

Dissertação de Mestrado

**MODELO GEOLÓGICO DE SUBSTRATO SEDIMENTAR
MARINHO APLICADO À ATIVIDADE DE EXPANSÃO DO
CANAL DE ACESSO E BACIA DE EVOLUÇÃO DO PORTO
DE TUBARÃO EM VITÓRIA/ ES.**



NUGEO

AUTOR: MAURÍCIO DE SOUZA CARNEIRO

ORIENTADORA: Prof^a Dr^a Maria Giovana Parizzi

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO – DEZEMBRO DE 2013

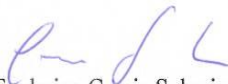
MODELO GEOLÓGICO DE SUBSTRATO SEDIMENTAR MARINHO APLICADO À ATIVIDADE DE EXPANSÃO DO CANAL DE ACESSO E BACIA DE EVOLUÇÃO DO PORTO DE TUBARÃO EM VITÓRIA/ES

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**, área de concentração em *Geotecnia Aplicada à Mineração*.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 13 de dezembro de 2013, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof.^a Dr.^a Maria Giovana Parizzi (Orientadora / UFMG)



Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira (UFOP)



Prof. Dr. Fabian Sá (UFES)

1.

C289m

Carneiro, Maurício de Souza.

Modelo geológico de substrato sedimentar marinho aplicado à atividade de expansão do canal de acesso e bacia de evolução do Porto de Tubarão em Vitória/ ES [manuscrito] / Maurício de Souza Carneiro. – 2013.

158f.: il., color.; grafs.; tabs.; mapas.

Orientador: Profa. Dra. Maria Giovana Parizzi.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO.

Área de concentração: Geotecnia Aplicada à Mineração.

1. Bacias (Geologia) - Teses. 3. Geologia submarina – Teses. I. Parizzi, Maria Giovana. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 551.242.2

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

“Dedique à disciplina o seu coração e os seus ouvidos às palavras que dão conhecimento”. (Provérbios, 23:12).

DEDICATÓRIA

Para Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha existência e pela permissão de mais esta etapa em minha vida. O amo acima de tudo!

Meus sinceros agradecimentos a VALE S/A pela oportunidade que me foi concedida no desenvolvimento desta Dissertação.

Agradeço ao meu Gerente Hiram Bezerra e ao meu Supervisor Jean Gonçalves, por acreditarem em mim e neste projeto. Agradeço por investirem seu tempo neste desafio lutando ao meu lado.

Agradeço aos Professores Doutores Frederico Sobreira, Romero Cesar e Adilson Leite, da Universidade Federal de Ouro Preto, através do programa de Mestrado em Engenharia Geotécnica ofertado pelo Núcleo de Geotecnia – NUGEO, a oportunidade de ser aluno desta grande Universidade Federal, pela estrutura do curso e dedicação dos seus professores.

Agradeço à minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Maria Giovana Parizzi por aceitar o desafio deste projeto com entusiasmo e comprometimento; serei sempre agradecido pelos aconselhamentos, pelas direções e correções no trabalho. Eu a admiro muito!

Agradeço ao Dr. Fabian Sá pela preciosa contribuição em aceitar o convite para participar da banca. Sua experiência no assunto enriquecerá este trabalho.

Aos colegas de mestrado Fernando Gomes, Adriano Micheluzzi, José Carlos Filho, Paulo Cesar Silva e Juscelino Nézio pelo aprendizado, amizade e troca de experiências. Vocês são “os caras”!

Aos colegas da VALE que ajudaram à sua maneira: Karla, Raul, Leila, Lucimara, Marcio, Marcelo, Ana, Alexandre, Alex, Gileno e Pedrão.

Ao Engenheiro de Minas Evandro Batiston, Mestre em Geoestatística, da Vale S/A, pela preciosa colaboração no tratamento eletrônico dos dados geológico-geotécnicos que geraram o Modelo Geológico proposto;

Ao Oceanógrafo Diego Venturini, Mestre em Oceanografia, da UMISAN Hidrografia e Engenharia, pelas aulas e elucidações no referencial teórico, bem como auxílio na interpretação dos levantamentos Geofísicos utilizados. Aos profissionais desta empresa que contribuíram na geração dos relatórios Geofísicos e Geotécnicos: Sandro Paixão, Oriwaldo Lima e Prussia Pestana.

Agradeço aos meus pais Nelson e Lúcia pelo amor, carinho e fundamentais valores que trago em minha formação. Sua experiência de vida serviu de balizamento e encorajamento para a decisão de encarar este desafio. Amo vocês!

Agradeço às minhas irmãs Renata e Danielle pelo total incentivo e manutenção em oração. Também amo vocês!

Aos meus pais por adoção, Neivo e Selma, que a mim confiaram à grande missão de guardar com amor, carinho e dedicação, para toda a minha vida, sua preciosa filha caçula. É muita responsabilidade!

Não há palavras neste mundo que expresse meu profundo agradecimento a minha esposa Fernanda, presente de Deus e porto seguro nas “tempestades” da vida. Você é meu ponto de equilíbrio. Sua doação e entusiasmo me impulsionaram nesta empreitada. Perdoe-me pelas horas que passamos longe um do outro. Agradeço-lhe pelo maior presente que você me deu: Nosso filho Guilherme.

RESUMO

O Porto de Tubarão, localizado em Vitória, no Estado do Espírito Santo, administrado pela empresa de mineração Vale S/A, é o maior exportador de minério e pelotas de ferro do mundo. Localiza-se na ponta de Tubarão, na área continental do município, movimentando além de minério de ferro, grãos, fertilizantes, carvão e combustíveis. Para a segura movimentação dos navios de carga pelo porto é preciso que uma série de investigações do leito marinho sejam realizadas. Para contribuir com o conhecimento sobre as características geológicas e geotécnicas do leito marinho no local o objetivo deste estudo é analisar a estratigrafia da subsuperfície do Canal de Aproximação em sua toda extensão e Bacia de Evolução do Porto, e propor um Modelo Geológico do substrato marinho norteando futuras intervenções de ampliações e aprofundamentos. Foram analisados levantamentos e estudos de Geofísica com Sísmica de Reflexão e Refração, confrontados pelas campanhas de sondagens geotécnicas marítimas ocorridas em 1970 e 2011, em um total de 90 boletins datilografados, resgatando informações preciosas e atuais. Ambas as campanhas foram trabalhadas em planilhas eletrônicas, a fim de serem exportadas para o *software* MineSight, onde foi possível estruturar um Modelo Geológico dos tipos de solo e rocha que compõe a região de estudo. O referido Modelo é apresentado em seções transversais e em 3-D, analisadas individualmente para todas as ocorrências de sedimentos e rochas, possibilitando também o cálculo dos volumes destes materiais em futuras dragagens e derrocagens. O modelo proposto representa a estratigrafia abaixo da atual cota de navegação do canal, a fim proporcionar um referencial para futuros projetos de ampliações.

Palavras-chaves: Modelo Geológico; Canal de Acesso; Porto de Tubarão.

ABSTRACT

The Tubarao Port, a port operated by the Brazilian mining company Vale, can be considered as the most important port of the world operating iron ore and pellet iron. It's located at the city of Vitoria, Espirito Santo state. The specific location of this Port is at the called "Ponta de Tubarão", on the land side of the city, and it handle with iron ore, iron pellet, fertilizers, coal and fuel. For ensure safety shipping maneuvers and good nagevability on the approach channel that leads ships to Port facilities, the conditions of the sea bed must be investigated. With the view to improve the knowledge regarding the geological and geotechnical characteristics of the bottom sea, on the surroundings of the port, this study presents as objective an analyze of sub-superficial stratigraphy of the approach channel along its full length and Evolution Basin, and come up with a Geological Model of the marine substrate. This model will have may particular importance for future feasibility studies and execution of expansion and deepening projects for increase Tubarão Port operation capacity. For develop the model, geophysics studies data and seismic reflection and refraction survey works data have been analyzed and faced up with the data that had been gotten from geotechnical survey works between 1970 and 2011 that summarized an amount the reports of 90 boreholes, rescuing important and current information. All the information had been labored at electronic sheets, for allowing being exported for MineSight, the software used for structure the geological model for the soil and rocks that comprises the studied area. The model permit obtain cross sections and 3D views, that can be analyzed singly for each occurrence of sediments and rocks, and better allows the determination for excavation volumes for these materials required for futures dredging and overthrow. The proposed model present the stratigraphy below the actual bottom level of the channel, aiming be used as reference for future expansions projects.

Key-words: Geological Model, Access Channel, Tubarao Port

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Localização da área de estudo _____ - 5 -
- Figura 2.2 – Área de Estudo situada no Setor 3. Há fraco desenvolvimento de depósitos quaternários ao sopé das falésias da Formação Barreiras (Martin *et al*, 1996). _____ - 8 -
- Figura 2.3 – Distribuição dos depósitos terciários da Formação Barreiras ao longo do litoral capixaba (Albino *et al*, 2006) _____ - 9 -
- Figura 2.4 - Praia do litoral Capixaba, próximo a área de estudo apresentando falésias características do Setor 3 (Albino *et al.*, 2006). _____ - 10 -
- Figura 2.5 - Classificação geomorfológica da região do Porto de Tubarão. Área de estudo é representada pelo código IIIcA. (Albino *et al.*, 2006). _____ - 11 -
- Figura 2.6- Baía do Espírito Santo realizado através de batimetria em 3-D. Observa-se pela escala de profundidade a suavidade da topografia a medida se afasta da costa (Carmo, 2009). _____ - 12 -
- Figura 2.7 - Mapa de classificação textural dos sedimentos da Baía de Vitória, segundo a classificação de Folk (1954) (Veronez *et al* 2008) _____ - 13 -
- Figura 2.8 - - Mapa de classificação dos sedimentos da Baía de Vitória, segundo a classificação modificada de Larssonneur (Veronez *et al*, 2008 apud Dias, 1996). ____ - 14 -
- Figura 2.9 - Mapa de distribuição do percentual de lama nos sedimentos da Baía de Vitória (Veronez *et al*, 2008 apud Dias, 1996). _____ - 15 -
- Figura 2.10 - Levantamentos do imageamento de reflexão obtidos na área de estudo (Carmo, 2009). _____ - 16 -
- Figura 2.11 - Distribuição mundial dos climas tropicais: a cor verde claro representa a classificação Aw/As (Fonte: <http://meteo12.nforum.biz/t16-tipos-de-clima>). _____ - 17 -
- Figura 2.12 - Principais processos físicos responsáveis pelo transporte de sedimento através da plataforma continental (Nitrouer e Wright, 1994). _____ - 21 -
- Figura 2.13 - Plataforma continental admitida por Nitrouer e Wright (1994). A linha azul corresponde à camada limite de superfície e a linha verde a camada limite de fundo (Nitrouer e Wright. 1994). _____ - 22 -
- Figura 2.14 - Estrutura das camadas limites na plataforma continental (Cacchione e Drake, 1990) _____ - 23 -
- Figura 2.15 - Sedimentação marinha com foco no cisalhamento influenciado por ondas e correntes (Sousby, 1997). _____ - 24 -
- Figura 2.16 - Ilustração da Praia de Camburi destacando os três molhes construídos na mesma praia (Marques, 2009 apud Albino e Oliveira, 2005). _____ - 25 -

Figura 2.17 - Classificação da Geofísica Aplicada com relação às áreas de conhecimento (FAPESP, 2013)	- 26 -
Figura 2.18 - Os principais métodos geofísicos (Urdininea, 2010)	- 27 -
Figura 2.19 - Domínio do espaço (Dourado, 2009)	- 28 -
Figura 2.20 - Domínio do tempo (Dourado, 2009).	- 29 -
Figura 2.21 - Modelo esquemático de propagação das ondas longitudinais (Dourado, 2009)	- 30 -
Figura 2.22 - Esquema de propagação das ondas transversais (Dourado, 2009)	- 31 -
Figura 2.23 - Modelo esquemático de propagação das ondas Rayleigh (Bolt, 1982).	- 33 -
Figura 2.24 - Modelo esquemático de propagação das ondas Love (Bolt, 1982)	- 33 -
Figura 2.25 - Levantamento de refração sísmica (INEC, 2008).	- 35 -
Figura.2.26 - Esquema de refração sísmica (Ferreira, 2002).	- 36 -
Figura 2.27 - Levantamento de Reflexão Sísmica (CANUTO, 2002)	- 37 -
Figura 2.28 - Exemplo de uma seção sísmica sobre sismograma. Neste caso apresenta interpretação de refletor horizontal produzido pelo contato OWC (óleo-água) (KEAREY <i>et al</i> 2009, apud JACK, 1997).	- 39 -
Figura 2.29 - Seção sísmica da Bacia do Acre – imagem em 2D (VALE, 2009).	- 39 -
Figura 2.30 - Compartimentação de ambientes submersos rasos (Souza, 2008).	- 42 -
Figura 2.31 - Sonar de Varredura Lateral - Side Scan Sonar 1 (Brasil, 2012)	- 43 -
Figura 2.32 - Sonar de Varredura Lateral - Side Scan Sonar 2 (Brasil, 2012).	- 44 -
Figura 2.33 - Porto de Vitória, Tubarão e Praia Mole obtidas através de batimetria (Marinha do Brasil, 2012)	- 45 -
Figura 2.34 - Exemplo de peneirador mecânico utilizado para se obter a classificação granulométrica dos solos (Fernandes, 2010)	- 47 -
Figura 2.35 - Exemplo de Curva Granulométrica utilizada neste projeto. A curva acima refere-se ao Furo 12, amostra 01 coletada na profundidade entre 18,64 m e 19,09 m (Relatório no 88 da MecSolos Engenharia, 2011)	- 47 -
2.36 - Exemplo dos resultados de Granulometria utilizada neste projeto. O refere-se ao Furo 12, amostra 01 coletada na profundidade entre 18,64 m e 19,09 m (Relatório no 88 da MecSolos Engenharia, 2011)	- 48 -
Figura 2.37 - Equipamento do ensaio de cisalhamento direto (DNIT, 2013)	- 49 -

2.38 - Esquema ilustrando o corpo de prova de solo entre duas pedras porosas para drenagem da água (Caputo, 1988).	- 50 -
2.39 – Gráfico “ $\sigma \times \tau$ ” para obtenção da coesão e ângulo de atrito do solo estudado (Caputo, 1988)	- 50 -
2.40 - Esquema de aplicação da carga de compressão "P" em testemunhos em rochas (Caputo, 1987).	- 51 -
Figura 2.41 - Esquema da disposição do corpo de prova (seção cilíndrica) no ensaio de resistência à tração por compressão diametral da amostra R8 do Furo 14 realizado neste projeto (Relatório no 144 da MecSolos Engenharia, 2011)	- 53 -
2.42 - Tensões de tração induzidas (Caputo, 1987).	- 53 -
2.43 - Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral de todas as amostras retiradas neste projeto (Relatório no 144 da MecSolos Engenharia, 2011)	- 54 -
3.1 - Parâmetros geodésicos e de projeto (Dragabrás, 2011)	- 56 -
Figura 3.2 - Antena de GPS (seta vermelha) no topo da haste com transdutor SBES - ecosonda de feixe único (seta amarela) (Dragabrás, 2011)	- 57 -
Figura 3.3 - Roldana de contagem instalada na estrutura em "A" (Dragabrás, 2011).	- 58 -
Figura 3.4 - Exemplo de perfilagem sísmica (Souza, 1988 apud Souza, 2006).	- 60 -
Figura 3.5 - Perfil sísmico exibindo o pacote sedimentar a ser dragado, limitado pelo fundo marinho (laranja) e pelo refletor forte (rosa) (UMISAN, 2011).	- 60 -
Figura 3.6 - Fonte sísmica da Applied Acoustics utilizada na pesquisa (Applied Acoustics, 2012).	- 61 -
Figura 3.7 - Fonte sísmica acoplada rebocada (UmiSan, 2011).	- 61 -
Figura 3.8 - Notebook para navegação ao longo das linhas de sondagem, bem como monitor para os dados sísmicos do sistema de aquisição (UmiSan, 2011).	- 62 -
Figura 3.9 - Mapa geral dos furos de sondagem em 1970 (McLelland, 1970)	- 64 -
Figura 3.10 - Exemplo de boletim realizado em 1970 (McLelland, 1970).	- 64 -
Figura 3.11 - Exemplo de boletim realizado em 1970 (McLelland, 1970).	- 65 -
Figura 3.12 - Exemplo da planilha eletrônica utilizada para consolidar todos os furos traduzidos da campanha em questão.	- 65 -
Figura 3.13 - Localização final dos testemunhos de sondagem (Umisan, 2011).	- 67 -
Figura 3.14 - Plataforma auto-elevatória utilizada para realização das sondagens (Umisan, 2011).	- 68 -

Figura 3.15 - Embarcações de apoio utilizadas durante a campanha de sondagem (Umisan, 2011).	- 68 -
Figura 3.16 - Poitas utilizadas para fixação e estabilização da plataforma (Umisan, 2011).	- 69 -
Figura 3.17 - Rebocador em operação de posicionamento das poitas utilizando guincho (Umisan, 2011).	- 69 -
Figura 3.18 - Spuds de cravação e cabos de estaimento para estabilização	- 70 -
Figura 3.20 - Exemplo de boletim de sondagem utilizado na campanha de 2011 (Umisan, 2011).	- 71 -
Figura 3.19 - Exemplo da planilha eletrônica utilizada para consolidar todos os furos da campanha em questão.	- 71 -
Figura 3.21 - Sonda SONDEC SS-51 instalada na plataforma (Umisa, 2011).	- 72 -
Figura 3.22 - Modelo de boletim de amostras da sondagem rotativa para posterior envio ao laboratório (Umisan, 2011).	- 73 -
Figura 3.23 - Amostrador tipo Shelby (Umisan, 2011)	- 74 -
Figura 3.24 - Sondagem rotativa (Umisan, 2011).	- 75 -
Figura 3.25 - Testemunhos coletados com 111 mm de diâmetro (Umisan, 2011)	- 75 -
Figura 3.26 - Exemplo de amostra tipo Shelby 01 (Umisan, 2011).	- 76 -
Figura 3.27 - Exemplo de amostra tipo Shelby 03 (Umisan, 2011)	- 77 -
Figura 3.28 - Mapa de localização das sondagens e seções verticais.	- 79 -
Figura 3.29 - Representação do alcance utilizado no modelamento geológico.	- 79 -
Figura 3.30 - Tipo de seção vertical do Modelo Geológico.	- 80 -
Figura 3.31 - Modelo geológico tridimensional dos tipos de materiais	- 80 -
Figura 3.32 - Exemplo da planilha utilizada para a consolidação <i>assay.csv</i> .	- 81 -
Figura 3.33 - Esquema e detalhamento do cálculo utilizado para variação da maré.	- 82 -
Figura 3.34 - Exemplo de planilha eletrônica de consolidação <i>collar.csv</i> onde é possível observar os anos em que as sondagens foram realizadas na coluna SONDAGEM.	- 83 -
Figura 3.35 - Mapa de georeferenciamento de todos os furos utilizados no Modelo Geológico para ambas as campanhas.	- 84 -
Figura 3.36 - Exemplo de planilha eletrônica de consolidação <i>survey.csv</i> onde é possível observar os anos em que as sondagens foram realizadas na coluna SONDAGEM.	- 85 -

