada à Transgressão Santos (7.500 – 5.000 anos A.P.), durante a qual teria se formado um sistema de lagunas a partir da ingressão do mar no continente. Estes depósitos podem atingir até 50 m de espessura (SUGUIO & MARTIN, 1978). A Figura 5 apresenta o modelo de evolução

geológica dos depósitos pleistocênicos e holocênicos, elaborado por SUGUIO & MARTIN (1976a). SUGUIO & MARTIN (1976a) propuseram cinco estágios evolutivos para a formação das planícies sedimentares paulistas, conforme pode ser observado na Figura 5, os quais correspondem a:

- 1º estágio – máximo da Transgressão Cananéia (120.000 anos A.P.): o mar teria atingido o sopé da Serra do Mar; deposição dos sedimentos da Formação Cananéia.
- 2º estágio: deposição de cordões litorâneos no topo dos depósitos da Formação Cananéia (areias marinhas litorâneas), durante fase regressiva após o máximo da Transgressão Cananéia.
- 3º estágio – máximo da regressão: o nível marinho encontrava-se aproximadamente 100 m abaixo do atual; erosão fluvial parcial dos depósitos da Formação Cananéia.
- 4º estágio – início da Transgressão Santos: formação de um sistema lagunar por ocasião da ingressão do mar no continente; deposição de sedimentos areno-argilosos ricos em matéria orgânica; erosão dos sedimentos pleistocênicos da Formação Cananéia e formação, por retrabalhamento, de depósitos arenosos.
- 5º estágio: o nível do mar retorna ao atual; deposição de cordões litorâneos.

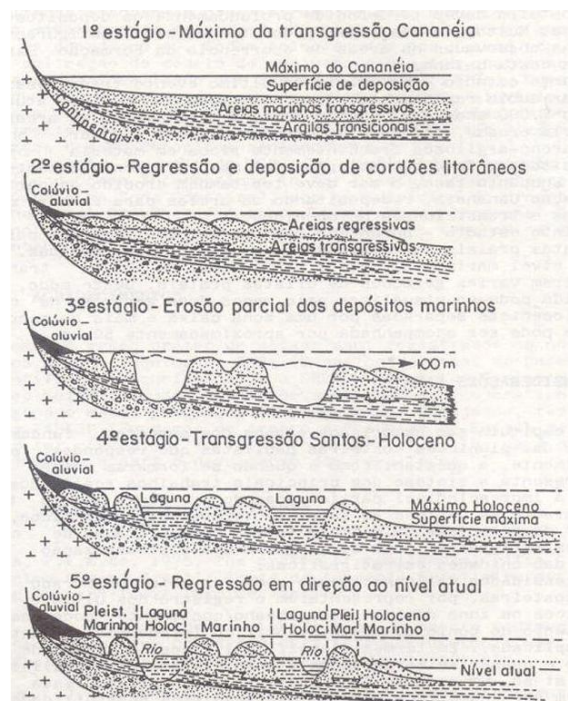


Figura 5 - Estágios Evolutivos da Gênese das Planícies Sedimentares Paulistas Propostos por SUGUIO & MARTIN (1976a).

Com relação à formação da paleobaía santista, Ab'Saber (1965 apud MASSAD, 2009) sugere a existência de dois núcleos de direção NE-SW bem definidos na mesma, conforme Figura 6.



O Núcleo 2 estaria localizado entre os Maciços Monte Serrat-Itaipu e o Espigão Central da Ilha Santo Amaro. As areias pleistocênicas deste local foram erodidas durante os 2º e 3º estágios (Figura 5); restam resquícios de argilas transicionais apenas em profundidade. A restinga estaria apoiada na Ponta de Itaipu e na extremidade mais avançada para o mar do Espigão da Ilha de Santo Amaro. No seu costado desenvolveu-se uma grande baía, transformada posteriormente em laguna. Neste Núcleo, portanto, a sedimentação ocorreu em águas tranquilas de baías. Assim, os depósitos apresentam maior homogeneidade nas camadas de argila, com pouca intercalação de camadas de areias.

Estes eventos ocorreram em zonas de estruturas geológicas que mostram evidências de movimentos intermitentes ao longo do tempo, na escala de milhões e milhares de anos. As

regiões de maior atividade sísmica foram identificadas por HASUI et al. (1982) como zonas sismogênicas, zonas onde são gerados os sismos e onde as liberações de energia sísmica vinculam-se a um mesmo conjunto de processos geológicos. A mais recente atualização sobre as zonas sismogênicas foi apresentada por MIOTO (1993).

Estas zonas contêm os maiores eventos sísmicos, o contorno dos maiores efeitos causados pela propagação das ondas sísmicas e as características de mobilidade terciária dos seus terrenos rochosos. De interesse para o túnel imerso, são as zonas sismogênicas de Cananéia e de Cunha. Na Zona Sismogênica Cananéia, localizada entre Barra do Turvo e Peruíbe até Bocaiuva do Sul, Morretes e Matinhos, os maiores eventos são os de Cananéia, ocorridos em 1789 (V-VI MM) e 1946 (4,6 e V MM). Também são importantes aqueles de Paranaguá (1887, IV MM) e Rio Vermelho (1978, 3,3 e IV MM). Em 1971, vários eventos ocorreram associados ao reservatório de Capivari-Cachoeira, com intensidade máxima VI MM.

Entre Santos e Bananal identifica-se a Zona Sismogênica de Cunha. O maior sismo corresponde ao de Lorena (1861), que atingiu magnitude 4,4 e intensidade máxima de V MM. Outros eventos importantes são o de Cunha (1967), com parâmetros de 4,1 e VI MM, e o de São Pedro e São Paulo (RJ), de 1886, com 4,3 e V MM. Próximo ao reservatório de Paraibuna-Paraitinga, eventos sísmicos são registrados desde 1977, com 3,3 e IV MM. Junto ao reservatório de Jaguari, os sismos foram registrados a partir de 1985, tendo o maior atingido 3,0 e VI MM. No distrito de Monsuaba (Angra dos Reis, RJ), em 1988, observaram-se eventos nas encostas da Serra do Mar com magnitude 3,2 e V MM, com áreas de efeitos muito restritos. MIOTO (1984, 1996) apresentou estudos de recorrência de sismos para o Sudeste brasileiro, mostrando probabilidade de 83 a 98 % de o maior sismo em 5 anos ser igual ou menor que VI MM, com período de retorno de 6 a 40 anos.

Avaliação de risco sísmico considerando magnitude foi apresentada por BERROCAL et al. (1996). Um evento de magnitude 4 apresenta 19% de probabilidade de ocorrer no intervalo de 1 ano e probabilidade próxima a 100% no intervalo de 25 anos. Um evento de magnitude 5 apresenta 2% de probabilidade de ocorrer no intervalo de 1 ano e 87% de probabilidade de ocorrer no intervalo de 100 anos.

BERROCAL et al. (1996) em análise de sismos do Sudeste brasileiro apresentou intervalos de recorrência para sismos de magnitudes 4,1; 4,8; 5,1; 5,5 e 6,3, respectivamente de 17, 100, 200, 600 e 4.000 anos. Observou que os intervalos de recorrência previstos são consistentes com os valores observados na Província Sismotectônica do Embasamento Pré – Cambriano até magnitudes de 5, mas para valores acima os valores são inconsistentes com os observados, uma vez que o intervalo de observação foi de apenas 225 anos.

Na Figura 7 são apresentados os eventos no Estado de São Paulo com base no Boletim Sísmico Brasileiro e no Mapa Interativo de Sismicidade do Brasil (SisGIs), ambos do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), em consulta realizada em março de 2013. Os registros sísmicos estão compreendidos entre 1720 até a data de consulta.

Com base nas magnitudes e intensidades dos eventos sísmicos registrados pode-se avaliar a possibilidade de ocorrência de eventos com acelerações na faixa de 0,030 a 0,080 g na área de interesse.

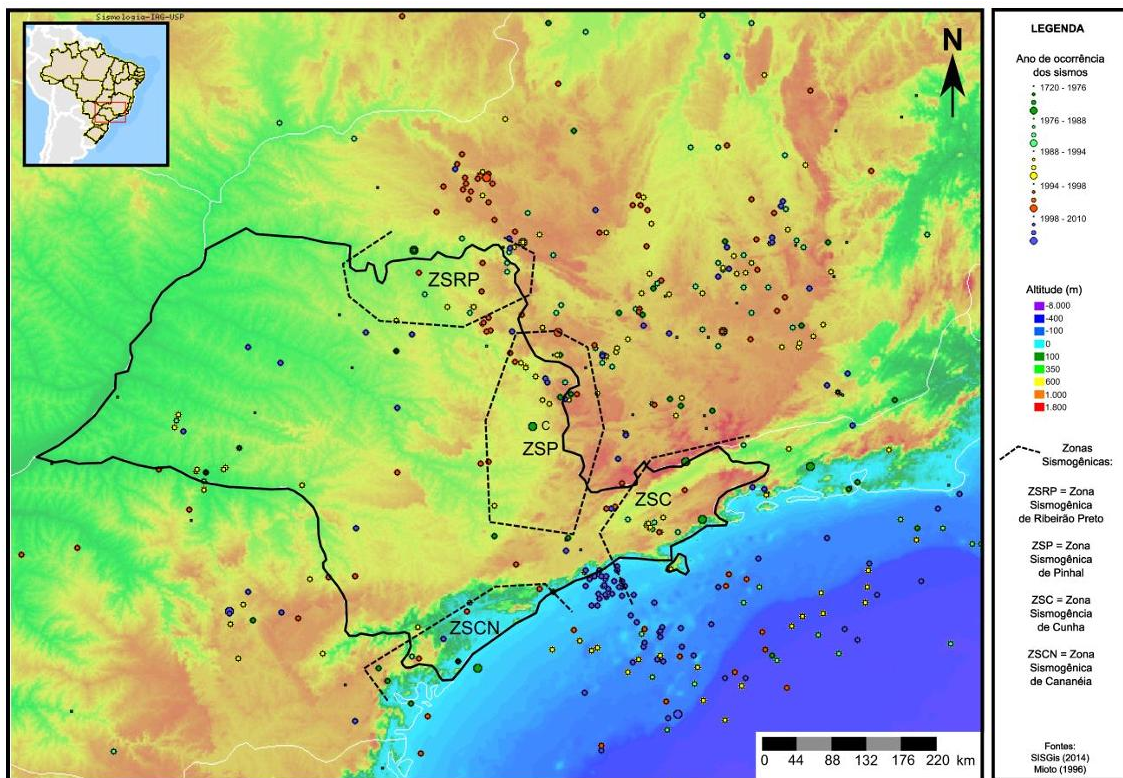


Figura 7 - A. Sismos com Magnitude Maior ou Igual a 2 mb Ocorridos no Estado de São Paulo, no Período Compreendido entre Novembro de 1720 até Março de 2013 (o tamanho dos círculos indica a magnitude ou intensidade dos eventos).

5. CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES LOCAIS

5.1. UNIDADES GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS E NÍVEL DA ÁGUA

5.1.1. Caracterização das unidades geológicas-geotécnicas

São observadas as seguintes unidades geológico-geotécnicas no local do Túnel Imerso Santos-Guarujá: aterro (At), sedimentos argilosos denominados flúvio-lagunares (SFL) e argilas transicionais (AT) recobertos e intercalados por três níveis de sedimentos arenosos (denominados do topo para a base, respectivamente Ar1, Ar2 e Ar3). O pacote de sedimentos ocorre sobre solo de alteração de rochas cristalinas e em alguns casos diretamente sobre rocha alterada mole, que normalmente recobrem as rochas duras. Essas rochas são constituídas por gnaisses, migmatitos e granitos e localmente por pegmatitos, porções máficas e possivelmente lentes de quartzito. O topo da rocha alterada mole foi definido quando atingido 50 golpes para a penetração de 30 centímetros do amostrador SPT, ou a relação 2 golpes/1 cm no ensaio SPT.

As principais características dessas unidades são apresentadas abaixo.

- **Aterro (At)** – Constituído por materiais diversos. As espessuras são da ordem de 1 a 2 m e localmente atingem 3 a 4m.
- **Sedimentos Flúvio – Lagunares (SFL)** – Argila orgânica, muitas vezes com micas e fragmentos de conchas, ocorrência de restos vegetais em alguns trechos; apresenta-se às vezes arenosa e frequentemente com porções e/ou níveis descontínuos de areia, características observadas em amostras do bico do amostrador, de forma muito frequente e na maioria das sondagens, na base da camada; raramente mostra lentes

com espessura métrica de areia muito fina a fina lavada ou com porções e/ou níveis argilosos; cinza escuro e preta; SPT<4;

- **SFLa** - similar a argila orgânica SFL, pouco arenosa, com aspecto floculado, que possivelmente corresponde a uma fase mais recente de deposição. Essa unidade está presente apenas na frente canal, lado Guarujá.
- **SFLb** - similar a argila orgânica SFL, ocorrendo em profundidade e SPT, de maneira geral, SPT < 4 e 5. Normalmente ocorre sobre as argilas transicionais (AT). Algumas vezes na posição da ocorrência de SFLb apresentam-se argilas arenosas e/ou argilas com níveis e/ou porções arenosas ou ainda areias argilosas.
- **Argilas transicionais (AT)** – Argila siltosa, às vezes arenosa, com micas, frequentemente com turfa e raramente com fragmentos de conchas; com lentes de espessura métrica de areia fina ou de areia fina, média e grossa, lavada ou com porções e/ou níveis argilosos; cinza claro, cinza esverdeado, marrom acinzentado e cinza escuro; SPT >5.
- **Sedimentos Arenosos (Ar)**
 - **Ar1**- Areia muito fina a fina frequentemente lavada ou pouco siltosa/argilosa (Ar1a); com micas, muitas vezes apresenta-se argilosa ou com porções e/ou níveis argilosos, ou argilosa com porções e/ou níveis de areia lavada (Ar1b), principalmente nas proximidades do contato com o SFL; cinza, marrom acinzentado e marrom amarelado.
 - **Ar2** – Areia fina lavada ou pouco siltosa/argilosa (Ar2a), com porções e/ou níveis argilosos (Ar2b), ou areia argilosa com porções e/ou níveis de areia lavada (Ar2c), com micas e muitas vezes com fragmentos de conchas e restos vegetais; cinza e cinza escuro.
 - **Ar3** – Areia média a grossa, às vezes fina, com grãos de quartzo subangulosos, poucas vezes com pedregulhos de até 7 cm, quase sempre lavada ou pouco siltosa/argilosa, as vezes com trechos argilosos; com micas e às vezes com restos vegetais; cinza claro.
- **Solo de alteração de gnaiss, migmatito, granito** - Silte arenoso pouco argiloso e areia fina a média pouco argilosa, com micas; cinza, cinza esverdeado e branco.
- **Solo de alteração de pegmatito - SA branco** -Silte e silte arenoso com areia grossa e fragmentos de quartzo, caulínico, micáceo.
- **Solo de alteração de quartzito** – Areia fina pouco argilosa, micácea, esbranquiçada.
- **Solo de alteração de rocha máfica** – Argila siltosa pouco arenosa, cinza esverdeado.
- **Rocha alterada mole (RAM), dura (RAD) e sã (RS)** – Gnaiss, migmatito, granito, pegmatito e localmente quartzito e rocha máfica.

5.1.2. Profundidade e espessura das camadas geológicas-geotécnicas e nível da água

Foram elaboradas seções que representam a profundidade e espessura das camadas geológicas-geotécnicas e a representação do nível de água, e estão apresentadas nos desenhos listados a seguir:

- Do lado Guarujá entre a margem esquerda do canal e o término da Rua Dr. Guilherme Guinle e Rua Mato Grosso são mostradas nos Desenhos DE-42.04.402-G12/001 a 007 em uma seção longitudinal junto ao limite montante da obra e nos Desenhos DE-42.04.402-G12/008 a 014 junto ao limite jusante. São apresentadas também as seções geológico-geotécnicas longitudinais paralelas ao eixo a montante (DE-42.04.402-G12/015 a 019) e a jusante (DE-42.04.402 G12/020 a 024). As seções transversais ao

eixo são mostradas nos Desenhos DE-42.04.402-G12/025 a 038. As seções geológico-geotécnicas elaboradas para as OAEs estão nos Desenhos DE-42.04.401-G07/001 a 002; DE-42.04.402-G07/001 a 002; DE 42.04.403-G07/001 a 002; DE-42.04.405-G07/001 a 004 e DE-42.04.407-G07/001.

- Na região do canal – lados Guarujá e Santos e porção central do canal – trechos onde estão disponíveis investigações por sondagens e ensaios, são mostradas nos Desenho DE-42.03.302 G12/001 a 002 em uma seção longitudinal junto ao limite montante da obra e no Desenho DE-42.03.302-G12/003 a 004 junto ao limite jusante. As seções transversais ao eixo da obra são mostradas nos Desenhos DE-42.03.302-G12/005 a 011.
- Do lado Santos entre a Av. Senador Dantas e a margem direita do canal são mostradas nos Desenhos DE 42.02.202-G12/001 a 003 em uma seção longitudinal junto ao limite montante da obra e nos Desenhos DE-42.02.202-G12/004 a 006 junto ao limite jusante, bem como nas seções geológico-geotécnicas longitudinais paralelas ao eixo da obra a montante (DE 42.02.202-G12/007 e 008) e a jusante (DE-42.02.202-G12/009 a 011). As seções transversais ao eixo da obra são mostradas nos Desenhos DE-42.02.202-G12/012 a 019. Foram também elaboradas seções geológico-geotécnicas para as OAEs apresentadas nos Desenhos DE-42.02.201-G07/001, DE-42.02.202-G07/001 a 002, DE-42.02.203 G07/001, DE-42.02.204-G07/001 e DE-42.02.205-G07/001.

5.1.3. Características do lado Guarujá, Canal e lado Santos:

- **Lado Guarujá:**

Na região do emboque no Guarujá, o contato entre o solo de alteração e os sedimentos situa se aproximadamente entre as cotas -32, -36 e -40m. A partir da estaca 140 em direção à Praça 14 Bis, esse contato (muitas vezes contato de sedimentos com rocha alterada mole) situa-se em níveis mais baixos por volta das cotas - 43 e - 48 m. A partir da Praça 14 Bis até o final do traçado o contato está por volta das cotas -40 e -50 m.

A camada de argila SFL presente mais próxima à superfície apresentou valores da ordem de zero golpes para a penetração total do amostrador e até além da sua extensão, de maneira geral quando as sondagens foram feitas com trado mecanizado e valores, de maneira geral, da ordem de 1 a 2 golpes no caso de sondagem a percussão convencional. Essa camada é caracterizada também pela alta frequência de conchas.

A camada de argila AT com ocorrência em profundidade apresenta valores de SPT mais elevados (normalmente >5 golpes) e às vezes da ordem de 10 a 15 golpes, principalmente no caso de maior conteúdo de areia, de ocorrência de restos vegetais carbonizados ou de pedregulhos. Nas camadas arenosas Ar2, algumas vezes foram observados valores de SPT com valores anômalos e muito baixos, muitas vezes associados à ocorrência de fluxo de areia para o interior da sondagem. As camadas arenosas Ar1, Ar2 e Ar3, de uma maneira geral, apresentam valores de permeabilidades relativamente elevados e certamente com contrastes elevados em relação às argilas SFL e AT que estão em contato com essas areias. Essas características são esperadas, pois essas camadas são constituídas por areias finas praticamente sem finos, ainda que apresentem porções e/ou níveis argilosos ou de areia argilosa, no caso das camadas Ar1 e Ar2, e por areias predominantemente média e grossa, de maneira geral sem finos, no caso da Ar3.

Essas areias, de maneira geral, permeáveis, estão confinadas pelas camadas de argila e controlam a percolação do pacote sedimentar. Ensaios de infiltração mostraram valores entre $7,15 \times 10^{-5}$ e $1,06 \times 10^{-3}$ cm/s, com muitos valores da ordem de 10^{-4} cm/s para a camada Ar2 e entre $4,07 \times 10^{-6}$ a $1,16 \times 10^{-3}$ cm/s para a camada Ar3, com muitos valores acima de 5×10^{-4} cm/s. Quando efetuados ensaios onde são monitorados volumes maiores, como em ensaios de

bombeamento com piezômetros, têm sido observados valores maiores para as permeabilidades em relação àquelas de ensaios locais como os de infiltração. Dessa forma e considerando a composição granulométrica observada nas amostras, os valores de permeabilidade dessas areias podem ser majorados de 5 a 10 vezes no caso das areias Ar2 e de pelo menos 10 a 50 vezes no caso das areias Ar3.