Figura 3.37 - Fluxograma geral de entrada de todos os dados no programa para modelamento. _____	- 86 -
Figura 4.1 - Compartimentação da área de estudo criada a partir da interpretação da Sísmica de Reflexão (UMISAN, 2011). _____	- 89 -
Figura 4.2 - Referência utilizada para as velocidades sísmicas submersas e suas interpretações geológicas típicas (G-TEC, 2011) _____	- 92 -
Figura 4.3 - Áreas em vermelho e preto (-20m a -25m) - velocidades de 1800 a 2750m/s. (G-TEC, 2011) _____	- 93 -
Figura 4.4 - Área em azul com velocidades sísmicas na região central chegando até 3200 m/s (G-TEC, 2011) _____	- 94 -
Figura 4.5 - Área circulada em alaranjado com velocidades sísmicas de 1800m/s (G-TEC, 2011) _____	- 95 -
Figura 4.6.- Localização dos furos aonde surgiram testemunhos em rocha para ensaios em laboratório. O arenito encontrado pertence a Formação Barreiras. _____	- 101 -
Figura 4.7.- Localização do furos, da campanha de 1970, que atingiram a rocha além da cota -25m _____	- 103 -
Figura 4.8 - Resultado de resistência à tração (Brazilian Split Test) do arenito (MC Solos, 2011). _____	- 105 -
Figura 5.1 - Localização das seções transversais propostas no Modelo Geológico. _____	- 109 -
Figura 5.2 - Seção transversal SS´ na porção mais ao norte da área de estudo. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____	- 111 -
Figura 5.3 - Seção AA´. Está entre as seções mais importante do Modelo, uma vez que foi definida para contemplar a estratigrafia da bacia de evolução dos navios e a entrada do pier 2 do Porto. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____	- 113 -
Figura 5.4 - Seção BB´. Juntamente com a seção AA´ está entre as mais importantes e foi idealizada com o mesmo embasamento da seção AA´. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____	- 115 -
Figura 5.5 - Seção CC´. Igualmente importante por suas características geográficas estabelecidas para o Modelo. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____	- 117 -
Figura 5.6 - Seção DD´. Situada na entrada da bacia de evolução. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____	- 119 -
Figura 5.7 - Seção EE´. Pertence ao funil de aproximação da bacia de evolução. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta abaixo da seção. _____	- 121 -

Figura 5.8 - Seção FF'. Já pertencente totalmente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta abaixo da seção. _____ - 123 -

Figura 5.9 - Seção GG'. Pertencente totalmente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____ - 125 -

Figura 5.10 - Seção RR'. Inserida no canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____ - 127 -

Figura 5.11 - Seção TT'. Pertencente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____ - 129 -

Figura 5.12 - Seção UU' pertencente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____ - 131 -

Figura 5.13 - Seção VV' do canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____ - 133 -

Figura 5.14 - Seção XX'. Última seção transversal do canal de acesso e exemplo da continuidade e padrão de ocorrência sedimentar (areia e argila) ao longo do canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. - 135 -

Figura 5.15 - Seção II'. Foi projetada para cobrir longitudinalmente toda área de estudo, a fim de confirmar as informações obtidas nas seções transversais, bem como cruzar a litologia da área. Esta seção longitudinal estabelece uma clara noção da estratigrafia existente na área como um todo. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. _____ - 137 -

Figura 5.16 - Atual canal de navegação dragado em 2012/2013. Pode-se observar a calha de navegação desde a entrada do canal até a bacia de evolução. Foram lançados os furos de sondagem de ambas as campanhas para melhor visualização e entendimento de suas localizações. _____ - 138 -

Figura 5.17 - Aproximação do canal dragado em 2012/2013. A cor lilás apresenta os volumes hoje existentes na área. Pode-se observar a calha de navegação atual do porto com suas escarpas bem definidas. Os furos foram localizados na figura a fim de melhor entendimento da litologia. _____ - 139 -

Figura 5.18 - Concepção do leito oceânico baseado nos furos de sondagem, ou seja, agrupando-se todos os furos nas cotas de recorrência da água, pode-se modelar o leito oceânico apresentado na cor azul. _____ - 140 -

Figura 5.19 - Modelamento da ocorrência real do arenito nesta região considerando toda litologia encontrada nos furos de sondagem. Os afloramentos que já foram derrocados no corrente ano são contemplados e surgem no interior da bacia de evolução. _____ - 141 -

Figura 5.20 - Proposição de existência do arenito a partir do furo 685 até a entrada do canal. Os furos de sondagem da década de 70 não foram profundos o suficientes para encontrar o arenito. Os furos de 2011 não foram realizados ao longo do canal de acesso, portanto, o Modelo propõe a continuidade do arenito até a entrada do canal de acesso. ___ - 142 -

Figura 5.21 - Detalhe do afloramento de arenito no interior da bacia de evolução. Este arenito aflorado já foi derrocado em 2013. _____ - 143 -

Figura 5.22 - Modelo em 3-D apresentando a diferenciação do que foi considerado sedimento (areia e argila) e rocha (arenito). _____ - 144 -

Figura 5.23 - Gráfico dos volumes de sedimentos e rocha calculados pelo Modelo. - 145 -

Figura 5.24 - Gráfico dos volumes acumulados de sedimentos e rocha calculados pelo Modelo. _____ - 146 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Velocidades de propagação das ondas em alguns materiais e rochas (Traduzido de Kearey <i>et al</i> , 2009). _____	- 34 -
Tabela 2.2 - Diferenciação entre as sísmicas (Dourado, 2007) _____	- 38 -
Tabela 2.3 - Classificação dos solos de acordo com sua granulometria (ABNT NBR 6502/95). _____	- 48 -
Tabela 4.1 - Comparativo resumo com suas interpretações geológicas através das faixas adotadas de velocidades. _____	- 96 -
Tabela 4.2.- Resumo dos valores de resistência ao cisalhamento encontrados nos ensaios, em função das tensões normais definidas. As amostras foram coletadas com amostrador Shelby e todas pertencentes a campanha de 2011 (MC SOLOS, 2011). _____	- 99 -
Tabela 4.3 - Resultados de resistência a compressão do arenito (MC SOLOS, 2011)-	100 -
Tabela 4.4.- Furos da década de 70 que apontaram surgimento de rocha na área de estudo. _____	- 102 -
Tabela 5.1 - Resumo dos volumes classificados dos substratos. _____	- 146 -

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACAS – Água Central do Atlântico Sul
CD – Consolidação Drained
CU – Consolidação Undrained
UU – Unconsolid Undrained
DEME – Dredging, Environmental & Marine Engineering
DGPS - Differential Global Positioning System
GPS – Global Positioning System
GSM – Global System for Mobile Communications
IPEM-SP – Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
QA/CQ – Quality Assurance/Quality Control
RQD - Rock Quality Designation
RTK – Real Time Kinematic)
SBES – Single Beam Echosounde
TPD – Terminais de Produtos diversos
TPS – Terminais de Produtos Siderúrgicos
RSMV – Rio Santa Maria da Vitória
N-S - Norte/Sul
WNW-ESSE - Norte/Noroeste – Este/Sudeste
E-W - Leste/Oeste
NE-SW - Sudeste/Noroeste

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I: RELATÓRIO SÍSMICO DE REFRAÇÃO PARTE 1_____	I.1
ANEXO II: RELATÓRIO SÍSMICO DE REFRAÇÃO PARTE 2_____	II.1
ANEXO III: RELATÓRIO SÍSMICO DE REFLEXÃO_____	III.1
ANEXO IV: RELATÓRIO DE SONDAÇÃO GEOTÉCNICA PARTE 1_____	IV.1
ANEXO V: RELATÓRIO DE SONDAÇÃO GEOTÉCNICA PARTE 2_____	V.1
ANEXO VI: FOTOGRAFIAS DOS ENSAIOS EM SOLOS_____	VI.1
ANEXO VII: FOTOGRAFIAS DOS ENSAIOS EM ROCHAS_____	VII.1
ANEXO VIII: CAMPANHA DE SONDAÇÃO DO ANO DE 1970_____	VIII.1

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	- 1 -
1.1. JUSTIFICATIVA	- 1 -
1.2. OBJETIVOS	- 3 -
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	- 3 -
2. REFERENCIAL TEÓRICO	- 5 -
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	- 5 -
2.1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	- 5 -
2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ENTORNO	- 6 -
2.1.2.1. Geologia e Geomorfologia	- 6 -
2.1.2.1. Clima	- 17 -
2.1.3. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS.....	- 19 -
2.1.4. SEDIMENTAÇÃO	- 20 -
2.1.4.1. Sub-Região de Interesse – Plataforma Interna.....	- 22 -
2.1.4.2. Composição Sedimentar	- 24 -
2.2. INVESTIGAÇÃO SÍSMICA EM ÁREAS SUBMERSAS	- 26 -
2.2.1. A GEOFÍSICA APLICADA – CONCEITOS BÁSICOS.....	- 26 -
2.2.2. ONDAS SÍSMICAS.....	- 28 -
2.2.2.1. Ondas de Corpo	- 30 -
2.2.2.2. Ondas Superficiais.....	- 33 -
2.2.3. SÍSMICA DE REFRAÇÃO	- 34 -
2.2.4. SÍSMICA DE REFLEXÃO	- 37 -
2.2.4.5. Seção Sísmicas	- 38 -
2.2.5. APLICAÇÕES DE INVESTIGAÇÕES DE SUBSUPERFÍCIE	- 40 -
2.3. INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	- 46 -
2.3.1. SONDAGEM MISTA.....	- 46 -
2.3.2. AMOSTRAGEM SHELBY	- 46 -
2.4. ENSAIOS LABORATORIAIS	- 46 -
2.4.1. GRANULOMETRIA	- 46 -
2.4.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS	- 49 -
2.4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM ROCHAS	- 51 -
2.4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (COMPRESSÃO DIAMETRAL).....	- 52 -
3. MATERIAIS E MÉTODOS	- 55 -
3.1. GEOFÍSICA DE REFRAÇÃO APLICADA.....	- 55 -
3.2. GEOFÍSICA DE REFLEXÃO APLICADA	- 59 -
3.3. INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	- 62 -
3.3.1. CAMPANHA DE 1970.....	- 62 -
3.3.2. CAMPANHA DE 2011	- 66 -
3.3.2.1. Equipamentos Utilizados.....	- 72 -
3.3.2.2. Coleta de Amostras.....	- 74 -
3.4. ENSAIOS LABORATORIAIS	- 77 -
3.4.1. ENSAIOS DE SOLOS.....	- 78 -
3.4.2. ENSAIOS DE ROCHAS	- 78 -
3.5. CRITÉRIOS DE MODELAMENTO GEOLÓGICO ADOTADOS	- 78 -
3.6. CORRELAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E GEOFÍSICA	- 86 -
3.7. CUBAGEM DAS CAMADAS DE SEDIMENTOS E ARENITO	- 87 -
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	- 88 -
4.1. GEOFÍSICA.....	- 88 -
4.1.1. SÍSMICA DE REFLEXÃO (SÍSMICA RASA).....	- 88 -
4.1.2. SÍSMICA DE REFRAÇÃO	- 90 -
4.1.2.1. Processamento e Interpretação de Dados.....	- 90 -
4.1.2.2. Resumo dos Resultados da Refração	- 96 -

4.2. INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	- 97 -
4.2.1. PROPRIEDADES E ÍNDICES FÍSICOS DOS SEDIMENTOS E ROCHAS	- 97 -
4.2.1.1. Limites de Atterberg	- 97 -
4.2.1.2. Granulometria	- 98 -
4.2.1.3. Cisalhamento Direto	- 98 -
4.2.1.4. Ensaio de Compressão	- 100 -
4.2.1.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral	- 105 -
4.2.2. IDENTIDADE GEOTÉCNICA DO MODELO	- 106 -
5. PROPOSIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO	- 107 -
5.1. SEÇÕES TRANSVERSAIS	- 107 -
5.1.1. SEÇÃO SS'	- 110 -
5.1.1.1. Seção SS'	- 111 -
5.1.2. SEÇÃO AA'	- 112 -
5.1.2.1 Seção AA'	- 113 -
5.1.3. SEÇÃO BB'	- 114 -
5.1.3.1. Seção BB'	- 115 -
5.1.4. SEÇÃO CC'	- 116 -
5.1.4.1. Seção CC'	- 117 -
5.1.5. SEÇÃO DD'	- 118 -
5.1.5.1. Seção DD'	- 119 -
5.1.6. SEÇÃO EE'	- 120 -
5.1.6.1. Seção EE'	- 121 -
5.1.7. SEÇÃO FF'	- 122 -
5.1.7.1. Seção FF'	- 123 -
5.1.8. SEÇÃO GG'	- 124 -
5.1.8.1. Seção GG'	- 125 -
5.1.9. SEÇÃO RR'	- 126 -
5.1.9.1. Seção RR'	- 127 -
5.1.10. SEÇÃO TT'	- 128 -
5.1.10.1. Seção TT'	- 129 -
5.1.11. SEÇÃO UU'	- 130 -
5.1.11.1. Seção UU'	- 131 -
5.1.12. SEÇÃO VV'	- 132 -
5.1.12.1. Seção VV'	- 133 -
5.1.13. SEÇÃO XX'	- 134 -
5.1.13.1. Seção XX'	- 135 -
5.1.14. SEÇÃO II'	- 136 -
5.1.14.1. Seção II'	- 137 -
5.2. MODELAGEM 3D	- 138 -
5.3. VOLUMES DOS SUBSTRATOS MARINHOS	- 144 -
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	- 147 -
6.1. CONCLUSÕES	- 147 -
6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	- 151 -

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

O Porto de Tubarão, localizado no Município de Vitória/ES, foi inaugurado no dia 1º de abril de 1966, com o carregamento do navio suíço *Laplant* para 20 mil toneladas de minério de ferro de capacidade. Sua construção foi pensada para os futuros crescimentos e já, na inauguração, poderia receber navios de 150 mil toneladas, apesar de que, na época, só havia cargueiros para até 60 mil toneladas.

A expansão ocorreu na década de 70, iniciada com a construção do segundo píer de embarque de minério de ferro. O Píer Dois, como é conhecido, possui carregadores de navios que correspondem a aproximadamente 65% de todo embarque de minério de ferro do Porto.

Em 1983 foi implantado em Tubarão o TPM - Terminal de Praia Mole, para operação de produtos como carvão mineral, coque e manganês. Em 1986 foi construído o TGL-Terminal de Granéis Líquidos (combustíveis), utilizado pela Petrobrás, movimentando todo o combustível que abastece o Espírito Santo e o Sul da Bahia. O TPD - Terminal de Produtos Diversos foi implantado em 1998 para movimentar grãos e fertilizantes

Hoje, a Vale é uma mineradora global com sede no Brasil, com operações, laboratórios de pesquisa, projetos e escritórios presentes nos cinco continentes. É líder mundial na produção de minério de ferro e pelotas e a segunda maior produtora de níquel do mundo. Produz também cobre, ferroligas, cobalto e metais do grupo da platina, com grandes investimentos também em logística e energia.

Diante de investimentos tão expressivos no cenário brasileiro e mundial; diante da crescente necessidade de consumo do minério de ferro no âmbito global, a Vale tem investido na logística de transporte deste mineral e realizou diversos levantamentos técnicos com intuito de aprofundar o calado do Porto, para que navios de maior capacidade de carga possam acessar o mesmo. Desta forma, em 2012 e 2013, foi necessário realizar dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso e Bacia de Evolução.

Todos os estudos que basearam a atual dragagem foram utilizados neste trabalho, com intuito de fornecer informações que pudessem ser compiladas para projetos futuros. Para que sejam realizados estes novos e futuros estudos para aprofundamentos e ampliações, é imperioso conhecer o substrato marinho das camadas sedimentares e de rochas da subsuperfície da área de estudo, através de um Modelo Geológico proposto neste trabalho. Este Modelo poderá reduzir o tempo empregado em futuros levantamentos e análises já previstas para o canal do porto possibilitando, inclusive, minimizar a interferência nas movimentações das embarcações.

1.2. OBJETIVOS

Elaborar o Modelo Geológico do substrato marinho para o Canal de Acesso e Bacia de Evolução do Porto de Tubarão em Vitória/ES, baseado em levantamentos geofísicos e geotécnicos.

Como objetivos específicos, propõem-se:

- Realizar revisão sobre a dinâmica costeira e características físicas da área estudada; revisão de conceitos sobre os métodos geofísicos e geotécnicos empregados;
- -Resgatar e interpretar as investigações diretas (sondagens) e indiretas (geofísica de reflexão e refração) realizadas na área;
- Resgatar e interpretar as análises geotécnicas laboratoriais realizadas para os materiais geológicos do leito marinho do local pesquisado.
- Correlacionar as informações geológicas e geotécnicas obtidas para a construção de modelo geológico do substrato marinho do canal do porto de Tubarão;
- Interpretar o modelo geológico de modo a auxiliar as futuras intervenções e obras no local.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Apresentam-se os tópicos abordados no presente trabalho e sua distribuição em cinco capítulos conforme apresentada a seguir:

Capítulo 1: Este capítulo apresenta as justificativas, os objetivos e a organização desta dissertação.

Capítulo 2: Referencial Teórico - Neste capítulo procurou-se apresentar a caracterização da área de estudo e seus entornos, descrevendo aspectos geológicos e geomorfológicos, clima, oceanografia e sedimentação, bem como conceitos básicos sobre geofísica de reflexão e refração, sobre as investigações geológico-geotécnicas e sobre os ensaios laboratoriais aplicados nos estudos.

Capítulo 3: Materiais e Métodos - Neste capítulo procurou-se sintetizar os materiais e métodos aplicados no estudo, suas premissas de aplicações, bem como a metodologia usada para o estabelecimento do modelamento geológico proposto.

Capítulo 4: Apresentação e Análise dos Resultados - Este capítulo apresenta a discussão da análise dos resultados obtidos nos levantamentos em campo com Geofísica de Reflexão, Geofísica de Refração, de Investigação Geológico-Geotécnica e Ensaios Laboratoriais. Os resultados dos levantamentos de Sísmica de Reflexão e Refração fornecem um indicativo a respeito das camadas de materiais existentes na subsuperfície estudada, e que foi necessário comparar tais levantamentos sísmicos com sondagens Geotécnicas, a fim de cruzar e confirmar as informações geradas no Modelo Geológico proposto.

Capítulo 5: Proposição do Modelo Geológico – Aqui será apresentado o Modelo Geológico que poderá nortear futuras intervenções de aprofundamento da Área de Estudo e/ou ampliação do Porto. Este Modelo é fundamentado nas pesquisas de uma campanha de sondagem antiga da região, em Julho de 1970 (aproximadamente 90 furos), da campanha realizada na mesma região em 2011 e em todos os outros estudos de pesquisas. Neste capítulo estão discriminadas todas as seções transversais propostas, o Modelamento 3-D e a cubagem dos substratos marinhos encontrados.

Capítulo 6: Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos - Apresenta as conclusões dos resultados apresentados em capítulo anterior e sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está compreendida no Porto de Tubarão, localizado na Baía do Espírito Santo, município de Vitória-ES, com enfoque na Bacia de Evolução e o Canal de Aproximação das embarcações que acessam ao porto. (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Localização da área de estudo

Esta Área de Estudo está localizada nas coordenadas de 20°17'42,55"S e 40°14'36,31"O, englobando de forma generalizada, a Bacia de Evolução e o Canal de Aproximação aos berços de atracação nos píeres de minério de ferro, píeres de granéis líquidos, Terminais de Produtos diversos (TPD) e Terminais de Produtos Siderúrgicos (TPS). As características físicas da área de entorno foram descritas, pois influenciam diretamente nos processos litorâneos e geológicos (sedimentação, litoestratigrafia, substrato do leito oceânico, etc.) da área estudada. Estes fatores interferem nas manobras de aproximação, evolução e atracação dos navios aos píeres supracitados.

Tais aspectos físicos delimitam e norteiam sobremaneira as operações portuárias diariamente, de forma não rotineira, e requerendo medidas e cuidados diários nas movimentações das embarcações, a fim de garantir procedimentos náuticos seguros e eficientes economicamente.

2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ENTORNO

2.1.2.1. Geologia e Geomorfologia

A plataforma continental brasileira situa-se com diferenças ao longo de seus 6.400km de extensão, tendo 300km de largura máxima na plataforma amazônica e de 10km (mínimo) no estado da Bahia (Patchineelam, 2004). No estado do Espírito Santo a plataforma é caracterizada por largura média de 230 km.

A geomorfologia é bastante heterogênea com embasamentos distintos e características peculiares, como complexos insulares (ígneos e metamórficos), recifes submersos e truncados (paleorecifes) e bancos de algas calcárias encontrados na plataforma (Garcia, 2005). A região costeira do estado do Espírito Santo apresenta três unidades geomorfológicas distintas que podem possuir influência sedimentológica sobre a plataforma continental, que são:

a) **Pré-Cambriano:** Encontrados ao norte do estado em duas grandes unidades de rochas pré-cambrianas; a primeira composta por gnaisses migmatíticos e rochas graníticas (quartzo, plagioclásio e biotita), e a segunda por gnaisses kinzigíticos e núcleos de charnoquitos com menos biotita (Coutinho, 1974);

b) **Tabuleiros da Formação Barreiras:** Segundo Albino (1999) é designada como um pacote sedimentar maduro em sua mineralogia, continental, pouco consolidado e pouco selecionado e presente em quase toda a extensão do litoral brasileiro. Ao norte de Vitória, os tabuleiros terminam próximos às praias, em falésias.

c) **Planície Costeira Quaternária:** É caracterizado por pouco desenvolvimento ao pé das falésias da Formação Barreiras. As planícies sedimentares quaternárias são pouco desenvolvidas no litoral capixaba, estando associadas às variações do nível do mar e ao aporte fluvial de sedimentos. Desta forma, as áreas distantes de aportes fluviais significativos apresentam planícies costeiras limitadas pelos tabuleiros da Formação Barreiras e pelos promontórios rochosos. Nos vales dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim há um melhor desenvolvimento desta planície (Martin *et al.*, 1993).

Partindo da presença dos compartimentos acima, Martin *et al.* (1996) propuseram divisão fisiográfica do litoral Capixaba em cinco setores. O Setor 3 engloba a área de estudo e se caracteriza por baixo desenvolvimento das planícies quaternárias da Formação Barreiras (Figuras 2.2 e 2.3).

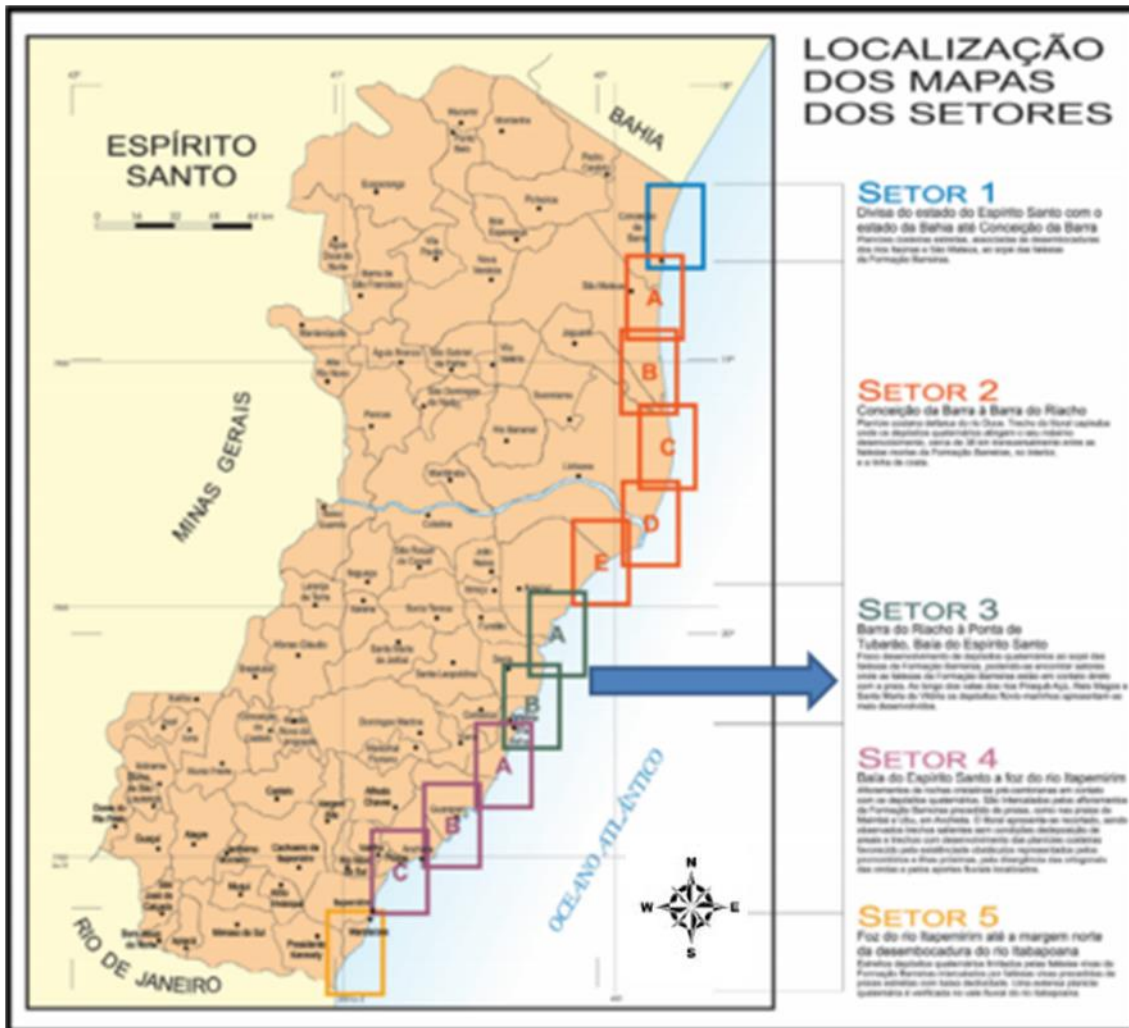


Figura 2.2 – Área de Estudo situada no Setor 3. Há fraco desenvolvimento de depósitos quaternários ao sopé das falésias da Formação Barreiras (Martin *et al*, 1996).



Figura 2.3 – Distribuição dos depósitos terciários da Formação Barreiras ao longo do litoral capixaba (Albino *et al*, 2006)

Para (Rossetti *et al*, 1990) a Formação Barreiras é uma grande sequência siliciclástica cenozoica aflorando do Rio de Janeiro a foz do Rio Amazonas, apresentando uma considerável variedade de estruturas sedimentares. Grande parte delas visualizadas em falésias costeiras (Figura 2.4) apontando para uma sedimentação através de correntes de marés.



Figura 2.4 - Praia do litoral Capixaba, próximo a área de estudo apresentando falésias características do Setor 3 (Albino *et al.*, 2006).

Os arenitos, em grande parte de granulometria média a fina, apresentam estratigrafia cruzada principalmente tabular e acanalada de pequeno e médio porte, com associações marcantes de lâminas de argila, ocorrendo em diversas situações e constituindo-se em um de suas características mais marcantes (Rossetti *et al.*, 1990).

A Ponta de Tubarão, onde se localiza o Porto de Tubarão, esta inserida no Setor 3 e é caracterizada por uma região exposta às ondas e baixo aporte de sedimentos (Figura 2.5).

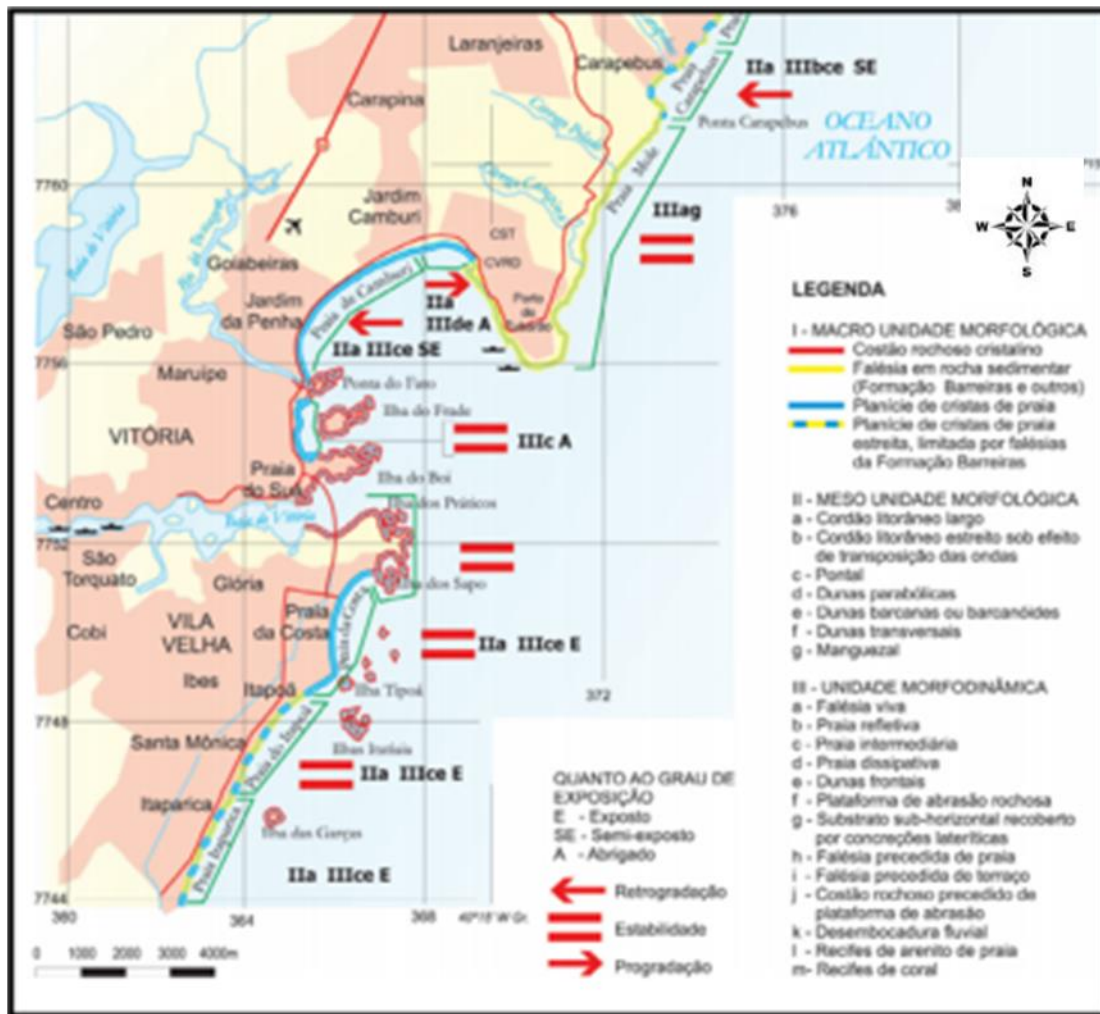


Figura 2.5 - Classificação geomorfológica da região do Porto de Tubarão. Área de estudo é representada pelo código IIIcA. (Albino et al., 2006).

Na região da área de estudo observa-se baixa declividade e surgimento de recifes próximos a entrada do canal da Baía de Vitória. (Figuras 2.6) (Carmo, 2009).

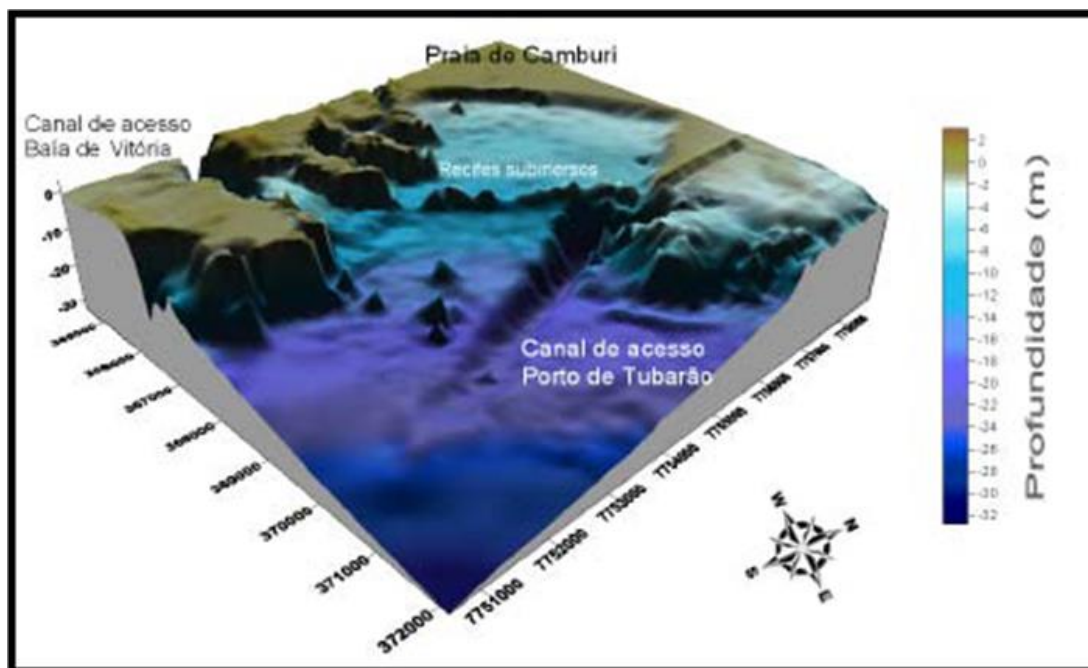


Figura 2.6- Baía do Espírito Santo realizado através de batimetria em 3-D. Observa-se pela escala de profundidade a suavidade da topografia a medida se afasta da costa (Carmo, 2009).

Já em relação aos sedimentos encontrados na Baía de Vitória (que dá acesso ao Porto de Vitória) Veronez *et al* (2009) afirmam que são compostos de areia lamosa e lama, com presença de conchas e carapaças de organismos associados às frações mais grossas e/ou cascalhosas. O mesmo autor percebeu que existe um aumento no diâmetro médio dos grãos próximo à Ilha do Boi, ao delta do RSMV e nos estreitamentos existentes nos arredores do bairro Santo Antônio.

No mapa de distribuição textural, segundo a classificação de Folk (1954) descrita em Veronez (2009 apud Dias, 2004) se verifica irregularidades na sedimentação da Baía de Vitória. Há predominância de lama arenosa e lama, interrompida por três faixas de areia lamosa expressivas: A primeira na região do delta do RSMV, a segunda se iniciando ao sul da foz do Rio Bubu, estendendo-se até a região da baía a oeste do Bairro Santo Antônio, e a terceira faixa encontra-se na área ao sul de Santo Antônio, estendendo-se até próximo ao Porto de Vitória (Figura 2.7).

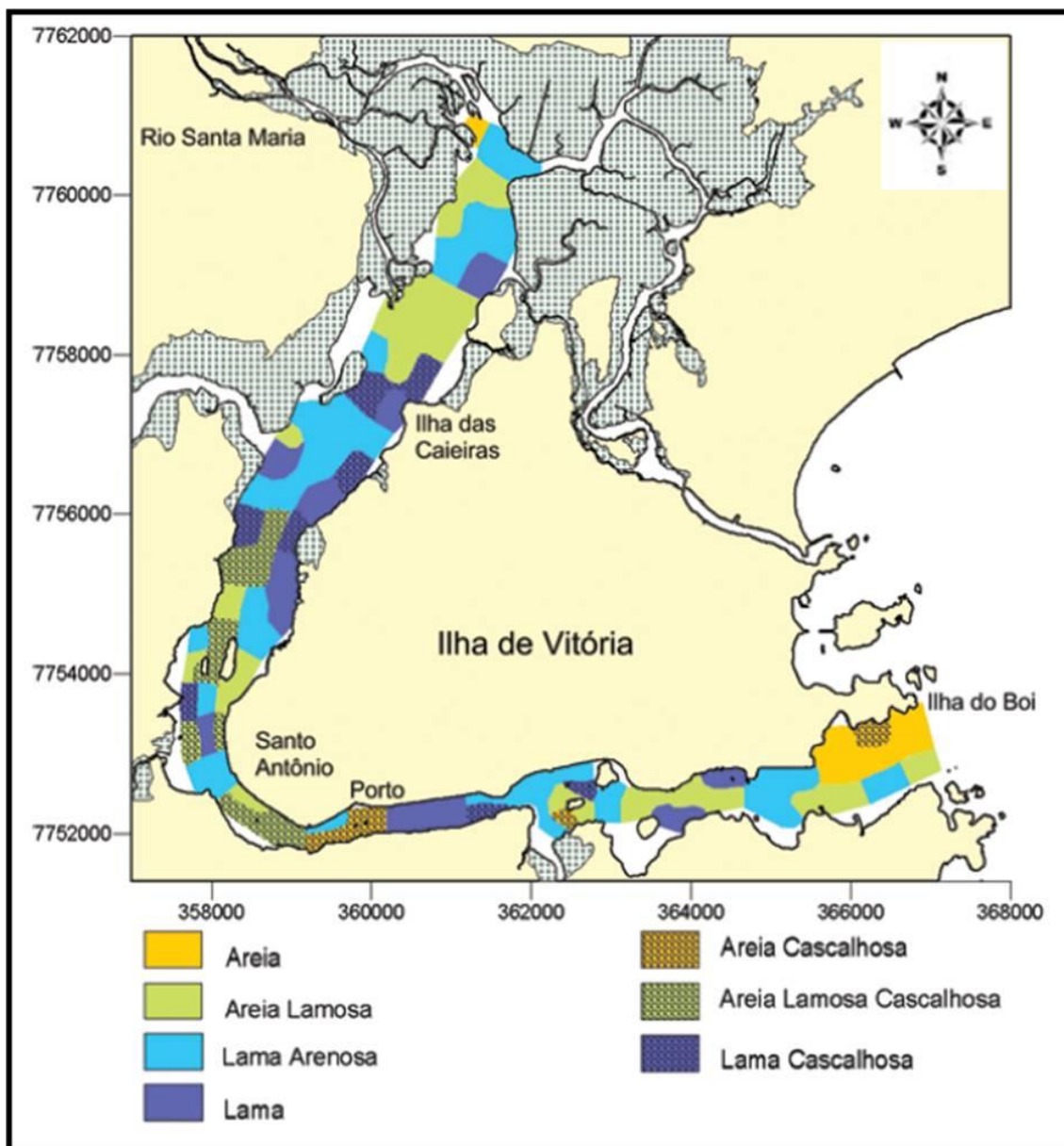


Figura 2.7 - Mapa de classificação textural dos sedimentos da Baía de Vitória, segundo a classificação de Folk (1954) (Veronez *et al* 2008)

Existe uma grande área de sedimentos arenosos associada à desembocadura da baía, ao sul da Ilha do Boi, e também são verificadas pequenas manchas cascalhosas e arenolamosas associadas a fragmentos de conchas e afloramentos de rochas ao longo de toda a baía, aumentando a complexidade exibida nesta classificação textural (Veronez, 2009).

Na classificação composicional e textural modificada de Larssonneur (2012) (Veronez apud Dias, 1996), verifica-se uma distribuição mais homogênea com dominância do padrão lamoso terrígeno, bem como grande presença longitudinal de margas (lamas carbonáticas – restos de organismos) na região que vai da Ilha das Caieiras ao Bairro de Santo Antônio (região central da Baía de Vitória junto ao canal principal) (Figura 2.8). Veronez (2009) também observou sedimentos arenosos litoclásticos na desembocadura da Baía de Vitória entrando na Baía do Espírito Santo.