Essas estimativas são apresentadas com base na experiência de outras obras onde foram efetuados ensaios tridimensionais de bombeamento com instrumentação em várias escalas e também ensaios de infiltração. Portanto, são areias permeáveis e confinadas por camadas de argila e representam importante condicionante para a estanqueidade na região das juntas dos painéis, uma vez que devem ser atravessadas pelos diafragmas.

A espessura do solo de alteração é variável, com predominância de valores entre 5 e 13 m. Quanto às características do solo de alteração, observa-se que muitas vezes se apresenta compacto a muito compacto, já a partir do contato com os sedimentos. A ocorrência de solo de alteração de alta compactidade pode dificultar a escavação das paredes diafragmas previstas em projeto e o engaste dessas paredes abaixo do contato com os sedimentos, em solo de alteração ou rocha alterada mole, podendo ser necessário o emprego de equipamentos para escavação em rocha e não apenas clam shell.

Também pode ser de importância para o diafragma o solo de alteração de pegmatitos – denominado SA branco, especialmente quando pouco ou mediantemente compacto, de natureza siltosa e possivelmente muito erodível, em casos de apresentar fraturas e/ou veios arenosos e quartzosos de condutividade hidráulica maior e contrastante com aquela do solo de alteração.

Da mesma forma que as areias atravessadas pelo diafragma representam importante condicionante para a estanqueidade na região das juntas dos painéis, esse solo de alteração pode representar importante condicionante para a estanqueidade na base do painel. Ensaaios de infiltração no solo de alteração apresentaram valores da ordem de $6,18 \times 10^{-5}$ cm/s a $5,83 \times 10^{-4}$ cm/s, prevendo-se que os valores mais elevados estejam associados aos solos arenosos com poucos finos. No caso do SA branco esses valores estão entre $7,95 \times 10^{-6}$ cm/s a $1,49 \times 10^{-3}$ cm/s. Ensaaios de perda d'água em rocha mostraram perdas d'água específica nulas a 2,94 (l/min)/(m.kg/cm²). Esses valores relativamente baixos estão associados a maciços muito e pouco fraturados. Os níveis d'água medidos nas sondagens estão por volta da cota zero a +1m e em alguns casos em cota mais baixa, possivelmente refletindo condição de leitura diferente da condição de primeiro NA obtido durante a execução da sondagem.

Os níveis d'água medidos nos piezômetros instalados têm se apresentado com valores relativamente constantes durante determinados períodos ao longo do tempo e também não têm apresentado maiores variações nas leituras feitas de manhã e à tarde, demonstrando não sofrerem influência da maré, nas condições naturais quando efetuadas as sondagens. Na SM-204, o piezômetro instalado na camada de areia Ar3 apresentou nível d'água em cota abaixo daquele instalado na camada de areia Ar2, ainda que as diferenças sejam da ordem de 0,25 a 0,62 m. Na SM-207, o piezômetro instalado em solo de alteração apresentou nível d'água muito próximo àquele da camada de areia Ar2, situando-se abaixo deste no máximo 0,2 m. O piezômetro instalado na camada de argila AT e de areia Ar3 é o que mostrou nível d'água em cota mais alta, com diferenças entre 0,38 a 1,16 m acima daquele instalado em solo de alteração.

Essas diferenças de cargas hidráulicas nas camadas de areia de diferentes níveis, ainda que de pequena magnitude, podem estar refletindo o confinamento dessas camadas conferido pelos sedimentos argilosos. As diferenças relativamente de pequena magnitude, nas condições

naturais quando efetuadas as sondagens, possivelmente são atribuídas à condição de área plana e distribuição das camadas sub-horizontais em um domínio de topografia suave.

Os resultados dos ensaios CPTUs mostraram comportamentos compatíveis com aquele esperado a partir da classificação das amostras de sondagens, como apresentado abaixo:

- Os contatos entre as diferentes unidades obtidos através da classificação tátil-visual das amostras das sondagens a percussão e mistas indicados nas seções geológico geotécnicas estão localizados bastante próximos dos contatos indicados pelos CPTUs. Quando observadas diferenças, essas são muitas vezes atribuídas à transição entre uma camada e outra. Como exemplo citam-se porções e/ou níveis arenosos na base da camada de argila SFL observados na classificação das amostras e onde os CPTUs indicam “picos” de resistência de ponta (qt) maiores que na SFL sobrejacente e menor que da areia subjacente. Algumas diferenças são devidas à localização distinta das sondagens.
- Observa-se que as argilas SFL apresentam os menores valores de resistência de ponta (qt), sem grandes variações, apenas crescentes com a profundidade. As variações de pequena grandeza são observadas principalmente na base da camada onde ocorrem porções e/ou níveis arenosos descontínuos.
- As areias apresentam maiores valores de resistência de ponta e também valores bastante variáveis, o que possivelmente deve-se às porções e níveis argilosos intercalados às areias. Para a camada Ar1 foram observados valores máximos da ordem de 6000 a 10000 kPa e para a camada Ar2, valores entre 2000 e 7000 kPa.
- As argilas AT apresentam resistência de ponta (qt) e poro pressão maiores que as argilas SFL.

A partir dos CPTUs, abaixo do aterro, foram identificadas areias com resistência de ponta (qt) entre 1000 e 7000 kPa e atingindo valores da ordem de 10000 kPa, com comportamento tipicamente drenado. Na base as resistências de ponta (qt) são menores e a poro pressão mais elevada. Correspondem às camadas Ar1a e Ar1b identificadas nas sondagens. Algumas vezes a subcamada da base está ausente e, quando ocorre, representa as alterações das condições de deposição das argilas SFL correspondente a ambientes costeiros flúvio-lagunares para aquelas condições de deposição das areias de praia e/ou dunas.

A segunda camada identificada nos CPTUs corresponde às argilas SFL. Ocorre uma camada de argila homogênea com resistência de ponta (qt) da ordem de 500 a 1000 kPa e poro pressão entre 300 e 600 kPa, crescentes com a profundidade. Na base dessa camada ocorre argila com níveis e/ou lentes de areia, provavelmente representando um contato transicional entre a camada arenosa Ar2 e a camada argilosa SFL durante a fase Transgressiva Santos.

A resistência de ponta é da ordem de 1000 kPa, similar àquela da argila homogênea, mas são observados acréscimos nesses valores até 2000 kPa, associados à abrupta redução da poro pressão, o que indica a presença de areia. A poro pressão apresenta variações entre 200 e 700 kPa, sem indicações de acréscimos ou decréscimos com a profundidade. A camada subjacente corresponde a areias Ar2, com resistência de ponta (qt) da ordem de 2000 a 4000 kPa, atingindo até 6000 a 7000 kPa e comportamento variável quanto à poro pressão. De maneira geral as resistências de ponta são similares ao longo da camada, mas em muitos casos fica claro o seu acréscimo com a profundidade associado a decréscimo da poro pressão.

Nos CPTUs SP-104, SP-107, SP-159, SM-207 e 105, as areias mostram-se permeáveis com valores de poro pressão entre 200 e 300 kPa. Em outros CPTUs há acréscimos abruptos até 500 a 700 kPa no topo (CPTUs-101, 102, 104, 107, 108, 119, 124, SP-112, SP-115, SP-120, SP-122

e SP-125); e em outros esses acréscimos ocorrem ao longo de toda a camada (CPTUs-106, 121 e 123). Nos CPTUs-102, SP-115 e SP-159 foram detectadas, abaixo das areias, argila arenosa e areia argilosa com poro pressão entre 700 e 800 kPa e resistência de ponta por volta de 1500 kPa e 2000 a 3000 kPa, respectivamente.

Abaixo das areias foi identificada a camada de argila siltosa correspondente às argilas transicionais (AT), cujo contato ocorre de forma abrupta, indicando contato por erosão. As resistências de ponta (qt) estão entre 2000 e 3000 kPa e as poro pressões, entre 900 e 1500 kPa, caracterizando comportamento não drenado. Intercaladas a essas argilas ocorrem areias, como indicado pelas diminuições abruptas das poro pressões e acréscimos também abruptos das resistências de ponta, com valores da ordem de até 15000 a 20000 kPa.

Alguns CPTUs atingiram a camada de Ar3 que apresenta valores de resistência de ponta (qt), ultrapassando os 20.000kPa e poro pressão com valores bastante baixos. Os CPTU-119 e 108 (provavelmente) ensaiaram a camada de solo de alteração, indicando resistência de ponta por volta de 2000 kPa e poro pressão entre 500 e 1100 kPa.

- **Canal:**

Para o canal dispõe-se dos resultados dos levantamentos sísmicos, de sondagens e ensaios efetuados nos lados Guarujá e Santos e na porção central do canal. A partir dos levantamentos batimétricos foi gerado um mapa de contorno batimétrico do local.

O mosaico construído indicou: (i) afloramentos rochosos na superfície de fundo, indicados por textura rugosa, na porção noroeste da área, correspondente à Pedra do Teffé; (ii) com exceção da área de afloramento rochoso, o restante apresenta fundo bastante homogêneo, característico de áreas com sedimentos; (iii) presença de sulcos indicativos da ação de processos de dragagem, ativos quando do levantamento; (iv) ausência de obstáculos de grande porte na superfície de fundo do canal.

Os dados da perfilagem sísmica contínua dividem a área investigada em dois setores com propriedades distintas, a metade do lado Santos e a metade do lado Guarujá. No lado Santos, o embasamento rochoso aflorante na superfície a montante da área, como mostrado pelo sonar de varredura lateral, foi acompanhado pelos perfis sísmicos que mostraram o mergulho para jusante desse embasamento e seu posicionamento entre cotas – 46 e -52 m na região do túnel. No lado Guarujá, os dados não permitiram a determinação do embasamento acústico. Apenas em alguns trechos restritos foi possível detectar refletores sísmicos, que quando correlacionados aos dados de sondagens próximas (não sobre os perfis sísmicos) parecem representar o embasamento acústico, ou de rocha alterada mole. A pequena espessura da coluna de água no lado Guarujá e a provável presença de gás podem ser fatores que impediram a propagação do sinal acústico nas camadas presentes abaixo da superfície de fundo do canal.