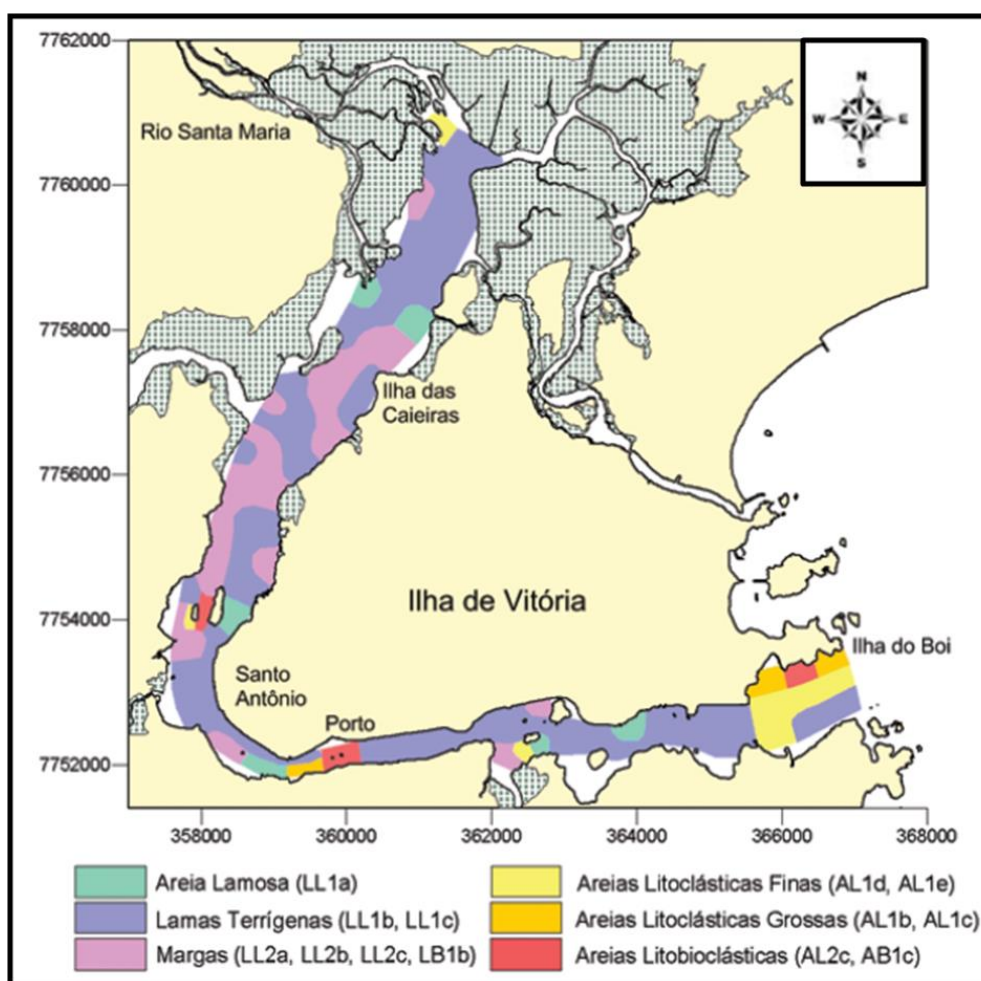


Figura 2.8 - - Mapa de classificação dos sedimentos da Baía de Vitória, segundo a classificação modificada de Larssonneur (Veronez *et al*, 2008 apud Dias, 1996).

Para a distribuição do percentual de lama nos sedimentos, Veronez (2009) utilizou a classificação modificada de Larssonneur (Dias, 1996), assim como mostra a (Figura 2.9). Este mapa enfatiza a grande concentração de sedimentos coesivos presentes na Baía de Vitória, cuja média é de mais de 50%.

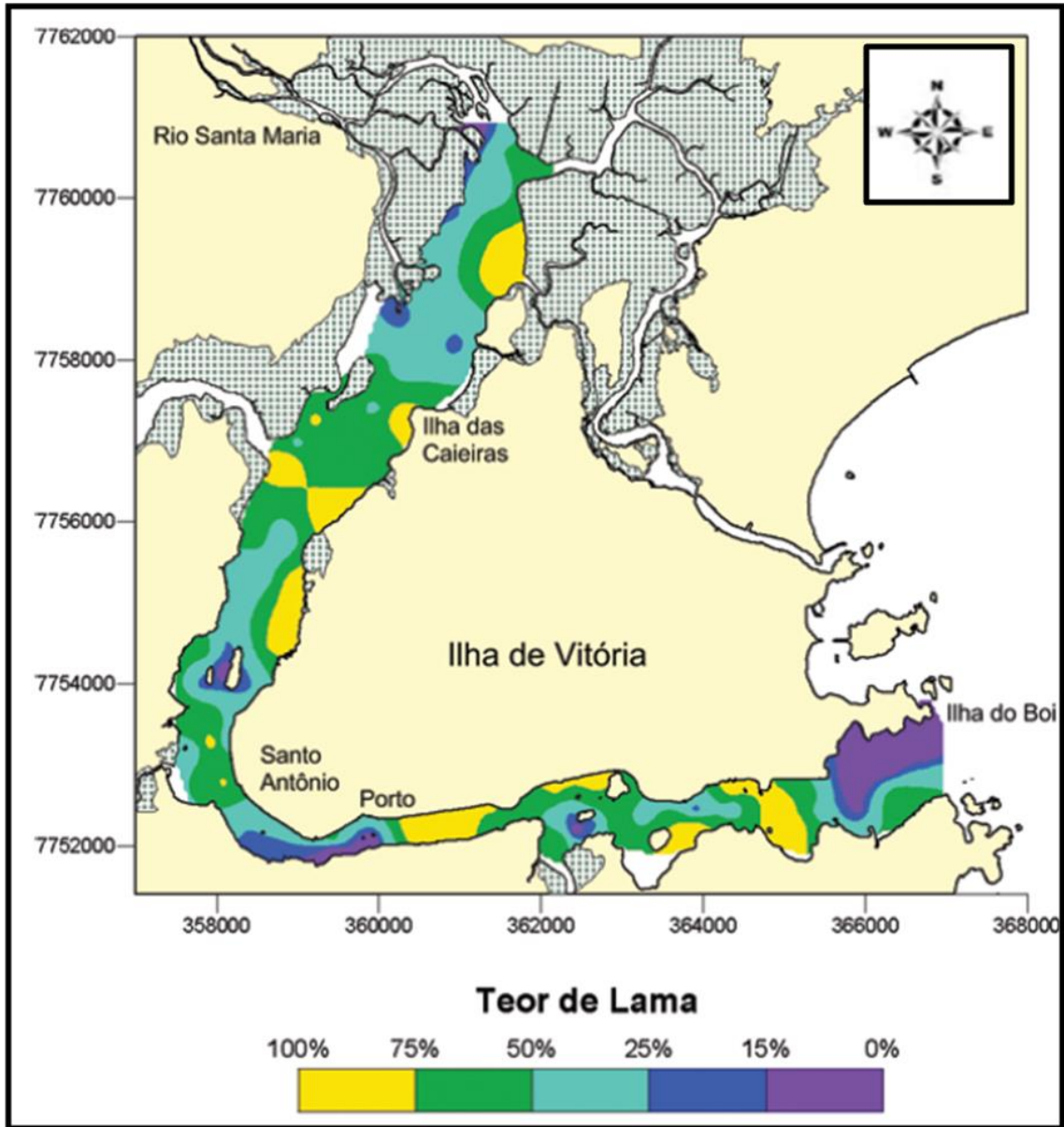


Figura 2.9 - Mapa de distribuição do percentual de lama nos sedimentos da Baía de Vitória (Veronez *et al*, 2008 apud Dias, 1996).

Na região da desembocadura do estuário para Baía do Espírito Santo os teores de lama também apresentam valores de menos de 15%, principalmente junto à Ilha do Boi (Veronez, 2009).

Em relação ao fundo da Baía do Espírito Santo, o levantamento de toda a Baía, com um sonar de varredura lateral por Carmo (2009), possibilitou a classificação do fundo em termos de alta (tonalidade escura) e baixa reflexão (tonalidade clara) a partir da intensidade da reflexão (Figura 2.10).

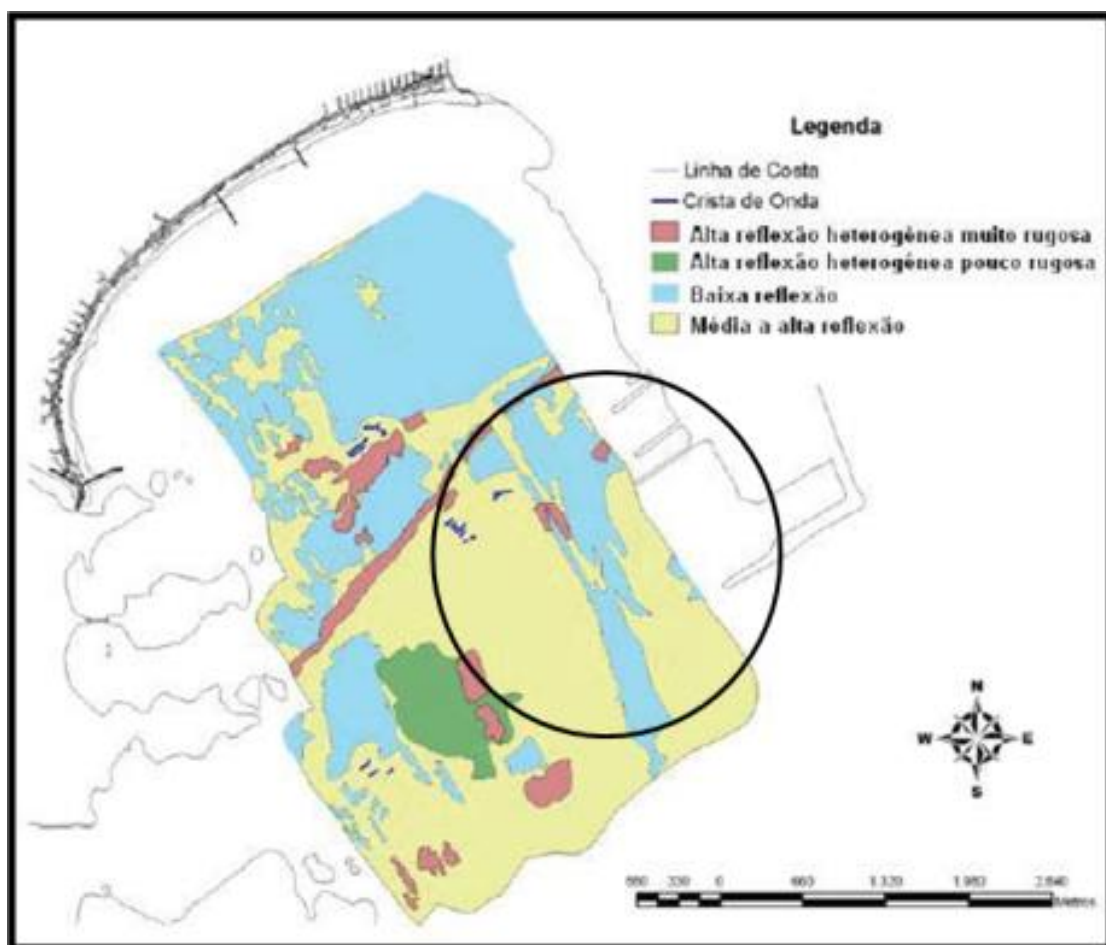


Figura 2.10 - Levantamentos do imageamento de reflexão obtidos na área de estudo (Carmo, 2009).

Para área de estudo (círculo em preto na figura acima) o mapeamento mostrou baixa reflexão no canal de acesso (maior potencial de deposição devido à maior profundidade) e de média reflexão na periferia do canal (areias finas e lamas).

2.1.2.1. Clima

Os movimentos climatológicos predominantes na plataforma continental do Brasil são ventos alísios vindos da linha equatorial e o surgimento do giro anticiclônico subtropical do Atlântico Sul (Patchineelam, 2004). A região analisada encontra-se totalmente envolvida em região de clima Aw, da classificação de Köppen-Geiger (Figura 2.11), que se caracteriza pelo clima tropical com estação seca e úmida (chuvas no verão).

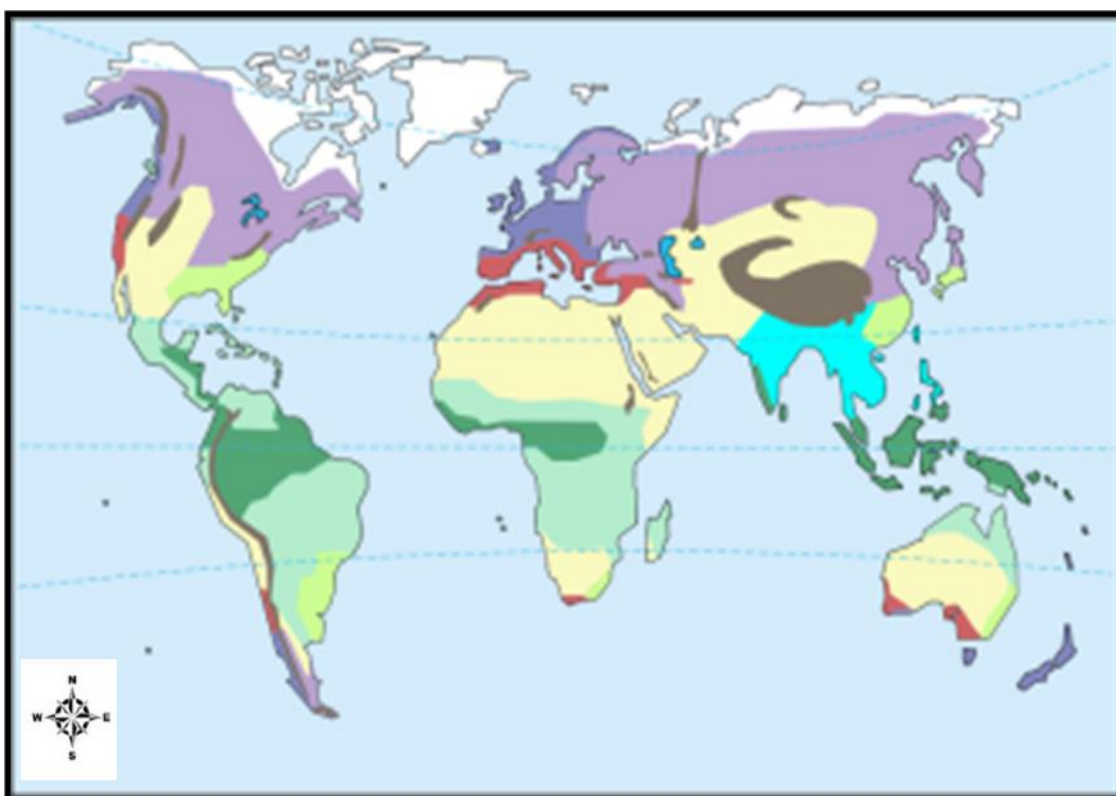


Figura 2.11 - Distribuição mundial dos climas tropicais: a cor verde claro representa a classificação Aw/As (Fonte: <http://meteo12.nforum.biz/t16-tipos-de-clima>).

Abaixo seguem alguns índices da área de estudo:

- Altitude: Nível do mar;
- Clima: Tropical úmido;
- Umidade relativa do ar: Máxima: 85% e Mínima: 75%;
- Temperatura ambiente: Máxima: 40° C e Mínima: 18° C;
- Ambiente: Atmosfera salina, altamente corrosiva e úmida;

Com relação ao regime de ventos, são principalmente os vindos de norte e leste com maior incidência de ventos NE. Não há histórico de ventanias frequentes com mais de 50 km/h. São eles:

- Ventos de Quadrante N, predominância 37,8%, velocidade máxima 45 km/h.
- Ventos de Quadrante S, predominância 21,3%, velocidade máxima 37 km/h.
- Calmarias, predominância de 24,7%.
- Outros, predominância de 16,2 %.

A predominância de direção dos ventos durante os meses do ano pode ser assim resumida:

- Dezembro a Fevereiro: Quadrante N;
- Abril a Maio: Quadrante S;
- Junho a Julho: Quadrantes N, S e W;
- Agosto a Novembro: Quadrantes N, S e Calmarias;

Os dados pluviométricos (quantidade de chuva por metro quadrado em determinado local e em determinado período) da área de estudo podem ser resumidos abaixo:

- Estações chuvosas – outubro a abril, com índice acima de 100mm por dia;
- Estações secas – maio a setembro, com índice de 30 a 100mm por dia;
- Índice pluviométrico anual médio – 1.238,5mm;
- Índice pluviométrico máximo diário – 147,7mm;
- Média anual de dias com chuva – 141 dias;

Deste modo, no que tange a interrupções provocadas por ventos e chuvas, deve-se esperar mais interrupções nas atividades nos meses de Abril a Julho, em contrapartida, os meses de Agosto a Fevereiro que se mostram propícios a uma maior produtividade.

2.1.3. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS

Quanto às ondas e marés, as amplitudes na região da área de estudo (Ponta de Tubarão) não apresentam grandes valores podendo atingir, nas preamares de sizígia (épocas de luas cheia e nova), valores máximos de cerca de 1,8m e mínimos de 0,0m nas baixamars de sizígia. As ondas seguem o regime dos ventos reinantes e vem principalmente de NE e NNE, com alturas de até 2 m.

Vagas com alturas acima de 2m são raras, com menos de 2% do período, havendo, no entanto, informação de vagas com até 4m, tanto de NE e NNE como de SE. Os marulhos se apresentam com maior frequência que as vagas, indicando que ventos mais fortes nas áreas mais distantes do Oceano Atlântico. Marulhos de até 3m vindos principalmente de NE e E são os mais frequentes.

Os marulhos provenientes do Sul, SE e de SW são os que apresentam maiores alturas, podendo chegar eventualmente a até 5m, porém com incidência inferior a 1%. Conforme histórico local, o período crítico relacionado a ondas estende-se durante os meses de inverno (Junho a Setembro). Quanto a plataforma sudeste (entre Abrolhos, Bahia, Campos e Rio de Janeiro), há composição de massas de águas como Água Tropical (superficial quente e salgada) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS - fria e menos salgada).

Há também a Água Costeira (quente e pouco salina), mas suscetíveis aos processos costeiros. A ressurgência no verão (ventos NE/E), quando a ACAS penetra a plataforma interna, promove a queda da temperatura das águas para aproximadamente 15° C, sendo que os ventos NE/E são predominantes na geração de ondas e correntes na plataforma sudeste movimentando as marés para sudoeste.

A fisiografia variável na região do Espírito Santo forma barreira natural que interfere na hidrodinâmica do Oceano podendo gerar ventos transitórios e vórtices ciclônicos (Albino e Gomes, 2005). Segundo Marquez (2009 apud Fonzar, 1994), o Anticiclone Tropical Atlântico e o Anticiclone Polar Migratório são os sistemas de ventos geradores de ondas que atingem o litoral do Estado do Espírito Santo.

O mesmo autor afirma ainda que o Anticiclone Tropical Atlântico possui um caráter estacionário e gera na área de estudo ondas vindas de Leste/Nordeste com alturas da ordem de 0,5m a 1m e períodos da ordem dos 5 a 7 segundos. Devido ao seu grande “fechth” (pista de sopro de vento) e intensidades de vento mais fortes, estes geram ondas com alturas e períodos maiores, aparecendo por vezes ondas superiores a 2,5m de alturas significativas e períodos de pico superiores a 10 segundos.

2.1.4. SEDIMENTAÇÃO

As correntes de maré, correntes de turbidez, ondas internas e as correntes de natureza variada (atrído com o vento, maré, estratificação térmica horizontal) são os principais fatores hidrodinâmicos moldadores da morfologia composta por sedimento não consolidado (Swift et. al., 1971 apud Walker, 1984; Suguio, 2003).

Essas forças físicas moldam os tipos de formas de fundo e erosões sendo diretamente ligadas a disponibilidade e ao tipo de suprimento sedimentar. Nitrouer e Wright (1994) acerca do transporte sedimentar da plataforma continental, colocam que a hidrodinâmica é desuniforme da costa até a plataforma, aumentando a profundidade em direção ao talude e influenciando a velocidade das correntes. Na (Figura 2.12) apresentam-se os mecanismos contribuidores no transporte de particulados na plataforma:

- Fluxos dirigidos pelo vento, incluindo ressurgência e subsidência;
- Ondas internas; Fluxos orbitais;
- Ondas infragravitacionais;
- Plumias estuarinas (positivas ou negativas);
- Processos da zona de surfe e remobilização por ação de ondas;

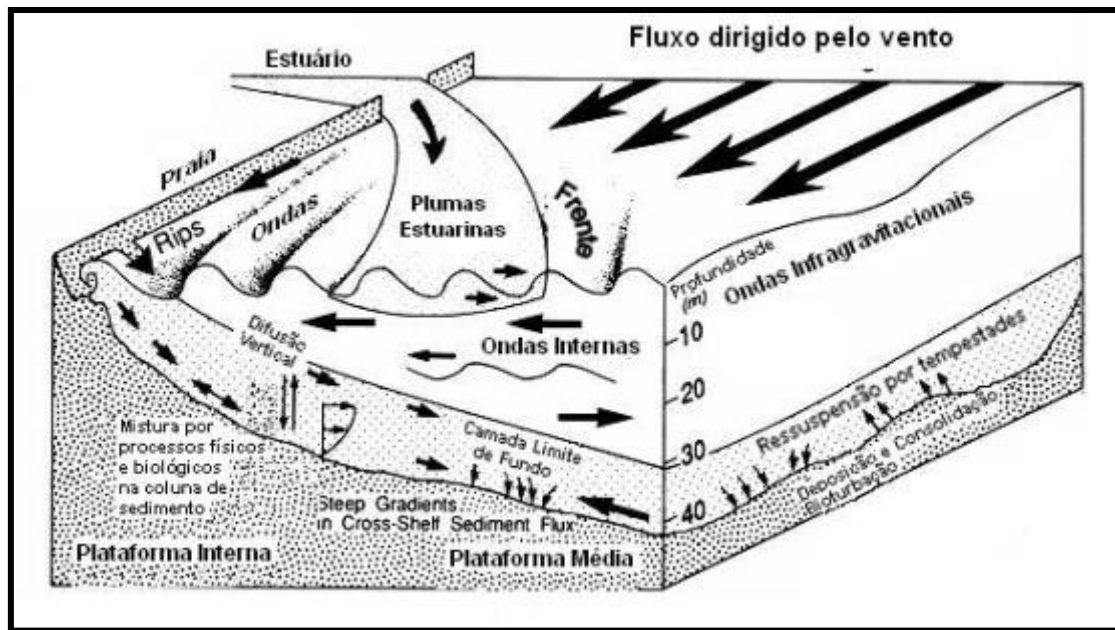


Figura 2.12 - Principais processos físicos responsáveis pelo transporte de sedimento através da plataforma continental (Nitrouer e Wright, 1994).