A partir da interpretação dos perfis sísmicos foi elaborado o mapa de contorno do embasamento acústico, onde são mostrados também os trechos dos perfis sísmicos onde o embasamento acústico foi detectado. Sobre esse mapa foi implantado o traçado do túnel e as sondagens disponíveis, como mostrado na Figura 8. A partir dessa figura, observam-se poucos perfis sísmicos que mostraram resultados para serem comparados com as sondagens, entretanto parece que o embasamento acústico encontra-se, de maneira geral, abaixo da superfície de rocha alterada mole (RAM) obtido nas sondagens. As camadas sedimentares sobrepostas ao embasamento acústico foram indicadas por três refletores que mostraram ocorrência de forma irregular.

A perfilagem sísmica efetuada em parte dessa região apresentou resolução em algumas poucas seções e, portanto, os dados disponíveis são aqueles das investigações diretas.

As unidades geológico-geotécnicas são as mesmas observadas na porção emersa, exceto quanto ao aterro e a camada arenosa Ar1 que não se apresentam na porção do canal e pela presença da subunidade SFLa no lado Guarujá do canal. A argila SFLa é similar a argila orgânica SFL, mas pouco arenosa, com aspecto flocculado, que possivelmente corresponde a uma fase mais recente de deposição. Observa-se também no ensaio SPT com equipamento mecânico a ocorrência sistemática de zero golpes para a penetração de comprimento sempre maior que os 45 cm padronizados do amostrador na argila SFL, enquanto na porção emersa, ensaios com equipamento similar apresentaram ora valores de zero a um golpe e ora valores da ordem de dois golpes. As dragagens feitas no canal e respectivos alívios poderiam eventualmente estar relacionados a essa diferença de comportamento. Outra possível explicação seria a presença na região do canal de sedimentos mais recentes e menos consistentes do que aqueles da porção emersa.

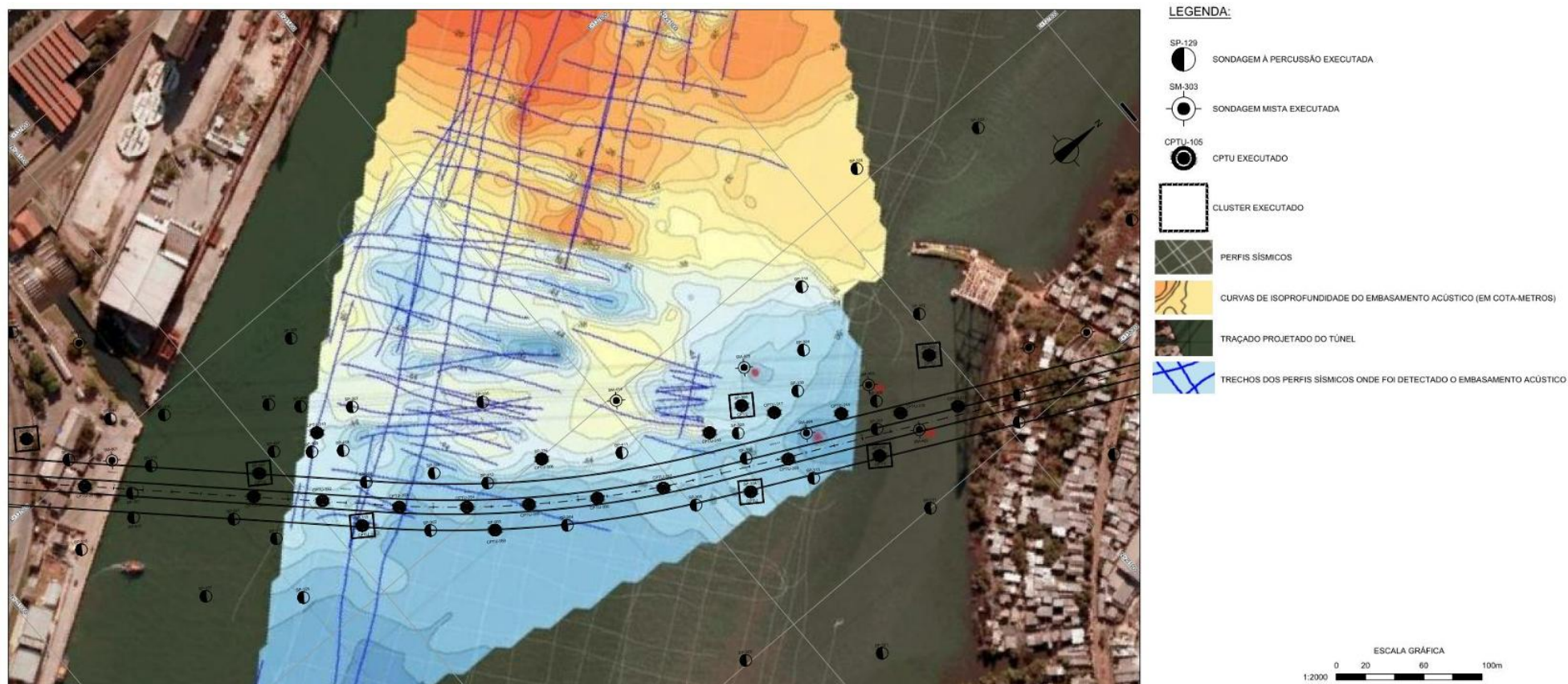


Figura 8 – Mapa de contorno do embasamento acústico

A camada de argila SFL encontra-se até as cotas – 22 m no lado Guarujá, (nos módulos 4, 5 e 6), diminui a sua espessura na porção central do canal (módulos 2 e 3), com desenvolvimento entre as cotas de – 15 a – 22 m, e apresenta desenvolvimento da base por volta da cota -18 m no lado Santos (módulo 1). Ocorre uma subdivisão da argila SFL no lado Guarujá do canal, SFLa, correspondente a uma argila orgânica pouco arenosa. Na região próxima à margem Santos (módulo 1) encontra-se a SFLb, sobre a qual o túnel estará assentado. Abaixo da camada SFL ocorre a camada de sedimentos arenosos (Ar2 – Ar2a, 2b e 2c). Esta camada encontra-se, geralmente, entre as cotas de – 20 a – 30 m ao longo de todo o canal e em alguns locais, como no módulo 3, estende-se até abaixo da base do túnel.

A espessura das argilas AT na região do canal apresenta valores, mais frequentemente, entre 2 a 5 m e entre 8 a 11 m. Apresenta desenvolvimento geral entre as cotas -27 a -43 m, sendo que na porção do lado Guarujá (módulos 4 e 5), entre cotas -27 a -40 m, na porção central do canal mais frequentemente entre cotas -27 a -33 m e no lado Santos, entre -30 a -43. Em alguns locais a argila AT está ausente, o que pode ser explicado pelos processos erosivos anteriores à deposição dos sedimentos mais recentes. Os valores de SPT das argilas AT apresentam-se variáveis, com valores da ordem de 4 a 12 golpes, 12 a 28 em algumas sondagens e 36 a 46 golpes em outras, o que deve estar refletindo as diferentes composições: argilas siltosas, argilas siltosas e arenosas, argilas com lentes e/ou camadas de areias às vezes com níveis de areia grossa e pedregulhos, argilas com restos vegetais carbonizados e turfa.

O túnel está assentado em grande parte de sua extensão sobre as argilas AT e em algumas regiões sobre as areias Ar3 associadas a essas argilas ou que ocorrem na base dessa camada. O contato entre o solo de alteração e os sedimentos situa-se aproximadamente entre as cotas -32 e -40 m. Assim, em alguns trechos a fundação do túnel está nesse contato ou nas suas proximidades, havendo, portanto, possibilidades de que o túnel esteja apoiado em solo de alteração em alguns trechos, enquanto em outros trechos adjacentes pode estar apoiado em sedimentos como sobre as argilas AT ou sobre argilas SFLb, ou seja, sobre materiais de comportamentos distintos quanto à deformabilidade. Quanto às características do solo de alteração, observa-se que muitas vezes apresenta-se compacto a muito compacto já a partir do contato com os sedimentos.

A condição de alta compacidade desses solos de alteração, quando comparada com a de baixa consistência das argilas, reforça a possibilidade de contrastes entre as características de deformabilidade da fundação do túnel. Ressaltam-se também as dificuldades de escavação por dragagem convencional no caso de solos de alteração compactos a muito compactos.

Os resultados dos ensaios CPTU efetuados no canal permitiram identificar as camadas de sedimentos e o solo de alteração no CPTU-306 e CPTU-SP-334. A primeira camada identificada nos CPTUs corresponde às argilas SFL ensaiadas apenas no lado Guarujá do canal.

A unidade de topo, denominada SFLa, foi atravessada apenas pelos CPTUs 314 e 317. Apresenta resistência de ponta (qt) entre 100 e 300 kPa e poro pressão da ordem de 100 kPa. No CPTU-314 ocorre uma lente de areia na base da camada com resistência de ponta (qt) entre 1000 e 4000 kPa. O restante da camada é uma argila homogênea com resistência de ponta (qt) da ordem de 1000 kPa e poro pressão entre 300 e 600 kPa, sem grandes variações com a profundidade. A camada subjacente corresponde às areias Ar2, com resistência de ponta (qt) da ordem de 1500 a 15000 kPa.

Nas proximidades do Cais de Outeirinhos as areias de maior resistência de ponta (qt) estão nas proximidades do topo da camada, enquanto na metade do canal, as areias de maior resistência de ponta estão na base da camada. No lado Guarujá do canal essas areias estão no topo e na

base do pacote arenoso, muitas vezes abaixo das areias argilosas que ocorrem intercaladas ao pacote arenoso ou na sua base.

A poro pressão mostra-se entre 200 e 300 kPa, a partir do Cais de Outeirinhos e até a metade do canal. A partir da metade do canal em direção ao Guarujá, as poro pressões são da ordem de 200 a 300 kPa, com trechos localizados ou trechos maiores em profundidade nas quais os valores chegam até 1000 kPa, acompanhando algumas vezes a redução de resistência de ponta das areias em profundidade (CPTUs-SP-302, SP-305, 314 e 358).