Nitrouer e Wright, 1994 estabeleceram que a plataforma continental tenha 4 subregiões (Figura 2.13):

- a) **Plataforma externa:** a fricção é pequena e é mínima a remobilização do fundo pelas ondas;
- b) **Plataforma média:** o regime do fluxo e as influências de ondas e correntes decrescem para *offshore*;
- c) **Plataforma interna:** fricção dominante e os limites das camadas superficiais e de fundo se sobrepõem;
- d) **Zona de Surfe:** quebra das ondas (alta energia do fluxo);

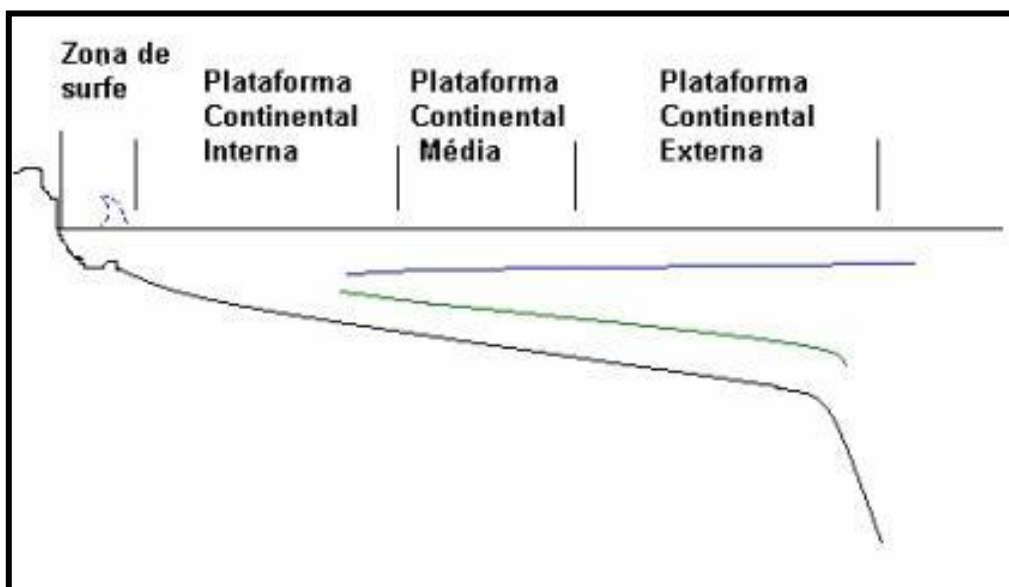


Figura 2.13 - Plataforma continental admitida por Nitrouer e Wright (1994). A linha azul corresponde à camada limite de superfície e a linha verde a camada limite de fundo (Nitrouer e Wright. 1994).

2.1.4.1. Sub-Região de Interesse – Plataforma Interna

Na plataforma interna as correntes longitudinais são muito atuantes e geradas por ondas incidentes à costa modificando-se para *offshore*, sendo que em eventos de tempestades essas correntes são capazes de remobilizar regiões mais profundas (Nichols, 1999; Suguio, 2003). O fluxo turbulento provoca no fundo deslocamento dos grãos de sedimentos iniciando o transporte em velocidade crítica dependente das características do meio e do sedimento (Heathershaw, 1988; Nichols, 1999; Sousby, 1997).

A (Figura 2.14) apresenta a estrutura da camada limite e a agitação sedimentar na plataforma continental, incluindo a camada limite de superfície, de fundo planetária, de espessura e de fundo dominada por ondas (Nitrouer e Wright, 1994).

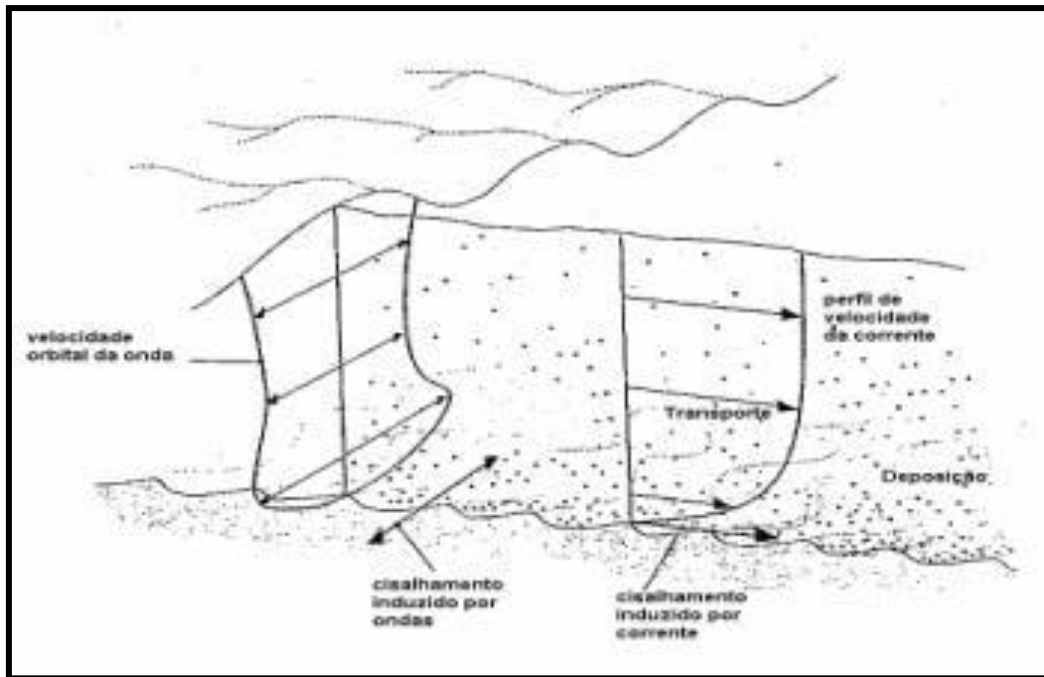


Figura 2.14 - Estrutura das camadas limites na plataforma continental (Cacchione e Drake, 1990)

Vale destacar que a camada limite, bem como a resultante do transporte sedimentar, são alteradas proporcionalmente às forças hidrodinâmicas e rugosidades do fundo. As ondas e correntes estão ligadas à camada limite, à intensidade e à direção do transporte de sedimento (Figura 2.15). Desta forma o transporte sedimentar é formado pela ação das correntes mas as ondas é que representam a remobilização dos grãos no fundo oceânico (Sousby, 1997).

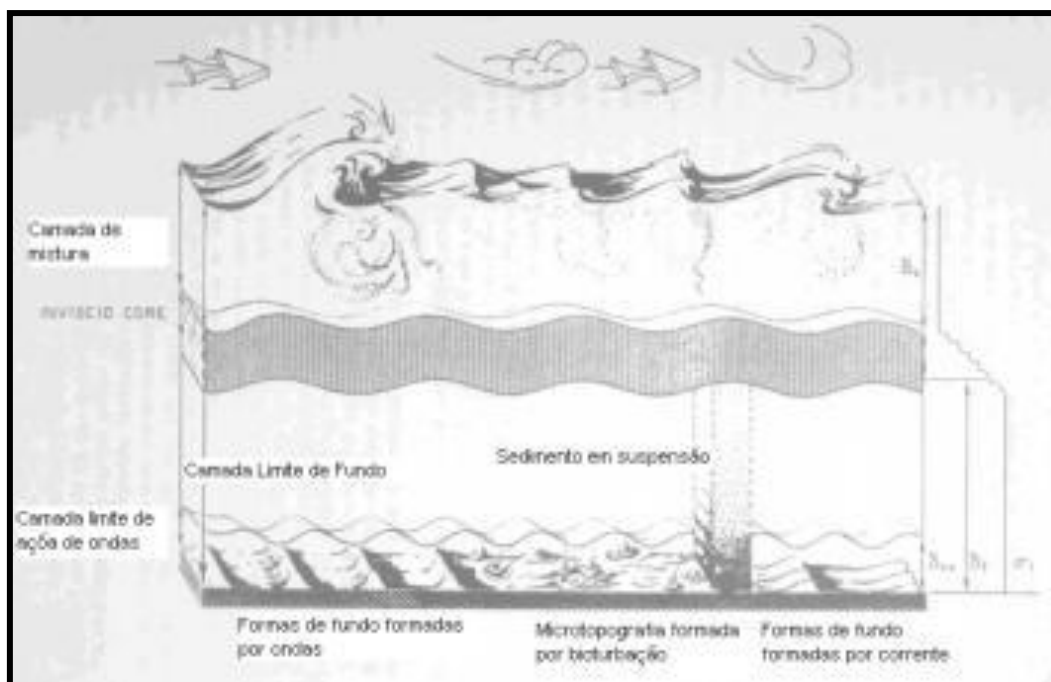


Figura 2.15 - Sedimentação marinha com foco no cisalhamento influenciado por ondas e correntes (Sousby, 1997).

2.1.4.2. Composição Sedimentar

Nas regiões subtropicais e tropicais (águas quentes e rasa), há grande geração de material bioclástico, sendo que, os fatores inibidores desta geração (salinidade e contaminação de lama terrígena), são insignificantes nestas regiões, causando surgimento de recifes - resistentes camadas de carbonato de cálcio habitadas por organismos marinhos diversos - (Albino, 1999).

Os teores de CaCO_3 são superiores a 75% na plataforma interna do estado do Espírito Santo. Estes bioclastos apresentam granulação grossa, variando entre areias e cascalhos (Kowsmann e Costa, 1979). Segundo o autor, estes sedimentos são compostos principalmente por areia terrígena até a isóbata de 20m e de cascalho e areia de briozoários recifais em profundidades maiores (Muehe, 1994).

Foi encontrado por Melo *et al.* (1975 apud Albino, 1999) o predomínio de algas coralinas, briozoários, moluscos e foraminíferos bentônicos. Mais especificamente na área de estudo, no ano de 1999, a Praia de Camburi sofreu um processo de engordamento artificial, como solução de um processo erosivo iniciado na década de

1970 com a instalação do Terminal de Tubarão e a urbanização da orla.

Foram lançados cerca de 970.000 m³ de areia entre os molhes 1, 2 e 3, que representaram aporte de 121% (em média) ao volume dos dois setores da praia. (Marques, 2009, apud Prata e Albino, 2005) (Figura 2.16)

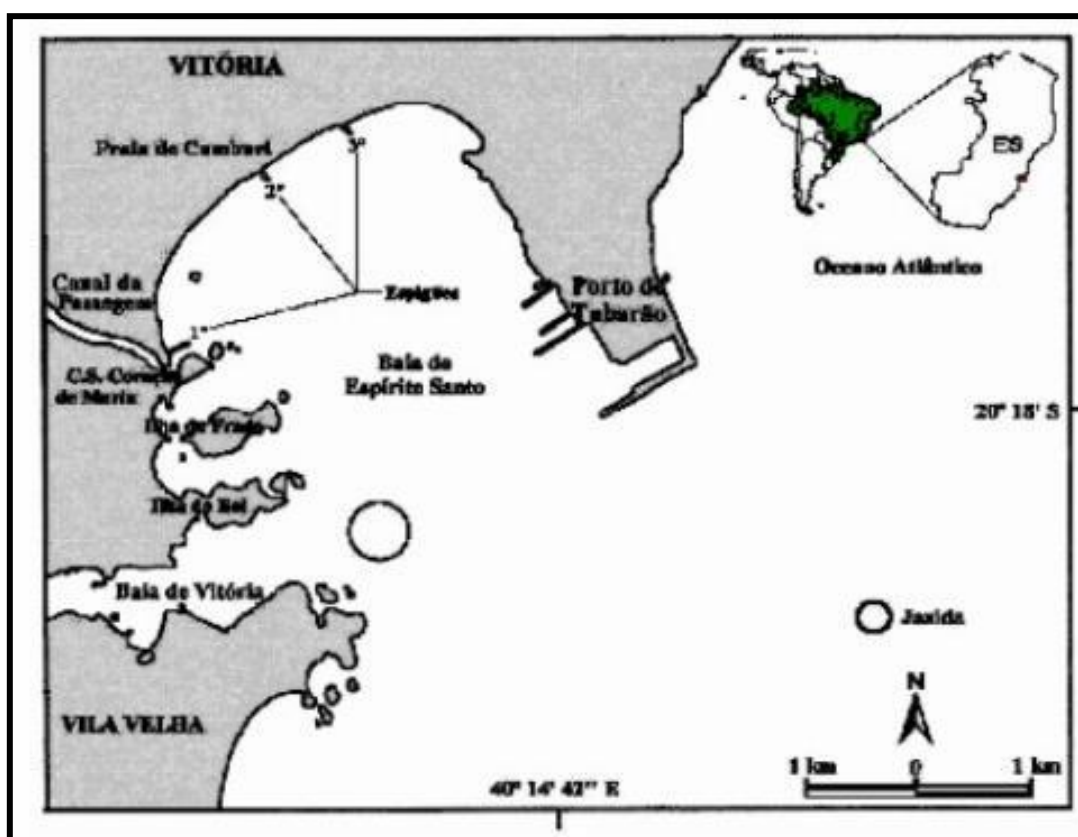


Figura 2.16 - Ilustração da Praia de Camburi destacando os três molhes construídos na mesma praia (Marques, 2009 apud Albino e Oliveira, 2005).

Segundo Marques, 2009 os resultados obtidos indicam uma tendência estável e progradante da Praia de Camburi, confirmando o sucesso do engordamento de 1999, apesar da perda de materiais finos. Através da avaliação morfotextural, concluiu-se que existe uma relação entre a granulometria aliada à sua respectiva morfologia praial com a perda de sedimentos finos no perfil emerso e à presença de areia muito fina no início dos perfis submersos (Marquez, 2009 apud Pedruzzi e Albino, 2005).

As variações granulométricas sofridas pela Praia de Camburi revelam os diferentes agentes atuantes sobre os sedimentos, ora perdendo materiais finos e ora perdendo materiais de fração mais grossa. (Marquez, 2009 apud Prata e Albino, 2005).

2.2. INVESTIGAÇÃO SÍSMICA EM ÁREAS SUBMERSAS

2.2.1. A GEOFÍSICA APLICADA – CONCEITOS BÁSICOS

Segundo conceitos acadêmicos, a Geofísica é um ramo das Geociências (Figura 2.17) que estuda propriedades físicas das rochas e minerais, assim como aspectos ligados à estas propriedades, objetivando distribuição espacial das estruturas que compõe o Planeta Terra. Tem como campo o estudo da Antroposfera (camada mais externa da Terra) e os estudos objetivam atividades econômicas e/ou sociais (Dourado, 2010).

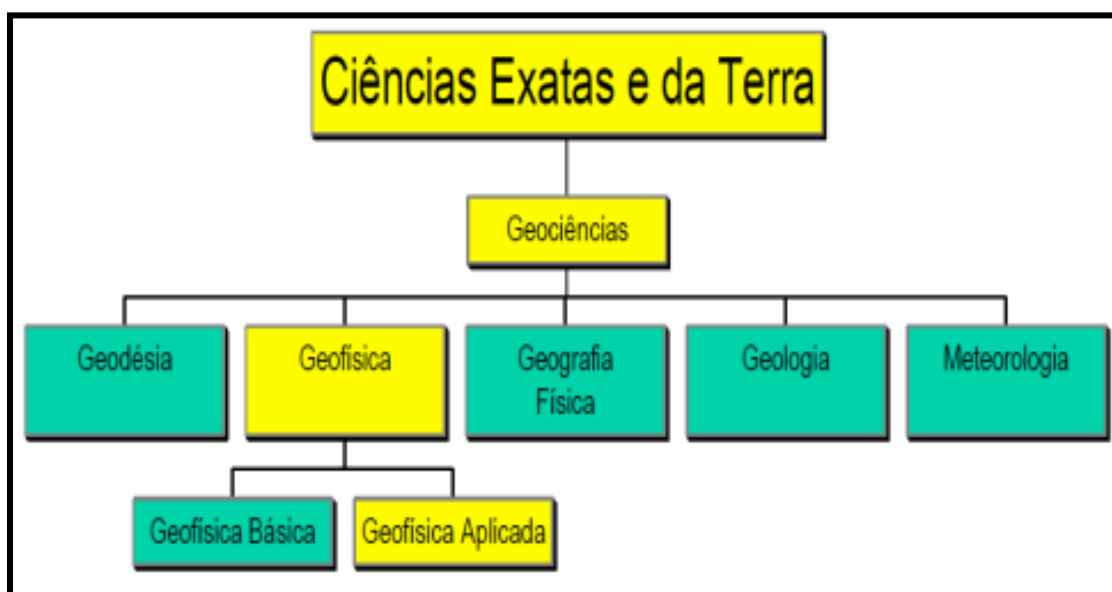


Figura 2.17 - Classificação da Geofísica Aplicada com relação às áreas de conhecimento (FAPESP, 2013)

Segundo mesmo autor, Geofísica Pura estuda grandes estruturas e as suas pesquisas são para objetivos científicos e/ou sociais. Os principais métodos geofísicos, com indicação dos utilizados neste estudo, estão detalhados na (Figura 2.18) abaixo.



Figura 2.18 - Os principais métodos geofísicos (Urdininea, 2010)

As grandes aplicações destes métodos são:

- Prospecção de petróleo;
- Hidrogeologia;
- Estudos Ambientais;
- Geologia de Engenharia e Engenharia Civil;
- Mineração;
- Arqueologia;
- Geofísica Forense ou Legal;

Para os estudos relativos a este projeto, foram utilizados os Métodos Sísmicos de Reflexão e Refração onde ambos são baseados em propagação de ondas.

2.2.2. ONDAS SÍSMICAS

Ondas sísmicas é um fenômeno físico de propagação da energia no tempo e no espaço correspondendo a:

- **Eletromagnéticas:** Luz, radio e raio X por exemplo;
- **Mecânicas:** Som e ondas sísmicas por exemplo;

As ondas no domínio do espaço são (Figura 2.19):

- **Amplitude (A):** Distância entre picos positivos e negativos em relação ao deslocamento zero;
- **Comprimento de Onda (λ):** Distância entre dois pontos que se deslocam em fase ou distância entre dois picos.

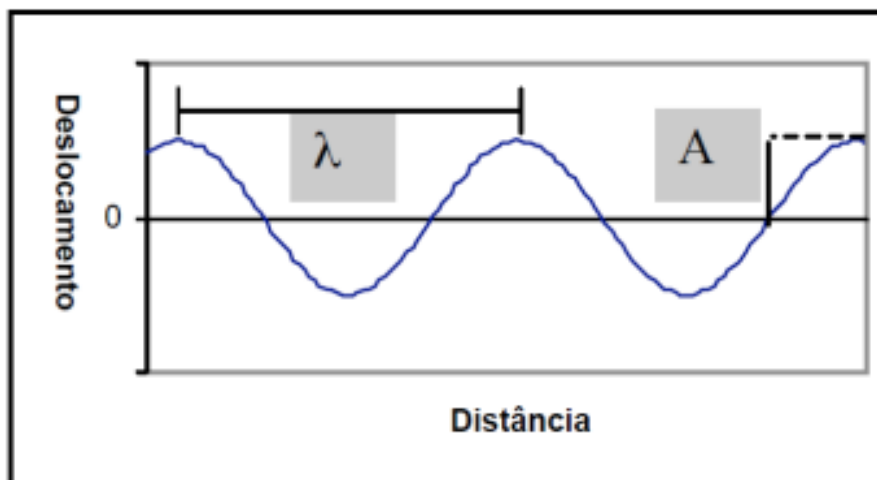


Figura 2.19 - Domínio do espaço (Dourado, 2009)

As ondas no domínio do tempo são (Figura 2.20):

- **Período (T):** Tempo entre dois pontos em mesma fase ou entre dois picos;
- **Frequência (f):** Número de oscilações na unidade de tempo que um ponto é submetido durante a passagem de uma onda.

$$\text{(frequência)} f = \frac{1}{T}$$

(2.1)

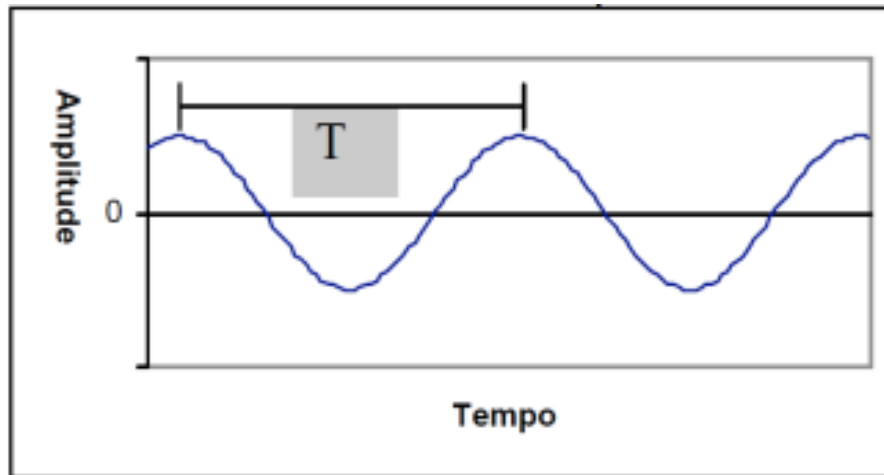


Figura 2.20 - Domínio do tempo (Dourado, 2009).

A velocidade de propagação das ondas sísmicas dependerá das propriedades elásticas e da densidade do material onde inserida, ela é diretamente proporcional aos parâmetros elásticos e inversamente proporcional à densidade dos corpos onde está inserida. O entendimento da velocidade na unidade de tempo será fundamental para compreensão dos métodos sísmicos que serão utilizados nas investigações do aprofundamento do canal de acesso e bacia de evolução em questão.

$$\text{(velocidade de propagação)} V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

(2.2)

Tomando como premissa o conhecimento dos assuntos acima, parte-se para o estágio onde há início a propagação sob a forma de ondas elásticas.

As ondas sísmicas (mecânicas) se propagam na superfície terrestre e classificam-se como:

- 1) Ondas de corpo (no interior da matéria);
 - Ondas longitudinais;
 - Ondas transversais;

- 2) Ondas superficiais (na superfície dos corpos);
 - Ondas Rayleigh;
 - Ondas Love;

2.2.2.1. Ondas de Corpo

Divididas em longitudinais e transversais, onde as longitudinais são compressionais ou também chamadas de primárias. As ondas primárias são as inicialmente percebidas após ocorrência de terremotos, em função das partículas vibrarem na mesma direção de propagação (Figura 2.21).

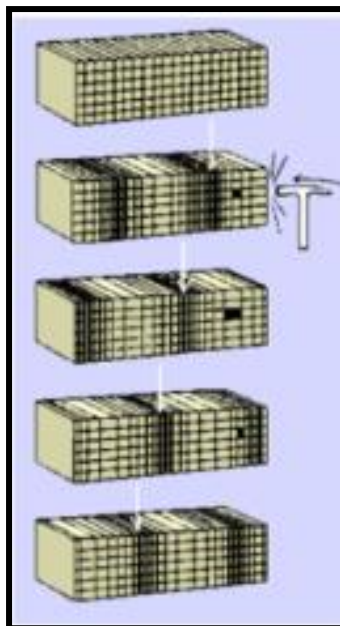


Figura 2.21 - Modelo esquemático de propagação das ondas longitudinais (Dourado, 2009)

Quanto às ondas transversais (cisalhantes e secundárias), as partículas respondem perpendicularmente à direção de propagação (Figura 2.22).

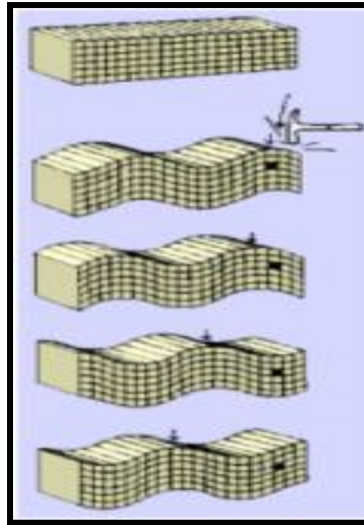


Figura 2.22 - Esquema de propagação das ondas transversais (Dourado, 2009)

Para definição de parâmetros elásticos de solos e rochas, com técnicas sísmicas, utilizam-se velocidades de propagação no corpo (ondas longitudinais “P” e transversais “S”) sendo diretamente proporcionais aos parâmetros elásticos dos materiais e inversamente proporcionais às densidades. Podem-se determinar essas velocidades de acordo com as fórmulas abaixo:

$$V_P = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \cdot G}{\rho}} \quad (2.3)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \nu)}$$

Onde:

V_P = velocidade da onda longitudinal;

V_S = velocidade da onda transversal;

E = módulo de Young ou de Elasticidade;

G = módulo de Rigidez ou de Cisalhamento;

K = módulo de Volume ou de Incompressibilidade;

ν = coeficiente de Poisson;

ρ = densidade;

Podem-se obter parâmetros elásticos de solos e rochas por meio da determinação da velocidade de propagação das ondas sísmicas e da densidade dos materiais. As fórmulas são apresentadas a seguir:

Coeficiente de Poisson:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} \quad (2.4)$$

Módulo de Young ou de Elasticidade:

$$E = V_P^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}{(1 - \nu)} \quad (2.5)$$

Módulo de Rigidez ou de Cisalhamento:

$$G = \rho \cdot V_S^2 \quad (2.6)$$

Módulo de Volume ou de Incompressibilidade:

$$K = \rho \cdot V_P^2 - \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot V_S^2 \quad (2.7)$$

2.2.2.2. Ondas Superficiais

São ondas originárias na superfície livre da Terra, divididas em ondas Rayleigh e ondas Love, sendo a primeira deslocando-se verticalmente em movimento elíptico/retrógrado (Figura 2.23).

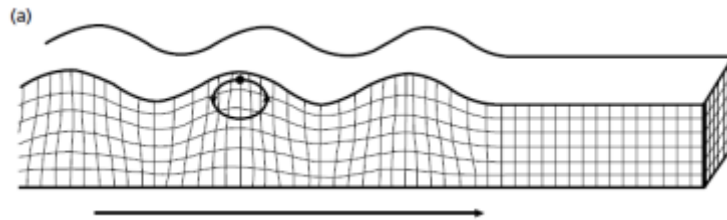


Figura 2.23 - Modelo esquemático de propagação das ondas Rayleigh (Bolt, 1982).

Já nas ondas Love, as partículas vibram na horizontal e na direção perpendicular da propagação de vibração (Figura 2.24).

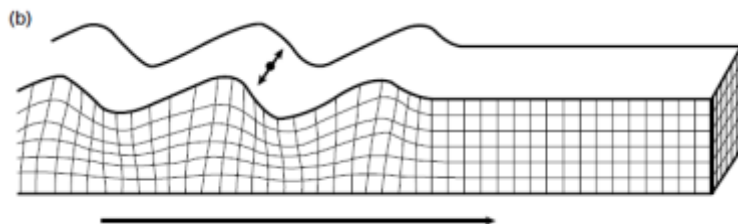


Figura 2.24 - Modelo esquemático de propagação das ondas Love (Bolt, 1982)

Na (Tabela 2.1) são apresentadas algumas velocidades de propagação das ondas em determinados tipos de rochas e materiais.

Tabela 2.1 - Velocidades de propagação das ondas em alguns materiais e rochas (Traduzido de Kearey *et al*, 2009).

Materiais	V_p (km/s)
1. Materiais Inconsolidados	
1.1. Areia (seca)	0,2 – 1,0
1.2. Areia (saturada)	1,5 – 2,0
1.3. Argila	1,0 – 2,5
1.4. Sedimento Glacial indefinido (saturado)	1,5 – 2,5
1.5. Solo congelado	3,5 – 4,0
2. Rochas Sedimentares	
2.1. Arenito	2,0 – 6,0
2.2. Calcários	2,0 – 6,0
2.3. Dolomitas	2,5 – 6,5
3. Rochas Ígneas e Metamórficas	
3.1. Granito	5,5 – 6,0
3.2. Gabro	6,5 – 7,0
3.3. Ultramáficas	7,5 – 8,5
4.0. Fluidos	
4.1. Ar	0,3
4.2. Água	1,4 – 1,5
4.3. Gelo	3,4
4.4. Petróleo	1,3 – 1,4
5.0. Outros materiais	
5.1. Aço	6,1
5.2. Ferro	5,8
5.3. Alumínio	6,6
5.4. Concreto	3,6

2.2.3. SÍSMICA DE REFRAÇÃO

Segundo Kearey *et al* (2009) este tipo de levantamento utiliza-se da energia sísmica que retorna à superfície após penetrar e percorrer através do solo e materiais ao longo das trajetórias dos raios refratados.

Esta técnica tem por objetivo detectar, na superfície terrestre, as ondas sísmicas refratadas na profundidade (refração total), e desta forma determinar as velocidades de propagação das ondas e as espessuras das camadas na subsuperfície, dispondo de ensaios em campo e interpretação de dados computacionais e gráficos que possibilitam atingir este objetivo (Dourado, 2011).

Um feixe de energia desloca-se em linha reta num meio homogêneo. Ao atingir o limite entre dois meios de diferentes propriedades a uma determinada angulação, ocorre a refração da direção de propagação como na superfície de um lago. A sísmica de refração utiliza esta modificação de direção para coletar dados e informações relevantes sobre a subsuperfície em questão.

A trajetória desta energia é representada por setas (Figura 2.25) e o método consiste em coletar o tempo de retorno dos primeiros impulsos emitidos, originados de um disparo, em um conjunto de hidrofones distribuídos sobre a superfície e a jusante da fonte de emissão.

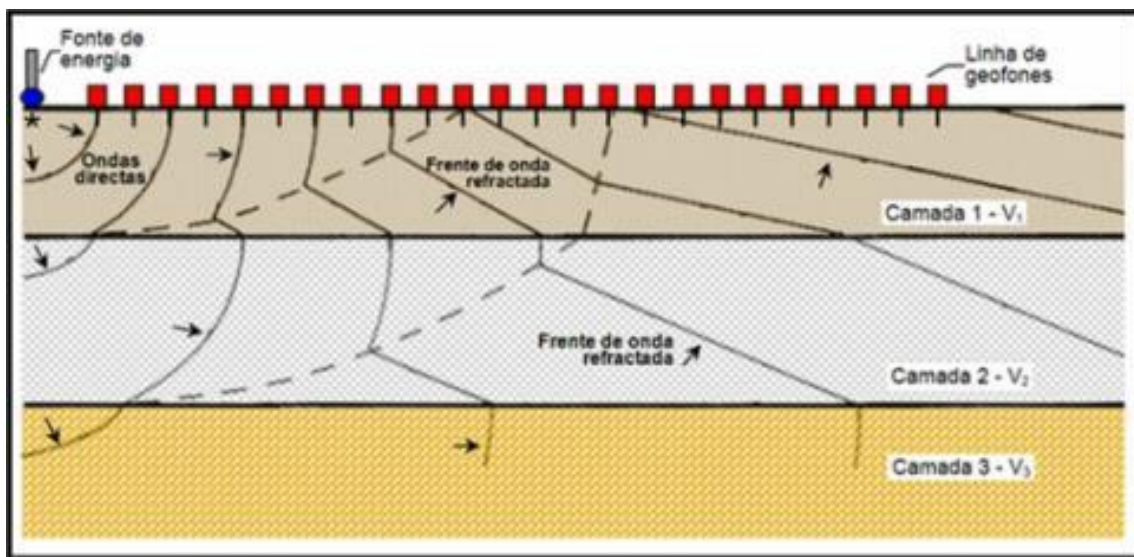


Figura 2.25 - Levantamento de refração sísmica (INEC, 2008).

As primeiras chegadas próximas à fonte de emissão percorrem trajetórias diretamente da fonte ao detector. Caso o material sob interface tem maior velocidade $V_2 > V_1$ (Figura 2.26), os raios que se propagam em V_2 serão os primeiros a chegarem aos hidrofones mais distantes da fonte de emissão.

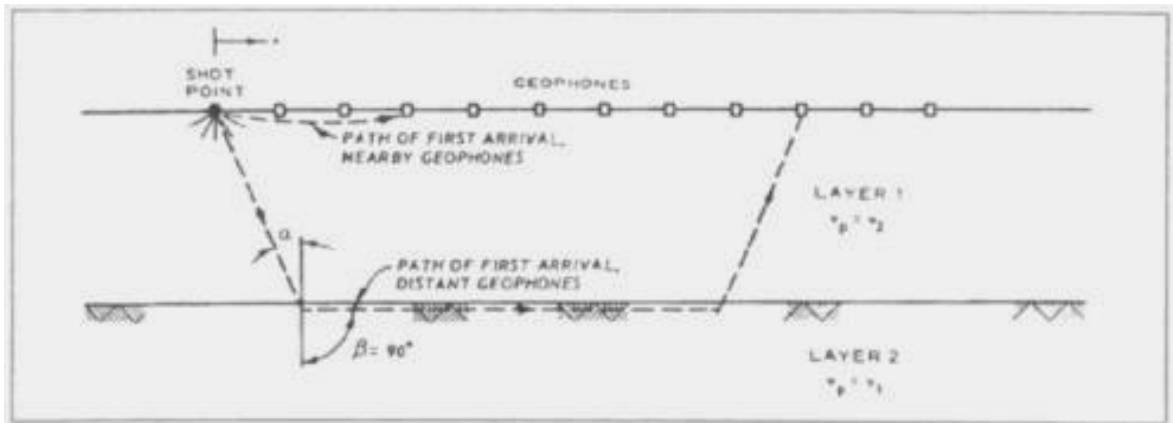


Figura.2.26 - Esquema de refração sísmica (Ferreira, 2002).

As premissas gerais são considerar que a subsuperfície é composta por várias camadas, planamente separadas e possivelmente inclinadas. Além disso, no interior de cada camada as velocidades sísmicas são constantes e aumentam a medida que a profundidade é maior e, finalmente, as trajetórias dos raios são limitadas a um plano vertical que contém a linha de perfil (KEAREY *et al* 2009).

Importante citar, a título apenas de informação, que são estudados, em sísmica de refração, o caso de duas camadas com interfaces horizontais, três camadas com interfaces horizontais, multicamadas com interfaces horizontais, camada inclinada com interfaces planas e interfaces planas falhadas.

2.2.4. SÍSMICA DE REFLEXÃO

É um método de prospecção geofísica que se utiliza dos princípios da sismologia estimando propriedades da subsuperfície Terrestre baseado na reflexão de ondas sísmicas. Necessita da utilização de fonte sísmica (controlada – explosivo por exemplo). Ao determinar-se o tempo que uma onda atinge o receptor, é possível estimar a profundidade dos materiais que geraram a reflexão assemelhando-se ao sonar e à ecolocalização.

As seções sísmicas podem revelar detalhes da estratigrafia em escalas que variam de dezenas de metros até a litosfera como um todo. O profissional poderá apenas realizar boas interpretações se conhecer como o método de reflexão é trabalhado e como são gerados os resultados, como por exemplo, as seções sísmicas (KEAREY *et al* 2009).

É um método extensivamente utilizado na prospecção e estudos de reservas de hidrocarbonetos (petróleo, gás natural) bem como outros recursos como carvão, minérios metálicos e energia geotérmica. Este método é ainda utilizado em estudos básicos sobre a natureza e origem das rochas que compõem a crosta terrestre. Em engenharia a sísmica de reflexão é utilizada em estudos de águas subterrâneas e estudos ambientais (Figura 2.27).

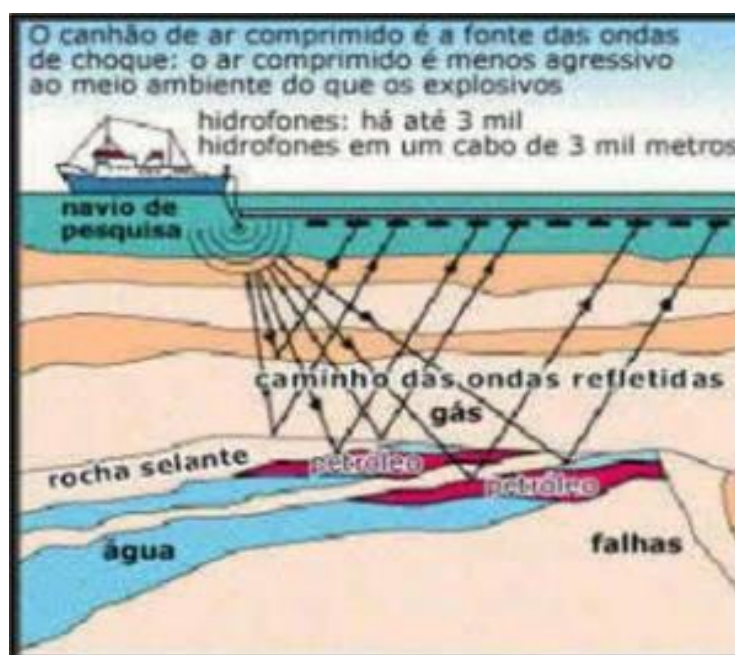


Figura 2.27 - Levantamento de Reflexão Sísmica (CANUTO, 2002)

Segundo Dourado (2007) a sísmica de reflexão vem sendo utilizada intensivamente pela indústria petrolífera graças ao seu poder de resolução, evoluindo a cada ano, constituindo-se por isso em um dos métodos geofísicos mais utilizados. Porém, a utilização em estudos de águas rasas só iniciou realmente à partir do final da década de 70, atrelado ao desenvolvimento tecnológico (micro informática), possibilitando surgimento dos pequenos sismógrafos digitais e sistemas para processamento de sinais sísmicos em micro computadores.

O termo sísmica de reflexão de alta resolução surgiu com o objetivo de diferenciar a sísmica de reflexão convencional utilizada para petróleo da sísmica utilizada para alvos mais rasos e menores (Tabela 2.2), que por isso mesmo precisa ter uma maior resolução. A teoria para a sísmica de reflexão convencional e para a de alta resolução é a mesma, sendo que existe diferença na metodologia de campo e de interpretação.

Tabela 2.2 - Diferenciação entre as sísmicas (Dourado, 2007)

SÍSMICA DE REFLEXÃO		
	Convencional	Alta Resolução
Profundidade de Investigação	De centenas a milhares de metros	Dezenas de metros
Tamanho dos Alvos	Dezenas a centenas de metros	metros

2.2.4.5. Seção Sísmicas

A sísmica de reflexão, da maneira em que foi desenvolvida para ser utilizada pela prospecção petrolífera, é processada para ser interpretada através da seção sísmica sobre o sismograma. Isto representa um largo avanço neste método sísmico pois possibilita a identificação de várias feições estruturais que seriam impraticáveis com a interpretação através do gráfico “tempo x distância” (Dourado, 2007) (Figura 2.28).