O comportamento observado nas camadas arenosas caracteriza várias sequências de sedimentação nesse pacote arenoso. Em alguns CPTUs, intercalada à camada Ar2 (CPTUs - 315, 316, 356, 357, 359 e CPTU-SP-333) ou sobre a camada de argila AT (CPTU-313) foi identificada areia argilosa, argila arenosa e/ou argila com lentes e porções arenosas, cujas resistências de ponta (qt) situam-se entre 1500 e 3500 kPa e poro pressões, entre 200 e 1000 kPa. Subjacente às areias Ar2 foi identificada a camada de argila correspondente às denominadas argilas transicionais (AT), cujo contato ocorre de forma abrupta, indicando contato erosivo. As resistências de ponta (qt) estão entre 2000 e 3000 kPa, com valores maiores nas intercalações arenosas (3000 – 8000 kPa), e a poro pressão, entre 900 a 1500 kPa, sendo reduzidas para 300 a 600 kPa nas intercalações arenosas. Em vários CPTUs as ATs apresentam lentes arenosas como no CPTU-306, 310, CPTU-SP-315, CPTU-354 e 355. Nos CPTU-310 e CPTU-SP-315 as argilas apresentaram-se em duas sequências, uma de topo argilosa e outra na base argilosa com intercalações arenosas. Intercalações arenosas ao longo de todo o pacote foram observadas nos CPTUs-306, 354 e 355 e mostraram-se espessas como no CPTU-306, 310 e CPTU-SP-315.

Alguns CPTUs atingiram a camada da base do pacote sedimentar (Ar3) com resistência de ponta (qt) variável entre 2000 e 15000 kPa e poro pressão da ordem de 100 a 400 kPa e outras vezes, entre 300 e 800 kPa. O CPTU-306 e o CPTU-SP-334 ensaiaram a camada de solo de alteração indicando resistência de ponta (qt) por volta de 3000 a 10000 kPa e poro pressão entre 200 e 1200 kPa.

- **Lado Santos:**

A seguir, destacam-se as principais diferenças entre as unidades presentes no lado Santos e lado Guarujá:

- A camada Ar1a normalmente apresenta espessura maior que no lado Guarujá e trata-se de areia limpa, abaixo dela encontra-se, em alguns locais, a Ar1b que ocorre de forma mais localizada e com maior frequência que no lado Guarujá.
- A camada de argila SFL está localizada abaixo da Ar1 e possui grande espessura, com desenvolvimento entre cotas -8,0 a -30,0 m; especialmente no início do traçado.
- A camada de argila SFL apresenta argilas com lentes e/ou porções arenosas, de maneira geral, muito localmente no topo, na base ou mesmo no interior da camada e não de forma generalizada na base do pacote como no Guarujá.
- A camada Ar2 apresenta intercalação de camada de argila SFL com continuidade relativamente elevada e espessura de alguns metros, enquanto a camada Ar3 ocorre apenas localmente.
- Foi identificada localmente na base da camada Ar2, a unidade Ar2d, caracterizada por areia média a grossa com pedregulhos, às vezes lavada (sem finos) e outras com porções argilosas.
- Entre as estacas 71 a 75 está localizada a argila SFLb que se encontra em uma profundidade maior do que a SFL, próximo da cota de -30,0 a -40,0 m.

- o Em continuidade à ocorrência de SFLb e até por volta da estaca 65, ocorre argila com lentes e/ou porções arenosas assentada sobre a argila AT.
- o A camada de argila AT apresenta-se descontínua, principalmente no início do traçado da seção de montante e entre as estacas 51 e 61. Quando presente desenvolve-se por volta da cota -30,0 e -40,0 m.
- o O pacote de sedimentos encontra-se sobre solo de alteração de rochas cristalinas ou diretamente sobre rocha alterada mole (RAM) e rocha alterada dura (RAD)/rocha sã (RS).

O contato entre o solo de alteração e/ou maciço rochoso e os sedimentos situa-se aproximadamente entre as cotas -30 e -49 m. Na seção de montante, até a estaca 45, esse contato é muitas vezes contato de sedimentos com rocha alterada mole (RAM) e situa-se por volta das cotas -30 e -33 m. No restante, esse contato está entre cotas -33 e 49 m. Em alguns casos, como na SM-652, o contato é com rocha sã (RS) e em outros, mais frequentemente, com rocha alterada mole (RAM).

A espessura do solo de alteração é variável, com valores entre zero e 30 m, registrando-se, algumas ocorrências onde o solo de alteração está ausente, como no início do traçado e nos trechos próximos às estacas 60 e 65.

Quanto às características do solo de alteração, observa-se que muitas vezes se apresenta compacto a muito compacto já a partir do contato com os sedimentos. A condição de pequenas espessuras de solo de alteração e alta compactidade desses solos de alteração são aspectos que podem dificultar a escavação das paredes diafragmas e o engaste dessas paredes abaixo do contato com os sedimentos, em solo de alteração ou rocha alterada mole, podendo ser necessário o emprego de equipamentos para escavação em rocha e não apenas clam shell.

As irregularidades nos topos de rocha são notórias no lado Santos em comparação ao lado Guarujá. No lado Santos o alinhamento das obras é subperpendicular à foliação e a outras estruturas do maciço rochoso e no lado Guarujá o alinhamento das obras é subparalelo a estas estruturas, o que pode explicar em parte as irregularidades no lado Santos e as diferenças de comportamento entre os dois locais. Ensaio de infiltração mostraram valores entre $1,09 \times 10^{-4}$ a $4,67 \times 10^{-4}$ cm/s para as camadas arenosas, predominantemente Ar2. Ensaio de infiltração no solo de alteração apresentaram valores entre $4,97 \times 10^{-5}$ a $5,75 \times 10^{-4}$ cm/s. Ensaio de perda d'água em rocha mostraram perdas d'água específica entre zero e $2,33$ l/min/m.kg/cm². Os valores relativamente baixos estão associados a maciços rochosos geralmente muito pouco a pouco fraturados.

Os níveis d'água medidos nas sondagens estão por volta da cota zero a +1,5 m e em alguns casos em cota mais baixa, nesse caso, possivelmente refletindo condição de leitura diferente da condição de primeiro NA obtido durante a execução da sondagem. Os níveis d'água medidos nos piezômetros instalados apresentaram-se com valores constantes ao longo do tempo e também sem variações maiores que 5 a 6 cm nas leituras feitas a tarde em relação àquelas feitas de manhã, sem maior influência da maré. Níveis em cotas mais elevadas foram observados logo após a instalação, quando ainda não havia sido feita limpeza. Observa-se que os piezômetros instalados em solo de alteração são aqueles que mostraram cotas mais elevadas para os níveis d'água, comparativamente àquelas instalados no mesmo local nas camadas de areia Ar3 e Ar2, com diferenças entre 0,15 a 0,26 m no caso da SM-653; 0,41 a 0,50 m no caso da SM-604 e 0,76 a 0,83 m no caso da SM-602, indicando possibilidade de fluxo. Os resultados dos ensaios CPTUs efetuados na frente Santos permitiram identificar e caracterizar as camadas de sedimentos e também de solo de alteração em alguns CPTUs. Os resultados dos ensaios

mostraram comportamentos compatíveis com aquele esperado a partir da classificação das amostras de sondagens.

A primeira camada corresponde as areias (Ar1a) com resistência de ponta (qt), de maneira geral entre 5.000 a 20.000 kPa e comportamento tipicamente drenado, sem geração de poro pressão. Na base dessa camada algumas vezes ocorrem as areias Ar1b com resistência de ponta (qt) decrescente em direção ao topo da camada de argila SFL.

A segunda camada é constituída por argilas SFL e em grande parte da região investigada apresenta-se dividida em duas subcamadas, com intercalação de areias Ar2. A primeira subcamada trata-se de uma argila homogênea com resistência de ponta (qt) praticamente constante de 1000 kPa, em alguns poucos CPTUs da ordem de 500 kPa e com poro pressão entre 400 e 600 Kpa. Quando a camada é espessa e sem intercalação de areia, no início do traçado, a resistência de ponta atinge 2000 kPa na base da camada e a poro pressão apresenta-se entre 500 a 1100 kPa.

A segunda subcamada é constituída por argila, às vezes com níveis e/ou lentes arenosas identificadas pelo acréscimo de resistência de ponta (qt) e diminuição de poro pressão. A resistência de ponta (qt) da argila está entre 1000 e 2000 kPa e a poro pressão entre 600 e 800 kPa. Abaixo e intercaladas com a camada de argila SFL são identificadas as areias Ar2. São caracterizadas por resistência de ponta (qt) entre 2000 e até 20000 kPa, muitas vezes com decréscimo em direção à base das sequências, como nos CPTUs entre o canal e a Rua Almirante Tamandaré e em outros localizados na direção do início do traçado. As poro pressões situam-se por volta de 200 a 250 kPa nos CPTUs entre o canal e a Rua Almirante Tamandaré e entre 100 a 800 kPa nos demais CPTUs localizados na direção do início do traçado.

Nos CPTUs entre o canal e a Rua Almirante Tamandaré há indicações de duas ou três sequências de deposição das areias, indicadas pelas resistências de ponta e poro pressões como o “pico” de poro pressão de valor mais elevado por volta de 25 m de profundidade. Para a Ar2 intercalada a SFL, os CPTUs-252, 253, 255 e 256 localizados na direção do início do traçado, também há indicações de duas sequências de deposição das areias, pela presença de areias de maior resistência de ponta (qt) e menor poro pressão no topo e por condições inversas na base. No CPTU-259, as condições indicadas anteriormente para o topo estão na base e aquelas da base, no topo.

Para a Ar2 abaixo da SFL, nos CPTUs SM-653, SM-658 e 253 também há aumentos das resistências de ponta (qt) para a base da camada, caracterizando duas sequências arenosas, sem grandes variações de poro pressão. No CPTU-257 notam-se acréscimos das resistências de ponta (qt) para o topo e para a base, caracterizando três sequências arenosas com variações de poro pressão de pequena grandeza. A partir das características das areias Ar2, quanto às condições de deposição, em Santos parecem predominar as areias de praia, enquanto no Guarujá parecem predominar as areias e as areias argilosas de planícies de maré. Em alguns CPTUs, na região entre o canal e a Rua Almirante Tamandaré (CPTU 202, 206, 207, 251, 586 e CPTU-SP-502) foi identificada argila com porções arenosas (porções arenosas com resistência de ponta de até 20000 kPa e comportamento drenado) diretamente sobre a camada de AT ou sobre lentes arenosas que recobrem a AT. Essa camada representa a continuidade do SFLb identificada no CPTU-201 localizado junto à margem direita do canal. As resistências de ponta (qt) são da ordem de 1500 a 2000 kPa, e a poro pressão, da ordem de 1000 a 1100 kPa, com alguns “picos” de valor menor no caso do SFLb.

No caso das argilas identificadas como argilas com lentes e/ou porções arenosas, as resistências de ponta (qt) situam-se entre 1500 e 2500 kPa, com “picos” de valor maior e poro pressão similar

à SFLb. As argilas transicionais AT detectadas em trechos descontínuos, em contato erosivo com as camadas subjacentes mostraram resistência de ponta (q_t) entre 2000 e 3000 kPa e valores maiores nas intercalações arenosas, e a poro pressão, entre 1200 até >1500 kPa, com valores menores nas intercalações arenosas. O CPTU-206 e possivelmente o CPTU-251 atingiram o solo de alteração (SA) com resistência de ponta (q_t) entre 2500 e 3000 kPa e poro pressão entre 500 e 1300 kPa.

5.2. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Conforme apresentado, a definição dos parâmetros geotécnicos de projeto teve por base os resultados obtidos dos ensaios de CPTu, empregando-se correlações consagradas na literatura técnica, com seus coeficientes calibrados por meio de ensaios de campo e laboratório. Salienta-se que os resultados em bruto dos ensaios estão apresentados nos documentos de números RT-42.02.000-G13/001 a 004, RT-42.03.000 G13/001 e 002 e RT-42.04.000-G13/001 a 004.

Com relação à anisotropia das argilas, Barros et al. (2014) constataram que as argilas marinhas brasileiras apresentam anisotropia de resistência muito pouco significativa. Além disso, a metodologia do emprego dos parâmetros geotécnicos mínimos, com intervalo de confiança de 97,7% conduz a condições a favor da segurança.

Com base na interpretação dos resultados dos ensaios geotécnicos, em especial os de CPTu, observou-se comportamento semelhante entre os resultados obtidos na região. Desta forma, foi possível agrupar os solos em três grupos: Lado Santos, Canal e Lado Guarujá.

Salienta-se que, para o Lado Guarujá, observou-se alternância entre camadas de areia e argila para profundidades entre 33 e 37 metros. Para o Canal, observou-se alternância entre camadas de areia e argila, nas profundidades entre 30 e 35 metros, para a margem Guarujá e Santos, respectivamente. Para o Lado Santos, observou-se existência de uma camada mais espessa de argila nos perfis 656 e 662/664.

Por meio da interpretação dos perfis de CPTu, em conjunto com a avaliação geológico-geotécnica das demais sondagens e ensaios realizados para as diferentes regiões do Empreendimento (Doca Seca/Lado Guarujá, Canal e Lado Santos), buscou-se agrupar os solos com características e comportamentos semelhantes, seguindo as unidades geológico-geotécnicas apresentadas abaixo:

- At – aterro;
- SFL – sedimentos flúvio-lagunares;
- AT – argilas transicionais;
- Ar – sedimentos arenosos: Ar1 – areia superficial; Ar2 – areia intermediária; Ar3 – areia inferior;
- SA – solo de alteração;
- RAM – rocha alterada mole;
- RS – rocha alterada dura e sã.

Desta forma, tomando-se como referência os ensaios de CPTu, foi possível discretizar e caracterizar os perfis geológico-geotécnicos de cada região do projeto. Para demais informações sobre as investigações e unidades geológico-geotécnicas, ver relatório de número RT-42.00.000-G01-002. A Tabela 1 resume os valores médios dos pesos específicos naturais obtidos a partir dos ensaios de laboratório, para cada unidade geológico-geotécnica. Para maiores informações ver os documentos de números RT-42.02.000-G13/001 a 004, RT-42.03.000 G13/001 e 002 e RT-42.04.000-G13/001 a 004.

Tabela 1 - Peso específico médio dos solos das unidades geológico-geotécnicas.

Solos	Ar1	SFL	Ar2	AT	Ar3	SA
γ_n (kN/m ³)	18	15	16	16	18	18

A definição dos parâmetros geotécnicos dos solos teve por base os resultados obtidos nos ensaios de CPTu, empregando-se os critérios e correlações conforme apresentado nos itens a seguir. Os resultados dos ensaios de laboratório foram empregados para validar os valores obtidos por meio das correlações apresentadas. Salienta-se que a distinção entre os materiais de comportamento não drenado e drenado foi realizado por meio da interpretação dos perfis CPTu, sendo as argilas SFL e AT classificadas como não drenados, as areias (Ar1, Ar2 e Ar3) e solo de alteração (SA) como drenados.

Materiais com comportamento não drenado

- Interpretação dos perfis de CPTu:**

Os perfis dos ensaios de CPTu foram analisados e interpretados com base na metodologia proposta por Massad (2010), que constatou entre as Argilas da Baixada Santista uma relação praticamente linear entre a resistência de ponta corrigida (q_t) do CPTu e a profundidade (z), isto é:

$$q_t = a + b \cdot z$$

onde, a e b são constantes dos coeficientes linear e angular da relação linear entre a resistência de ponta do CPTu e a profundidade, respectivamente.

Para o coeficiente a , foi adotada a premissa de se empregar o valor médio e intervalo de confiança de 97,72%. Desta forma, a Tabela 2 apresenta os valores dos coeficientes a e b empregados na definição dos parâmetros geotécnicos das argilas SFL e AT, para os diferentes universos de parâmetros geotécnicos do projeto. Adicionalmente, verifica-se que esses parâmetros são coerentes aos apresentados na literatura técnica.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes “a” e “b” empregados na definição dos parâmetros geotécnicos.

Coeficiente linear (a)	Universo dos Parâmetros Geotécnicos					
	Lado Guarujá		Canal		Lado Santos	
	SFL	AT	SFL	AT	SFL	AT
Médio	403	760	416	1360	490	1284
Mínimo	272	520	261	1029	287	768

Coeficiente angular (b)	Universo dos Parâmetros Geotécnicos					
	Lado Guarujá		Canal		Lado Santos	
	SFL	AT	SFL	AT	SFL	AT
constante	32	32	32	32	31	31

- Coeficiente ($N_{\sigma t}$) da pressão de pré-adensamento:**

Para a estimativa da pressão de pré-adensamento (σ'_p) foi empregada a correlação empírica proposta por Kulhawy e Mayne (1990), com o coeficiente ($N_{\sigma t}$) determinado segundo a metodologia proposta por Massad (2010).

$$\sigma'_p = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{\sigma t}}$$

onde, q_t é a resistência de ponta corrigida do cone; σ_{v0} a pressão vertical total e $N_{\sigma t}$ um fator empírico da correlação.

Conforme apresentado anteriormente, Massad (2010) constatou entre as Argilas da Baixada Santista uma relação praticamente linear entre a resistência de ponta corrigida (q_t) do CPTu e a profundidade (z). Desta forma, o coeficiente ($N_{\sigma t}$) foi determinado conforme:

$$q_t = a + b \cdot z$$

Levando a seguinte relação:

$$N_{\sigma t} = \frac{(b - \gamma)}{\gamma'}$$

onde, b é o coeficiente angular da relação linear entre a resistência de ponta do CPTu e a profundidade, γ e γ' os pesos específicos natural e efetivo (ou submerso), respectivamente. A calibração desse coeficiente levou aos seguintes valores para cada universo de parâmetros. Salienta-se que esses valores são coerentes aos apresentados na literatura técnica.

Tabela 3 – Calibração do coeficiente $N_{\sigma t}$.

Coeficiente	Universo dos Parâmetros Geotécnicos					
	Lado Guarujá		Canal		Lado Santos	
	SFL	AT	SFL	AT	SFL	AT
$N_{\sigma t}$	3,4	3,3	3,4	2,7	3,2	3,2

- Coeficiente (N_{kt}) da resistência não drenada:**

Para a resistência não drenada (S_u), foi empregada a seguinte correlação empírica:

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

onde, q_t é a resistência de ponta corrigida do cone; σ_{v0} a pressão vertical total e N_{kt} um fator empírico da correlação.

O coeficiente da correlação (N_{kt}) foi determinado seguindo a mesma metodologia do $N_{\sigma t}$ (Massad, 2010), na qual se leva em conta uma relação linear entre a resistência não drenada (S_u) do *Vane Test* e a profundidade (z), ou seja:

$$S_u = c_0 + c_1 \cdot z$$

Resultando na seguinte relação:

$$N_{kt} = \frac{(b - \gamma)}{c_1}$$

onde, b é o coeficiente angular da relação linear entre a resistência de ponta do CPTu e a profundidade, γ o peso específico natural e c_1 o coeficiente angular da relação linear entre a resistência não drenada do *vane test* e a profundidade.

A calibração desse coeficiente levou aos seguintes valores para cada universo de parâmetros. Salienta-se também, que os valores apresentados são semelhantes aos da literatura técnica.

Tabela 4 – Calibração do coeficiente N_{kt} .

Coeficiente	Universo dos Parâmetros Geotécnicos					
	Lado Guarujá		Canal		Lado Santos	
	SFL	AT	SFL	AT	SFL	AT
N_{kt}	10,9	11,0	10,6	10	10,7	10,7

• **Coeficientes α e β dos módulos edométrico e de descarregamento/recarregamento:**

Para os módulos edométrico (E_L) e de descarregamento/recarregamento (E_{ur}) foram empregadas as correlações empíricas propostas por Lunne et al. (1997), respectivamente.

$$\frac{E_L}{\sigma'_{v0}} = \alpha \cdot \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$$

$$\frac{E_{ur}}{\sigma'_{v0}} = \beta \cdot \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$$

onde, q_t é a resistência de ponta corrigida do cone; σ_{v0} a pressão vertical total; σ'_{v0} a pressão vertical efetiva; e_1 e e_3 são fatores empíricos das correlações.

Os coeficientes α e β das correlações foram calibrados a partir dos resultados de ensaios edométricos realizados em amostras indeformadas (amostrador Shelby) de argilas SFL e AT.