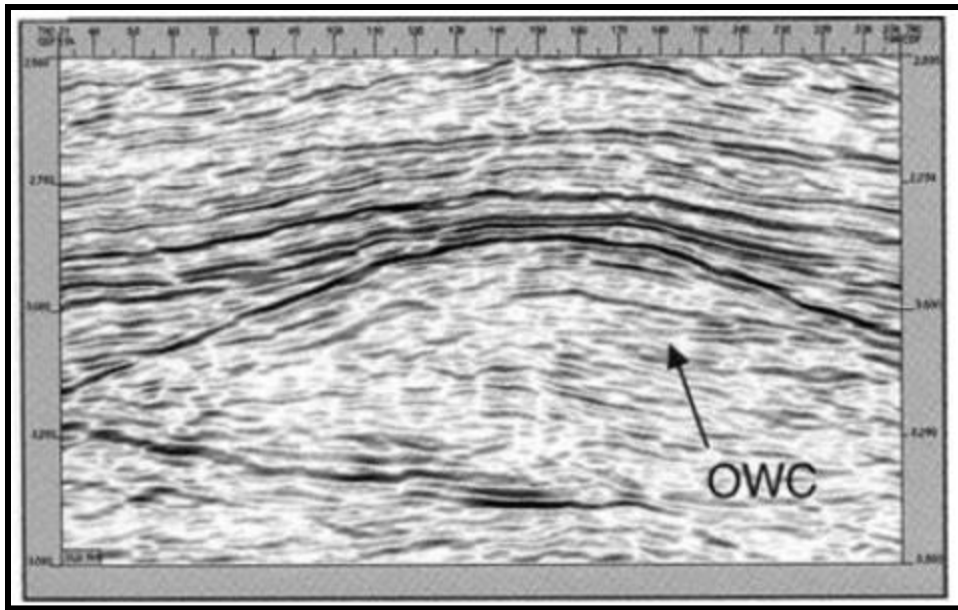


Figura 2.28 - Exemplo de uma seção sísmica sobre sismograma. Neste caso apresenta interpretação de refletor horizontal produzido pelo contato OWC (óleo-água) (KEAREY *et al* 2009, apud JACK, 1997).

A seção sísmica é obtida equiparando-se os sismogramas após serem submetidos a várias correções e processamentos que visam melhorar as feições geológicas estudadas.

Na Figura 2.29 apresenta-se outro exemplo de seção sísmica.



Figura 2.29 - Seção sísmica da Bacia do Acre – imagem em 2D (VALE, 2009).

2.2.5. APLICAÇÕES DE INVESTIGAÇÕES DE SUBSUPERFÍCIE

Nos projetos de construção de portos, dragagens e derrocagens, aprofundamento de canal de acesso e estudos submersos entre outros, cada vez mais as investigações de subsuperfície, utilizando os levantamentos hidrográficos, tem sido empregadas como fonte de informações valiosas e complementares que somente aquelas geradas pelos métodos tradicionais como sondagens, testemunhagens ou amostragens.

Para Souza (2011) são muitas as razões que demandam investigações complementares desta natureza, entre outras, tais como:

- Estudar e conhecer a geologia submersa extrapolando o conhecimento geológico continental;
- Necessidade de buscar recursos minerais;
- Estudar rios e reservatórios do ponto de vista da navegação comercial e do abastecimento de água;
- Estudar e conhecer estes ambientes no suporte aos projetos de engenharia;
- Interesses arqueológicos.

As áreas costeiras são constituídas de ambientes complexos e representam a interface: atmosfera, continente e oceano. Na Geologia o substrato que as compõe foi originado nas oscilações do nível dos oceanos e mares no Quaternário. Tem-se complexa interdigitação de camadas sedimentares argilosas e arenosas, impondo sobremaneira análises investigativas detalhadas na necessidade de ocupação destes ambientes (Souza, 2008).

Os agentes climatológicos e oceanográficos promovem grandes e variadas modificações ao longo do tempo que, juntamente com as interferências humanas levam a grandes modificações na estratigrafia costeira, em sua maioria danosas e com a necessidade de medidas mitigadoras de engenharia (molhes e quebra-mares por exemplo) nem sempre construídos com técnicas e normas consagradas de execução, podendo, neste caso, acrescentar mais prejuízos aos ambientes costeiros.

Nas intervenções de engenharia neste tipo de ambiente são imprescindíveis estudos oceanográficos, geológicos e geotécnicos com intuito de mapear toda área de abrangência apontando sua caracterização física e estrutural da região de estudo.

Segundo Souza, 2006, os métodos geofísicos em áreas submersas destacam-se por que:

- Possibilitam fácil acesso a área de estudo, em contraposição ao terrestre que em muitos casos é dificultado;
- Permitem observação abrangente e contínua da área de estudo (as sondagens são pontuais);
- Permitem rápida observação;
- Não são destrutivos e não são poluentes;
- Possibilitam a caracterização da área de estudo;

Em todos os métodos geofísicos existentes, o sísmico se destaca por oferecer precisão, resolução e penetração, com os perfis contínuos encontrados equiparados aos geológicos por sua semelhança entre seções (Souza, 2006).

Segundo Souza, 2006, a sísmica de áreas submersas pode ser dividida em rasa e profunda. A investigação em questão refere-se a primeira (rasa) servindo de subsídios para engenharia e geologia básica rasa (mapeamento) com ainda duas subdivisões: superfície e de subsuperfície, apontando a primeira à caracterização geológica (afloramentos rochosos e feições sedimentares/estruturais).

A (Figura 2.30) apresenta a compartimentação sísmica de ambientes submersos rasos, cruzando características de diversos tipos de fontes e suas peculiaridades (Souza, 2008, apud Souza, 2006).

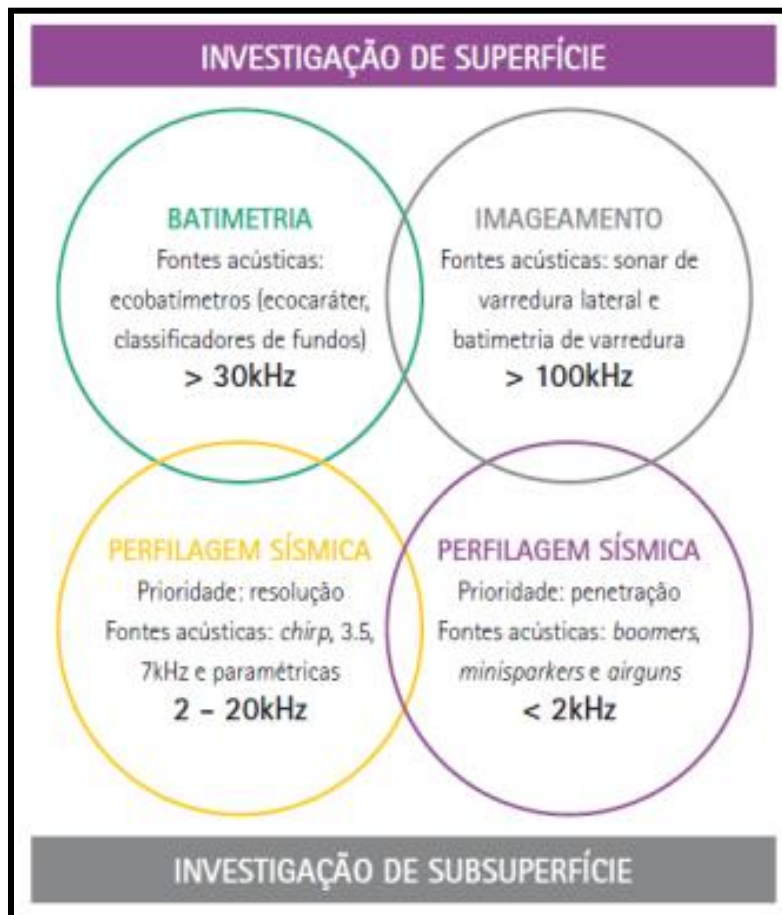


Figura 2.30 - Compartimentação de ambientes submersos rasos (Souza, 2008).

O tipo de fonte acústica a ser utilizada nos diversos projetos ainda é pauta de discussão na comunidade geofísica, muito embora os vários métodos geofísicos estejam bem consolidados quando se trata de projetos onde se faz necessário a investigação de áreas submersas.

Para Souza, 2011, entende-se que área submersa rasa - rios, lagos, reservatórios e áreas costeiras (plataforma continental interna), são ambientes onde a espessura da coluna de água raramente ultrapassa 100 m.

A geofísica em área submersas rasas utiliza equipamentos de menor porte quando comparados aos equipamentos utilizados nas campanhas de investigação do petróleo (normalmente *off shore*) em função das grandes diferenças de dimensões estudadas. (Figura 2.31 e 2.32)



Figura 2.31 - Sonar de Varredura Lateral - Side Scan Sonar 1 (Brasil, 2012)



Figura 2.32 - Sonar de Varredura Lateral - Side Scan Sonar 2 (Brasil, 2012).

Segundo Montini (2012), no passado a batimetria era muito limitada. As medições eram realizadas com varas ou longas cordas delimitadas por nós ou braços, caracterizando metodologia pouco eficiente. Nos dias atuais conta-se com o Sonar (*Sound Navigation and Ranging*), desenvolvido para detectar submarinos, baseando-se num emissor de ultra-sons (ondas de alta frequência) acoplado a um receptor de som na embarcação.

O som “viaja” pela água, reflete na superfície submersa ou em qualquer obstáculo/corpo, retorna sendo captado pelo receptor. O receptor registra a variação de tempo entre a emissão e a recepção calculando a distância entre a embarcação e o objeto, emitindo assim as cotas das diversas profundidades ao longo da campanha de estudo.

A marinha do Brasil em 2012 apresentou resultados da batimetria realizada na área deste estudo. Nota-se perfeitamente (Figura 2.33) o canal de acesso e bacia de evolução, definidas nestes levantamentos batimétricos. As cotas mais rasas tendem ao laranja, sendo que as mais profundas tendem ao Azul.

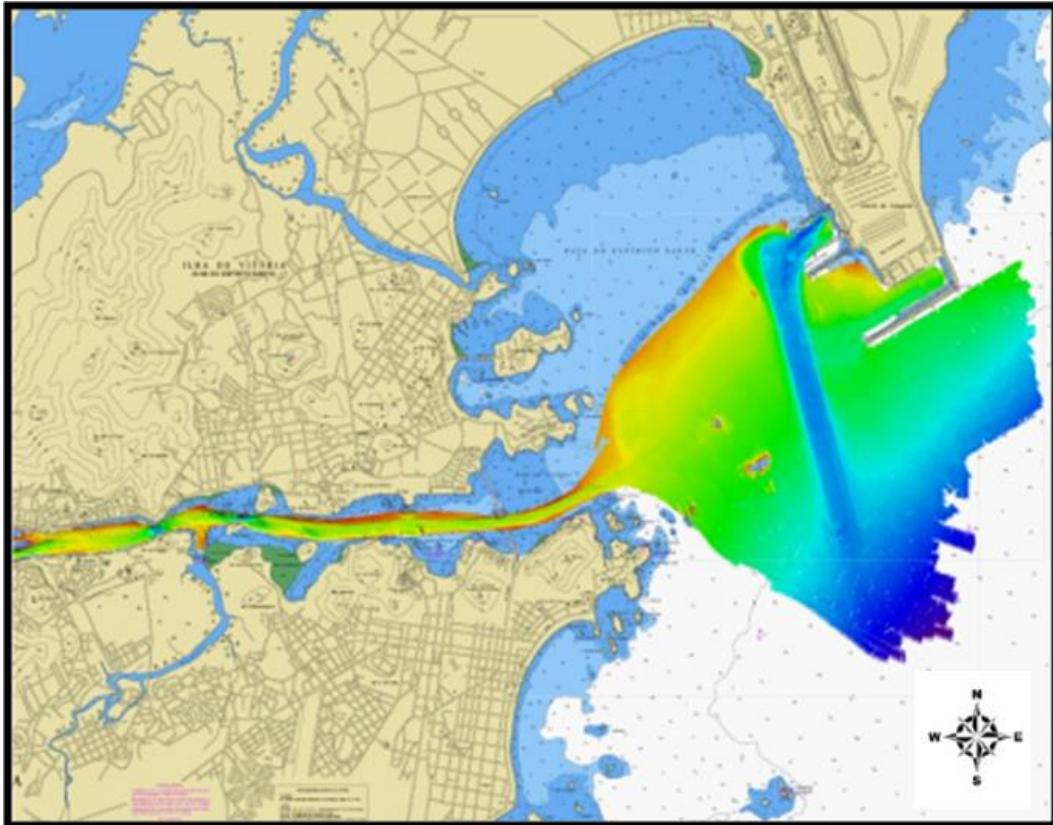


Figura 2.33 - Porto de Vitória, Tubarão e Praia Mole obtidas através de batimetria (Marinha do Brasil, 2012)

Em projetos de pontes, túneis, dutos, portos e barragens, o conhecimento da espessura sedimentar para cubagem de material (dragagem e embasamento rochoso) são alguns exemplos de projetos que necessitam de levantamentos desta natureza.

Para estes casos dados de apenas classificação ou caracterização geológica da superfície de fundo não atendem ao projeto. Pensando nisto, se destacam os métodos sísmicos descritos, utilizando fontes acústicas (*boomers*, *sparkers*, 3,5k Hz e *chirps* entre outras), que emitem sinais acústicos com espectros de frequências inferiores a 30 kHz (efetivamente, inferiores a 15 kHz).

2.3. INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

2.3.1. SONDAGEM MISTA

É o tipo de sondagem utilizada quando há existência de material rochoso sob material terroso no local onde será executada a campanha. Inicia-se com a sondagem à percussão (em solo) até atingir 50 golpes para 30 cm cravados, no ensaio SPT, partindo-se daí, portanto, a perfuração com a sondagem rotativa.

A sondagem à rotativa objetiva obtenção de testemunhos rochosos para reconhecimento e análises, através de sondas dotadas de brocas adiamantadas, cujos diâmetros em geral variam de 2 a 10 cm e possuem elevada velocidade de penetração permitindo avanço rápido na sondagem (Caputo, 1988).

2.3.2. AMOSTRAGEM SHELBY

Seu objetivo é preservar as características físicas do solo para realização de ensaios em laboratório, permitindo e simulando parâmetros geotécnicos idênticos ao encontrado “in situ”. O amostrador é fabricado com de um tubo esbelto de latão ou de aço inoxidável fixado a um cabeçote que contém uma válvula de esfera possibilitando as saída do ar e da água durante a cravação/penetração. Este tipo de amostrador foi introduzido nos Estados Unidos da América em 1930 (Soares, 1997 apud Hvorslev, 1949).

2.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

2.4.1. GRANULOMETRIA

Para Caputo (1988) os solos, segundo as dimensões das suas partículas e em determinados limites, recebem determinações de frações de acordo com a escala granulométrica.

O ensaio por peneiramento é utilizado principalmente para a determinação das frações mais grossas da amostra como o pedregulho e as areias utilizando-se o peneirador mecânico (Figura 2.34). A norma que fala sobre a Granulometria Conjunta é NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica.



Figura 2.34 - Exemplo de peneirador mecânico utilizado para se obter a classificação granulométrica dos solos (Fernandes, 2010)

A análise granulométrica é representada graficamente pela Curva Granulométrica (Caputo, 1988) (Figura 2.35). O Resumo da granulometria pode ser representado conforme (Figura 2.36).

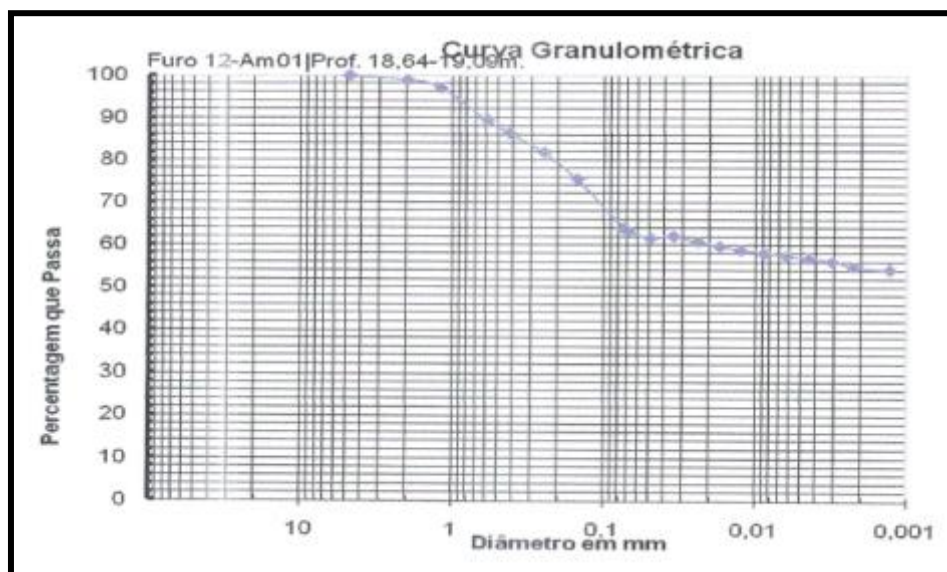


Figura 2.35 - Exemplo de Curva Granulométrica utilizada neste projeto. A curva acima refere-se ao Furo 12, amostra 01 coletada na profundidade entre 18,64 m e 19,09 m (Relatório no 88 da MecSolos Engenharia, 2011)

RESULTADOS		
PENEIRAS		PORCENTAGEM QUE PASSA (%)
DESIGNAÇÃO ABNT	ABERTURA NOMINAL (mm)	
-	50	-
-	38	-
-	25	-
-	19	-
-	9,5	-
ABNT Nº 04	4,8	100,00
ABNT Nº 10	2,0	98,96
ABNT Nº 16	1,2	97,13
ABNT Nº 30	0,6	89,56
ABNT Nº 40	0,42	86,37
ABNT Nº 60	0,25	81,89
ABNT Nº 100	0,15	75,51
ABNT Nº 200	0,075	64,18

RESUMO DA GRANULOMETRIA	
Pedregulho Grosso	- %
Pedregulho Fino	- %
Areia Grossa	01,04 %
Areia Média	12,59 %
Areia Fina	22,18 %

2.36 - Exemplo dos resultados de Granulometria utilizada neste projeto. O refere-se ao Furo 12, amostra 01 coletada na profundidade entre 18,64 m e 19,09 m (Relatório no 88 da MecSolos Engenharia, 2011)

As partículas, no Brasil, segundo a ABNT NBR 6502/95, de acordo com seu tamanho, podem ser classificadas segundo (Tabela 2.3) como:

Tabela 2.3 - Classificação dos solos de acordo com sua granulometria (ABNT NBR 6502/95).

Classificação	Diâmetro dos Grãos
Argila	Menor que 0,002 mm
Silte	Entre 0,06 e 0,002 mm
Areia	Entre 2,0 e 0,06 mm
Seixo	Maior que 2,0 mm

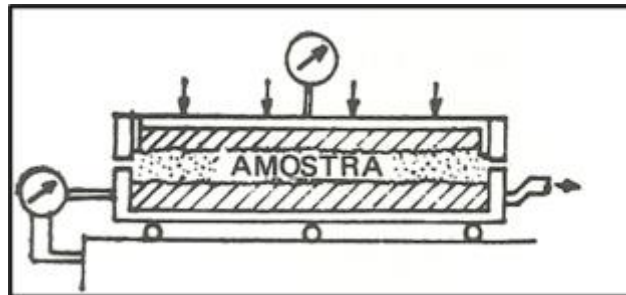
2.4.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS

O Ensaio de Cisalhamento Direto surgiu com o intuito de descobrir qual é a Tensão de Cisalhamento que existe, sob uma tensão Normal, que consiga quebrar a amostra de solo, a qual está dentro de uma caixa com duas partes deslocáveis. O ensaio poderá ser executado sob “tensão controlada” ou “deformação controlada” (Caputo, 1988). Os equipamentos utilizados para realizar esse tipo de ensaio, são: Máquina de cisalhamento direto, estufa, talhador, caixa de cisalhamento, cápsulas e balança (Figura 2.37).