Inicialmente foram determinados os valores de E_L/σ'_{v0} acima e abaixo dos efeitos do pré-adensamento ($OCR = 1$ e > 1 , respectivamente) por meio da seguinte equação:

$$\frac{E_L}{\sigma'_{v0}} = \frac{\ln\left(\frac{\sigma'_{v3}}{\sigma'_{v1}}\right) \cdot (1 + e_0)}{e_1 - e_3}$$

onde, σ'_{v1} e σ'_{v3} são, respectivamente, as pressões verticais efetivas no final do estágio anterior e posterior ao estágio considerado; da mesma forma, e_1 e e_3 são, respectivamente, os índices de vazios no final dos estágios anterior e posterior ao estágio considerado.

A partir dos dados obtidos são determinados os coeficientes α e β para E_L/σ'_{v0} , acima dos efeitos do pré-adensamento ($OCR = 1$) e E_{ur}/σ'_p , abaixo dos efeitos do pré-adensamento ($OCR > 1$), com base nas seguintes equações, respectivamente:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{E_L}{\sigma'_{v0}}\right)_{LAB}}{N_{\sigma t}}$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{E_{ur}}{\sigma'_p}\right)_{LAB}}{N_{\sigma t}}$$

onde, $(E_L/\sigma'_{v0})_{LAB}$ é a média dos valores obtidos pela relação, acima dos efeitos do pré-adensamento ($OCR = 1$) e, $(E_{ur}/\sigma'_p)_{LAB}$ refere-se ao coeficiente angular da relação linear entre E_L/σ'_{v0} e OCR abaixo dos efeitos do pré-adensamento ($OCR > 1$). Por fim, $N_{\sigma t}$, corresponde ao coeficiente determinado com base na metodologia proposta por Massad (2010), apresentado na Tabela 3.

Desta forma, as calibrações desses coeficientes levaram aos seguintes valores para cada universo de parâmetros geotécnicos.

Tabela 1 – Calibração dos coeficientes α e β .

Coeficiente	Universo dos Parâmetros Geotécnicos					
	Lado Guarujá		Canal		Lado Santos	
	SFL	AT	SFL	AT	SFL	AT
α	1,41	1,28	0,89	1,57	2,08	2,08
β	6,60	4,61	4,15	6,70	8,11	8,11

Para a calibração dos coeficientes α e β foram empregados apenas os resultados de ensaios edométricos classificados como muito bons a excelentes, segundo a classificação da Tese de LD de Futai (2010) e de Coutinho (2007).

A partir das interpretações dos perfis de CPTu e das calibrações dos coeficientes das correlações, os parâmetros geotécnicos dos solos com comportamento não drenado (argilas SFL e AT) foram definidos seguindo o roteiro apresentado abaixo.

- **Razão de Sobreadensamento (OCR)**

Para a estimativa da razão de sobreadensamento foi empregada a seguinte equação:

$$OCR = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{\sigma t}} \cdot \frac{1}{\sigma'_{v0}}$$

onde, q_t é a resistência de ponta corrigida do cone; σ_{v0} a pressão vertical total; σ'_{v0} a pressão vertical efetiva e $N_{\sigma t}$ o fator empírico calibrado para cada universo de parâmetros (Tabela 3).

- **Pressão de Pré-Adensamento (σ'_p)**

Para o cálculo da pressão de pré-adensamento foi empregada a seguinte relação:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_v$$

onde, OCR é a razão de sobreadensamento e σ'_v a pressão vertical efetiva. Salienta-se que foi adotado o valor de OCR para o meio da camada de estudo.

- **Resistência não Drenada (S_u)**

Para o cálculo da resistência não drenada foi empregada a seguinte relação:

$$S_u = \frac{N_{\sigma t}}{N_{kt}} \cdot OCR \cdot \sigma'_v$$

onde, OCR é a razão de sobreadensamento; σ'_v a pressão vertical efetiva; $N_{\sigma t}$ e N_{kt} são os fatores empíricos calibrados para cada universo de parâmetros. Foi adotado o valor de OCR para o meio da camada de estudo. Salienta-se que, para os valores de S_u foi adotada correção conforme premissas de projeto, que considera os valores de parâmetros geotécnicos mínimos, obtidos por meio de análise estatística dos ensaios de CPTu (inclinação das curvas de q_t) e, que apresenta margem de confiança de aproximadamente 97,7%.

- **Módulo Edométrico (EL)**

Para o cálculo do módulo edométrico foi empregada a seguinte relação:

$$\frac{E_L}{\sigma'_{v0}} = \alpha \cdot OCR \cdot N_{\sigma t}$$

onde, OCR é a razão de sobreadensamento; $N_{\sigma t}$ e α são os fatores empíricos calibrados para cada universo de parâmetros. Salienta-se que foi adotado o valor de OCR para o meio da camada de estudo. Para a definição do módulo secante a 50% da tensão desviadora de ruptura (E_{50}), foi empregada a relação igual a 1,25 de E_L .

- **Módulo de Descarregamento/Recarregamento (Eur)**

Para o cálculo do módulo de descarregamento/recarregamento foi empregada a seguinte relação:

$$\frac{E_{ur}}{\sigma'_{v0}} = \beta \cdot OCR \cdot N_{\sigma t}$$

onde, OCR é a razão de sobreadensamento; $N_{\sigma t}$ e β são os fatores empíricos calibrados para cada universo de parâmetros. Salienta-se que foi adotado o valor de OCR para o meio da camada de estudo.

• Coeficiente de Empuxo no Repouso (K0)

Para o cálculo do coeficiente de empuxo no repouso foram empregadas seguintes relações sugeridas por Massad (2009), para as Argilas SFL e AT, respectivamente:

$$K_0 = 0,57 * OCR^{0,45}$$

$$K_0 = 0,58 * OCR^{0,45}$$

onde, OCR é a razão de sobreadensamento. Salienta-se que foi adotado o valor de OCR para o meio da camada de estudo.

• Relação do índice de recompressão (Cr / 1+e0)

Para a estimativa da relação do índice de recompressão (Cr/1+e0), foi empregada a seguinte equação, ajustada a partir da relação proposta por Lunne et al. (1997).

$$\frac{C_r}{(1 + e_0)} = \frac{2,3}{\left(\frac{E_{ur}}{\sigma'_p}\right)_{LAB} * OCR_{campo}}$$

onde, (E_{ur}/σ'_p)_{LAB} refere-se ao coeficiente angular da relação linear entre E_{ur}/σ'_{vo} e OCR, abaixo dos efeitos do pré-adensamento (OCR > 1); OCR_{campo} é a razão de sobreadensamento para a condição de campo, ou seja, para a tensão vertical efetiva atuante (σ'_v).

Tabela 2 – Valores do (E_{ur}/σ'_p)_{LAB}.

Coeficiente	Universo dos Parâmetros Geotécnicos					
	Lado Guarujá		Canal		Lado Santos	
	SFL	AT	SFL	AT	SFL	AT
médio	21,1	13,3	14,1	17,9	25,9	25,9
mínimo	10,5	10,6	10,8	15,6	16,8	16,8

Materiais com comportamento drenado

Para estimativa dos parâmetros geotécnicos dos solos com comportamento drenado, foram empregadas diversas correlações consagradas na literatura técnica. A seguir, são apresentadas as diretrizes para a definição dos principais parâmetros geotécnicos desse tipo de material.

• Ângulo de atrito efetivo (φ')

O ângulo de atrito efetivo foi estimado de acordo com as correlações propostas por Kulwaty e Mayne (1990) e por Robertson e Campanella (1983), apresentadas abaixo, respectivamente. A estimativa desse parâmetro pelas correlações conduziu a diferenças menores que 10%. Desta forma, foram adotados os menores valores obtidos entre as correlações.

$$\phi' = 17,6 + 11. \log(Q_n)$$

$$\tan \phi' = \frac{1}{2,68} \cdot \left[\log \left(\frac{q_t}{\sigma'_v} \right) + 0,29 \right]$$

onde, Q_n é a resistência de ponta normalizada do CPTu; q_t a resistência de ponta corrigida do CPTu e σ'_v a tensão vertical efetiva. A Tabela 9 resume os valores médios e mínimos do ângulo de atrito das areias para os diferentes universos de parâmetros.

Tabela 3 – Ângulo de atrito das areias.

	Universo dos Parâmetros Geotécnicos
--	-------------------------------------

Ângulo de Atrito	Lado Guarujá			Canal		Lado Santos		
	Ar1	Ar2	Ar3	Ar2	Ar3	Ar1	Ar2	Ar3
médio	32,0	25,0	36,0	33,0	36,0	41,0	32,0	33,0
mínimo	29,0	22,0	33,0	30,0	34,0	39,0	28,0	30,0

Para o Solo de Alteração (SA), como não se dispõe de ensaios CPTu, foi empregada a correlação proposta por Teixeira (1993) para resultados de N_{SPT} , como se segue:

$$\phi' = 15 + \sqrt{20 \cdot N_{SPT}}$$

onde, N_{SPT} é o número de golpes do ensaio à percussão (SPT). Salienta-se que, neste caso foram empregados os valores de N_{SPT} das sondagens à percussão (SPT) executadas nas proximidades da seção em questão.

• Módulo de deformabilidade (E_{50})

O módulo de deformabilidade correspondente a 50% da tensão desviadora de ruptura (E_{50}) foi determinado a partir da correlação apresentada em Schnaid (2012), para o cálculo do módulo de cisalhamento máximo ($G_{máx}$) e pela correlação apresentada em Robertson e Cabal (2012), para determinação do módulo de deformabilidade correspondente a 0,1% de deformação ($E_{0,1\%}$). O módulo E_{50} foi estimado a partir de $G_{máx}$, seguindo as recomendações de Howie e Campanella (2008), para o módulo $E_{0,1\%}$, foi empregada a correlação do modelo constitutivo de Hardening Soil Model (Schanz et al., 1999).

$$G_{máx} = 110 \cdot \sqrt[3]{q_t \cdot \sigma'_v \cdot P_a}$$

$$E_{0,1\%} = 0,015 \cdot (10^{0,55 \cdot I_c}) \cdot (q_t - \sigma'_v)$$

onde, q_t é a resistência de ponta corrigida do CPTu; σ'_v a tensão vertical efetiva; P_a a pressão de referência e I_c o índice de comportamento do solo.

A Tabela 10 apresenta os valores médios e mínimos do módulo de deformabilidade (E_{50}) das areias para os diferentes universos de parâmetros.

Tabela 4 – Módulo de deformabilidade E_{50} das areias.

Ângulo de Atrito	Universo dos Parâmetros Geotécnicos							
	Lado Guarujá			Canal		Lado Santos		
	Ar1	Ar2	Ar3	Ar2	Ar3	Ar1	Ar2	Ar3
médio	12,0	18,0	40,0	18,0	27,0	26,0	24,0	32,0
mínimo	6,0	10,0	32,0	15,0	25,0	20,0	18,0	26,0

Conforme mencionado no item anterior, por não contar com ensaios de CPTu para o Solo de Alteração (SA), foi empregada a correlação proposta por Trofimenkov (1974), ajustado por Teixeira (1993) para resultados de N_{SPT} , como se segue, respectivamente:

$$E = \alpha \cdot q_c$$

$$K = \frac{q_c}{N_{SPT}}$$

onde, q_c é a resistência de ponta do CPTu; α um fator empírico da correlação; K o fator de conversão de q_c para o equivalente número de golpes N_{SPT} do ensaio à percussão (SPT). Foram empregados os valores de N_{SPT} das sondagens à percussão (SPT) executadas nas proximidades da seção em questão.

Para os materiais com comportamento drenado, adotou-se módulo edométrico (E_{oed}) igual ao módulo secante (E_{50}) e módulo de descarregamento/recarregamento (E_{ur}) igual a 3 vezes o módulo secante (E_{50}).

• Compacidade relativa (D_r)

A compacidade ou densidade relativa foi estimada a partir da correlação apresentada por Lancellota (1985), conforme equação a seguir:

$$D_r = -99 + 66 \cdot \log \left(\frac{q_c}{(\sigma'_{v0})^{0,5}} \right)$$

onde, q_c é a resistência de ponta do CPTu e σ'_{v0} a tensão vertical efetiva.

A Tabela 11 apresenta os valores médios e mínimos da compacidade (densidade) relativa das areias obtidos para os diferentes universos de parâmetros.

Tabela 11 – Compacidade relativa das areias.

Ângulo de Atrito	Universo dos Parâmetros Geotécnicos							
	Lado Guarujá			Canal		Lado Santos		
	Ar1	Ar2	Ar3	Ar2	Ar3	Ar1	Ar2	Ar3
médio	70,0	55,0	90,0	65,0	85,0	95,0	75,0	85,0
mínimo	55,0	45,0	80,0	55,0	70,0	80,0	50,0	70,0

6. INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAÇÃO

A instrumentação é particularmente importante em obras de escavações e fundações tanto para aferição das hipóteses, dos cálculos e dos modelos empregados em projeto, como também para constatar variações das características do subsolo e das propriedades do terreno. As principais hipóteses avaliadas para a distribuição das instrumentações são:

- Monitoramento para verificação de hipóteses de projeto;
- Monitoramento para avaliação da interatividade maciço e método construtivo;
- Verificar efeitos de resposta sobre os suportes estruturais;
- Verificar os efeitos de interatividade sistema estrutural e método construtivo sobre edificações e outras áreas de influência da obra.

Cabe ressaltar que a instrumentação também é locada a fim de prevenir e orientar possíveis impactos sobre redes de utilidade pública em sua área de influência na superfície do maciço escavado. De uma maneira geral, para a instrumentação das deformações (das contenções e das bacias de recalque das áreas de entorno do empreendimento), a eventual avaliação das tensões nas estroncas, a integridade das paredes-diafragma e a piezometria, foram previstos os instrumentos citados a seguir.

- **Pinos de recalque na estrutura de contenção e edificações:** são utilizados para medida de deslocamentos horizontais e verticais (nivelamento), instalados no topo das contenções ou nas edificações próximas às obras.
- **Marco de Recalque Superficial:** tem por finalidade monitorar o recalque superficial do maciço afetado pela construção da obra, ou atividade que interfira neste.
- **Inclinômetros:** são instrumentos que permitem monitorar os movimentos horizontais em profundidade, sendo instalados com o intuito de controlar os deslocamentos do maciço de solo afetado pela atividade relacionada com a implantação da obra subterrânea.
- **Tassômetro ou Marco de Recalque Profundo:** medem o deslocamento vertical (recalques) em profundidade, dos maciços de solo ou rocha, em relação a uma Referência de Nível (RN).

- **Piezômetros e Medidores de Nível d'Água (MNA) ou Indicadores de Nível d'Água (INA):** Para o controle do sistema de rebaixamento do nível de água no maciço devem ser adotados: Piezômetros (PZ), que registram a carga piezométrica, ou seja, o valor da poropressão em determinado horizonte geológico (camadas de solo). Medidores de Nível d'Água (MNA) ou Indicadores de Nível d'Água (INA), que registram o nível d'água num tubo perfurado no maciço. O processo tem por finalidade monitorar o comportamento do lençol freático durante a atividade de obra, principalmente durante, o rebaixamento e a recarga do nível d'água.
- **Ensaio Cross-Hole:** para verificar a integridade do concreto da parede diafragma, de uma maneira contínua, através de onda sísmica captada por geofones (transmissor e receptor), baseando-se na velocidade da onda. O ensaio é executado através de tubos longitudinais instalados na armadura da lamela.

7. ALTERAÇÕES NO PROJETO REFERENCIAL

A CONCESSIONÁRIA poderá realizar alterações no projeto referencial, desde que cumpra os requisitos dos ANEXOS 2 e 7.

No caso da alteração no traçado do projeto referencial do Grupo 1, a CONCESSIONÁRIA deverá realizar sondagens no local do novo traçado, de forma a revisar as seções geológicas-geotécnicas tidas como base. Além disso, poderá solicitar a realização de novos ensaios de forma a revisar os parâmetros geotécnicos das regiões afetadas (Lado Guarujá, Canal e Lado Santos).

No caso do Grupo 2, como não são conhecidas as condições geológicas-geotécnicas da região, não há compartilhamento de risco previsto na Cláusula 21.3 do CONTRATO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia). 2013. Manual de Sondagens. Boletim n0. 3, 5ª. edição. São Paulo. BERROCAL, J.; FERNANDES, C.; BASSINI, A.;

BARBOSA, J.R. (1996). Earthquake hazard assessment in Southeastern Brazil. Geofísica Internacional, v.35 (3): 257-272. CPRM. 1999. Projeto de integração geológico-metalogenética, folha Rio de Janeiro. Carta Geológica Santos SF-23-Y-D.

FÚLFARO, V. J.; PONÇANO, W. .L. 1976. Sedimentação atual do estuário e baía de Santos: um modelo geológico aplicado a projetos de expansão da zona portuária. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, 1976. Anais ... Rio de Janeiro, v. 2, p. 67-90. FUNDAÇÃO RICARDO FRANCO. 2008. EIA/RIMA Dragagem de Aprofundamento do canal de navegação e bacias de evolução do Porto Organizado de Santos/SP.

HASUI,Y.; ALMEIDA, F. F. M. MIOTO, J. A.; MELO, M. S. 1982. Geologia, tectônica, geomorfologia e sismologia regionais de interesse às usinas nucleares da praia de Itaorna. São Paulo. 149 p. (IPT. Publicação,1225)

MARTIN, L.; SUGUIO, K. 1976. O Quaternário marinho do litoral do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto (MG), Sociedade Brasileira de Geologia, Anais, 1: 280-293.

MASSAD, F. 1985. Progressos recentes dos estudos sobre as argilas quaternárias da baixada santista. São Paulo, ABMF/ABEF.

MASSAD, F. 1986. As argilas transicionais (pleistocênicas) do litoral paulista – características geotécnicas e propriedades de engenharia. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 8. Porto Alegre. v. 2, p. 113-128.

MASSAD, F. 1986. O sobre-adensamento das argilas quaternárias da baixada santista. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 8. Porto Alegre. v. 1, p. 147-162.

MASSAD, F. 1986. Reinterpretação de sondagens de simples reconhecimento na baixada santista, à luz dos novos conhecimentos sobre a origem geológica dos sedimentos quaternários. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 8. Porto Alegre. v. 1, p. 129-146.

MASSAD, F. 1994. Propriedade dos sedimentos marinhos. In: Solos do Litoral de São Paulo. São Paulo, ABMS.

MASSAD, F. 1996. Propriedade geotécnica de sedimentos argilosos como evidência de variações do nível relativo do mar em Santos. 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. v. 1, p. 163-176.

MASSAD, F. 2009. Solos Marinhos da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas. Oficina de Textos. São Paulo. 247 p.

MIOTO, J. A. 1984. Mapa de Risco Sísmico do Sudeste Brasileiro. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Monografias, 10 (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Exatas, UNESP – Rio Claro).

MIOTO, J. A. 1993. Sismicidade e Zonas Sismogênicas do Brasil. Rio Claro, 2v. 558 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Exatas, UNESP – Rio Claro).

MIOTO, J. A. 1996. Excertos sobre Risco Sísmico no Estado de São Paulo. Revista Universidade Guarulhos – Série Geociências, I (3): 18-23.

PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICH, C. A.; ALMEIDA, F. F. M.; PRANDINI, F. L. 1981. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, IPT.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1976a. Mecanismo de gênese das planícies sedimentares do litoral do estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto (MG), Sociedade Brasileira de Geologia, Anais, 1: 295-305.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1976b. Presença de tubos fósseis de “callianassa”, nas formações quaternárias do litoral paulista e sua utilização na reconstrução paleoambiental. Boletim do IG, Instituto de Geociências, USP, v. 7: p. 17-26. São Paulo.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1978. Formações Quaternárias Marinhas do Litoral Paulista e Sul Fluminense. Publicação especial nº 1. Quaternary Marine Formations of the São Paulo and Southern Rio de Janeiro States. International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary. Pg. 11-18, São Paulo.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1981. Progress in research on Quaternary sea level changes and coastal evolution in Brazil. In: Symposium on variations in sea level in the last 15.000 years, magnitude and causes, Univ. South Caroline (USA), 1981.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1994. Geologia do Quaternário. In: Solos do Litoral de São Paulo. São Paulo, ABMS. SUGUIO, K; PETRI, S. 1973. Stratigraphy of the Iguape-Cananéia Lagoonal Region Sedimentary Deposits, São Paulo State, Brazil. Boletim IG, Instituto de Geociências – USP, v. 4: 1-20.