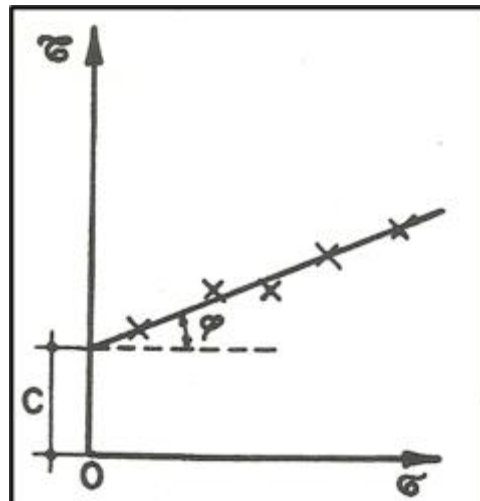
Figura 2.37 - Equipamento do ensaio de cisalhamento direto (DNIT, 2013)

Este ensaio determina, sob uma tensão normal “ σ ”, qual é a tensão cisalhante “ $\tau = \tau_r$ ” que provocará ruptura no corpo de prova inserido em uma caixa com duas partes deslocáveis entre si (Caputo, 1988). Há duas pedras porosas (superior e inferior) que permitem o escoamento da água (Figura 2.38).



2.38 - Esquema ilustrando o corpo de prova de solo entre duas pedras porosas para drenagem da água (Caputo, 1988).

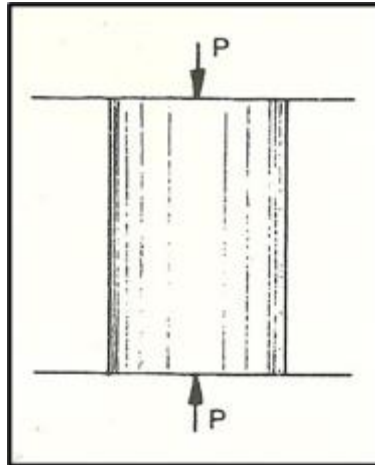
Quando são ensaiadas várias amostras de solos, obtém-se um conjunto de pares de valores para “ σ ” e “ τ ” que lançados em um sistema de coordenadas cartesianas (Figura 2.39) possibilitam obter-se a coesão “ c ” e o ângulo de atrito “ ϕ ” (Caputo, 1988).



2.39 – Gráfico “ σ x τ ” para obtenção da coesão e ângulo de atrito do solo estudado (Caputo, 1988)

2.4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM ROCHAS

Segundo Caputo (1987), a resistência à compressão simples em rochas é determinada medindo-se a carga de ruptura “P” aplicada em corpos de prova isentos de defeitos e trincas (Figura, 2.40).



2.40 - Esquema de aplicação da carga de compressão "P" em testemunhos em rochas (Caputo, 1987).

Para “A” como área da seção transversal da amostra, tem-se a resistência à compressão segundo expressão abaixo:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

Os maciços rochosos apresentam-se com planos de estratificação, fraturas, diáclases e outros planos de menor resistência. O valor real de “R_c” dependerá da inclinação das forças atuantes em relação a estes planos. A maior resistência será observada aos esforços que sejam normais a estes planos. Sabe-se também que quanto mais elevada a porosidade da rocha menor será a resistência da mesma (Caputo, 1987).

2.4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (COMPRESSÃO DIAMETRAL)

Segundo Falcão (2002) o Ensaio Brasileiro de Compressão Diametral, que objetiva determinar indiretamente a resistência à esforços de tração, foi criada pelo Professor Lobo Carneiro (Carneiro, 1943). Sua aplicação se dá através de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico gerando, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro.

Para Soares (2002) a popularidade deste ensaio não está somente na facilidade e rapidez na sua realização, mas também na utilização do mesmo corpo-de-prova para obtenção da resistência à compressão.

A sequência de realização do ensaio consiste em:

- 1) Inserir o corpo-de-prova no equipamento de forma que repouse sobre o “prato” da máquina de compressão;
- 2) Acertar o equilíbrio e estabilidade do corpo-de-prova através da compressão dos pratos no mesmo;
- 3) Aplicar carga continuamente, sem choques, com elevação constante da tensão de tração e velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s até ruptura da amostra (Figura 2.41).



Figura 2.41 - Esquema da disposição do corpo de prova (seção cilíndrica) no ensaio de resistência à tração por compressão diametral da amostra R8 do Furo 14 realizado neste projeto (Relatório no 144 da MecSolos Engenharia, 2011)

A resistência à tração por compressão diametral “ R_t ” é calculada pela seguinte expressão (Caputo, 1987):

$$R_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (2.9)$$

Onde “ P ” é a carga e “ D ” e “ L ” as dimensões da amostra, respectivamente diâmetro e comprimento (Figura 2.42).



2.42 - Tensões de tração induzidas (Caputo, 1987).

Os resultados do ensaio são compilados em uma planilha eletrônica para consolidação dos relatórios finais (Figura 2.43).

RESULTADOS					
CP N°.	Identificação	Diâmetro Médio (cm)	Altura (cm)	Carga (Kgf)	Resistência (MPa)
01	F6/R1	10,99	20,12	250	0,7
02	F6/R2	10,98	20,13	2100	6,1
03	F6/R3	10,91	20,11	23450	10,0
04	F8/R1	10,94	20,42	4700	13,4
05	F8/R2	11,04	20,52	4650	13,1
06	F8/R3	11,10	19,83	2550	7,4
07	F8/R4	10,95	20,29	3100	8,9
08	F8/R5	10,92	20,24	2200	6,3
09	F8/R6	11,07	19,99	2050	5,9
10	F8/R7	10,97	20,23	450	1,3
11	F10/R1	10,96	20,47	150	0,4
12	F12/R1	10,88	19,99	250	0,7
13	F14/R8	12,14	19,84	150	0,4
14	F14/R1	11,15	20,11	1700	4,8
15	F14/R2	10,91	20,22	2100	6,1

2.43 - Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral de todas as amostras retiradas neste projeto (Relatório no 144 da MecSolos Engenharia, 2011)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. GEOFÍSICA DE REFRAÇÃO APLICADA

A aplicação da Geofísica de Refração em ambientes aquosos não é simples e requer equipamentos específicos, cuja mobilização é de custo elevado. Esta técnica possibilita a medição da velocidade das ondas sonoras em variadas estratigrafias da subsuperfície analisada, devida às frequências e princípios físicos utilizados, sendo perfeita para investigações de substratos rochosos. Sua comparação com a sísmica de reflexão é eficaz na geração de um modelo de subsuperfície muito parecido com a realidade.

Por não existir um sistema operacional comercial e dependendo das condições do local e dos requisitos do projeto, a adaptação e a configuração do sistema considera o número e espaçamento de sensores, deslocamento entre a fonte e o primeiro sensor, pressão de combustão operacional e volume de câmara de ar, bem como as operações de superfície ou submarinas.

A refração sísmica possibilita a interpretação da dureza ou da densidade do material, assim como a pesquisa com refração também estabelece boa referência sobre a profundidade das superfícies, mas em menor escala que a reflexão.

Neste projeto foram utilizados dados geodésicos necessários para o referenciamento dos estudos, bem como dados de projeção de mapas listados na (Figura 3.1) a seguir.

PARÂMETROS GEODÉSICOS	
Elipsóide	WGS 84
Semi eixo maior (a)	6 378 137m
Achatamento inverso (1/f)	298,257
Parâmetros de projeção	
Nome da grade	UTM (Sul) 24
Tipo de projeção	Universal Transverso de Mercator
Latitude de origem	0° 0' 00"S
Meridiano central	39° 00' 00"W
Leste (easting) falso	500 000 m
Norte (northing) falso	10 000 000 m
Fator de escala no Meridiano Central	0,9996
Unidades	Metros

3.1 - Parâmetros geodésicos e de projeto (Dragabrás, 2011)

O levantamento foi realizado com o auxílio de embarcação equipada com posicionamento DGPS, englobando navegação via satélites a um rádio-modem ou telefone GSM, a fim de obter correções instantâneas, computadores de navegação e uma ecossonda de monofeixe. Como a operação requer reboque e arrasto em profundidade, uma estrutura em forma de “A” e um guincho foram adaptados ao navio.

Após as adequações técnicas necessárias, a fonte de refração sísmica e o cabeamento sismográfico foram rebocados pela embarcação. O *layback* foi ajustado pelo guincho de bordo e sua distância medida por uma roldana de contagem conectada com *software* de aquisição de dados (NaviPac).

Instalou-se o DGPS no topo da haste de ecossonda de feixe único (Figura 3.2) evitando-se, desta forma, grandes obstruções (máscaras de satélites). Foi instalado um marégrafo na embarcação a fim de precisar e corrigir os valores da maré, compensando eletronicamente e automaticamente as diferenças, além de duas antenas adicionais de GPS para fornecer direção adicional do posicionamento da embarcação.

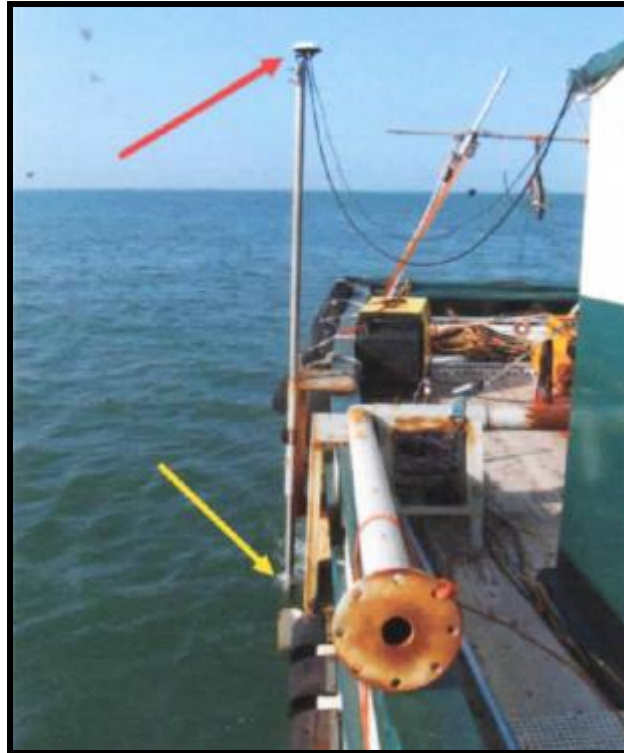


Figura 3.2 - Antena de GPS (seta vermelha) no topo da haste com transdutor SBES - ecosonda de feixe único (seta amarela) (Dragabrás, 2011)

A ecosonda utilizada para controle vertical posicional do sistema foi a Odom Echotrac de dupla frequência, sendo acoplada na mesma haste do transdutor SBES a estibordo da embarcação e calibrada diariamente pela equipe da pesquisa.

A cota de profundidade na área estudo varia entre 6 m e 26 m e, em função desta condição, a pistola de ar comprimido e o cabo sismográfico devem ser rebocados o mais próximos possível do fundo do oceano a fim de obter uma resolução vertical razoável, optando-se, portanto, na utilização de reboque profundo.

Os equipamentos instalados na embarcação foram:

- Cilindros de ar comprimido que permitiram a fonte sísmica através das pistolas de ar, mangueiras de ar e manômetros;
- Adaptação do equipamento de guincho para reboque;
- Adaptação e instalação da estrutura de suporte com bloco de polia (roldana de contagem) (Figura 3.3);



Figura 3.3 - Roldana de contagem instalada na estrutura em "A"
(Dragabrás, 2011).

- Instalação do cabo sismográfico pertencente aos hidrofones (24 hidrofones, espaçados de 2m) e da pistola de ar com testes livres de compressão;
- Preparação dos cabos disparadores, mangueira de ar, cabo sísmico e cabo auxiliar;
- Testes e calibração/instalação dos sensores auxiliares: exemplo altímetro;
- Preparação e adaptação do computador de aquisição dos dados, caixa de acionamento e interface;
- Parametrização *Sismo G-Tec* (captura dos dados sísmicos) e do *PositiV G-tec* (*display* vertical);
- Testes do *layback* entre a fonte sísmica e o primeiro hidrofone para evitar a sombras/quebras de refração do cabo sismográfico;
- Refinamento de flutuação cabo sismográfico;

Como parte do procedimento de refração sísmica, a fonte de emissão sonora e o cabo sismográfico foram rebocados atrás da embarcação, onde os dados são capturados no NaviPac convertendo as coordenadas de latitude e longitude, apontadas pelo GPS, calculando e exibindo a localização dos equipamentos (pistola de ar comprimido, embarcação, primeiro hidrofone, etc.).

O PositiV e o Sismo, recebem do NaviPac uma seqüência de dados náuticos, como por exemplo, a localização aproximada do sísmico. O Sismo comanda e coordena o trabalho da pistola de ar comprimido (intervalo de 25 m), seu registro e sua exibição para que o PositiV visualize *on-line* todos os sensores, fornecendo informações verticais (SBES, altímetro e sensor de pressão) e mapeamento automático de dados sísmicos.

3.2. GEOFÍSICA DE REFLEXÃO APLICADA

A reflexão sísmica (alta resolução) é comumente executada em ambientes costeiros e marinhos objetivando investigar a morfologia do fundo, distribuição das camadas sedimentares em subsuperfície, a paleogeografia do ambiente, a espessura sedimentar, entre outros.

O método fundamenta-se na geração de ondas sísmicas a se propagarem com velocidades diferenciadas dependendo das propriedades físicas das rochas e dos sedimentos, refletindo e/ou refratando com variação de impedância acústica (produto da velocidade e densidade do material), também conhecido como refletor sísmico, onde superfícies naturais (causadores da reflexão sísmica) são geralmente associadas às modificações no aspecto físico da rocha ou da camada sedimentar.

Foi utilizada uma fonte sísmica de alta resolução, sendo o dado sísmico adquirido em formato digital (SEG-Y), com posicionamento simultâneo por meio de um sistema DGPS conectado ao software de aquisição sísmica (Figura 3.4). Ao todo, foram realizadas 313 linhas ao longo da área de projeto, totalizando 314,6km sondados e mapeando uma área de 1.681.548m² ou 168.15ha.

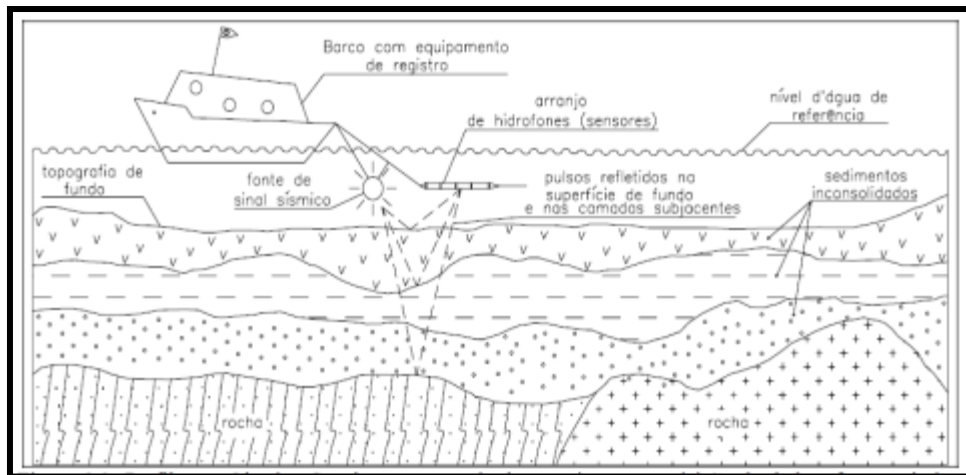


Figura 3.4 - Exemplo de perfilagem sísmica (Souza, 1988 apud Souza, 2006).

A interpretação dos dados obtidos está na identificação dos principais refletores sísmicos e na mensuração de suas profundidades, as quais geraram mapas de isópacas relacionados à espessura dos horizontes sedimentares limitados pelos refletores mapeados (Figura 3.5).

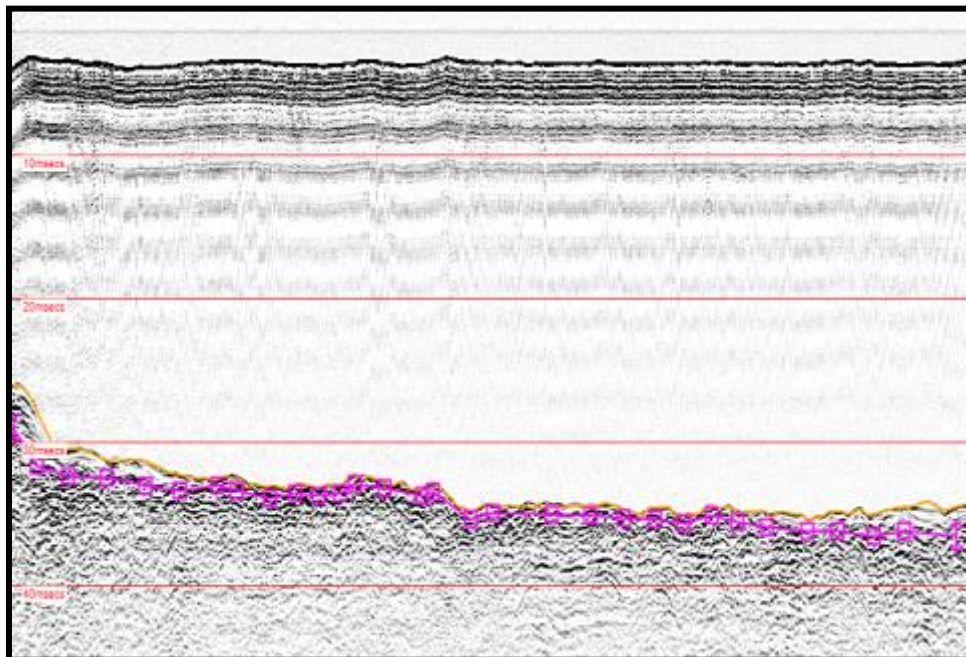


Figura 3.5 - Perfil sísmico exibindo o pacote sedimentar a ser dragado, limitado pelo fundo marinho (laranja) e pelo refletor forte (rosa) (UMISAN, 2011).

Na pesquisa de “campo” foi mobilizado um perfilador sísmico da marca *Applied Acoustics*, modelo AA301 (Figuras 3.6 e 3.7), que consiste em uma fonte impulsiva de baixa frequência, emitindo pulsos com espectro de frequência entre 500Hz e 5kHz. A saída do equipamento é de 700J/s calibrado para emitir 1 pulso de 200J a cada 250ms totalizando 4 disparos por segundo.



Figura 3.6 - Fonte sísmica da Applied Acoustics utilizada na pesquisa (Applied Acoustics, 2012).



Figura 3.7 - Fonte sísmica acoplada rebocada (UmiSan, 2011).

No georeferenciamento foi utilizado um receptor DGPS modelo TECHGEO, operando via banda L, sinal Oministar, que possibilitou precisão horizontal dinâmica submétrica.

Foi utilizado para navegação *notebook* dotado de *software* de navegação *Hypack* (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Notebook para navegação ao longo das linhas de sondagem, bem como monitor para os dados sísmicos do sistema de aquisição (UmiSan, 2011).

Os dados foram adquiridos e plotados no *software Coda Survey Engine* sendo processados, interpretados e apresentados mapas de isópacas.

3.3. INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

3.3.1. CAMPANHA DE 1970

Esta campanha foi estimulada pelas necessidades na época de expansão do porto, a fim de proporcionar o aumento da capacidade de carregamento de minério de ferro. O plano inicial envolvia a dragagem para alargar e aprofundar o canal existente e bacia de evolução do mesmo, bem como estudos para construção de novo Pier de embarque de minério de ferro.

O canal e o porto foram dragados na profundidade de 17 metros e 16 metros, respectivamente, em 1967. As premissas daquela campanha já previam considerar aprofundar o canal e o porto para 27m, com alguns furos de sondagem chegando a -53m, possibilitando desta forma a proposição do Modelo Geológico para intervenções futuras a partir da cota de -25m. O principal objetivo daquela pesquisa foi o de fornecer dados de campo (solo e rocha) que condicionaram a dragagem àquela época proposta.

A necessidade de resgatar os furos desta campanha foi de aprimorar as leituras da estratigrafia do solo da subsuperfície da campanha de 2011. Esta campanha contemplou apenas 14 furos (7 locais com 2 furos gêmeos em cada) e, assim mesmo, nenhum no interior da bacia e canal de acesso devido ao tráfego intenso de navios no Porto.

Somente com os furos da campanha de 2011, seria muito impreciso propor um Modelo Geológico devido a falta de maiores informações daquela litologia, tornando-se um Modelo com elevado grau de incertezas.

O programa de perfuração realizado pela empresa McLelland a época incluiu 84 perfurações no canal, bacia e áreas adjacentes, como mostrado na (Figura 3.9).

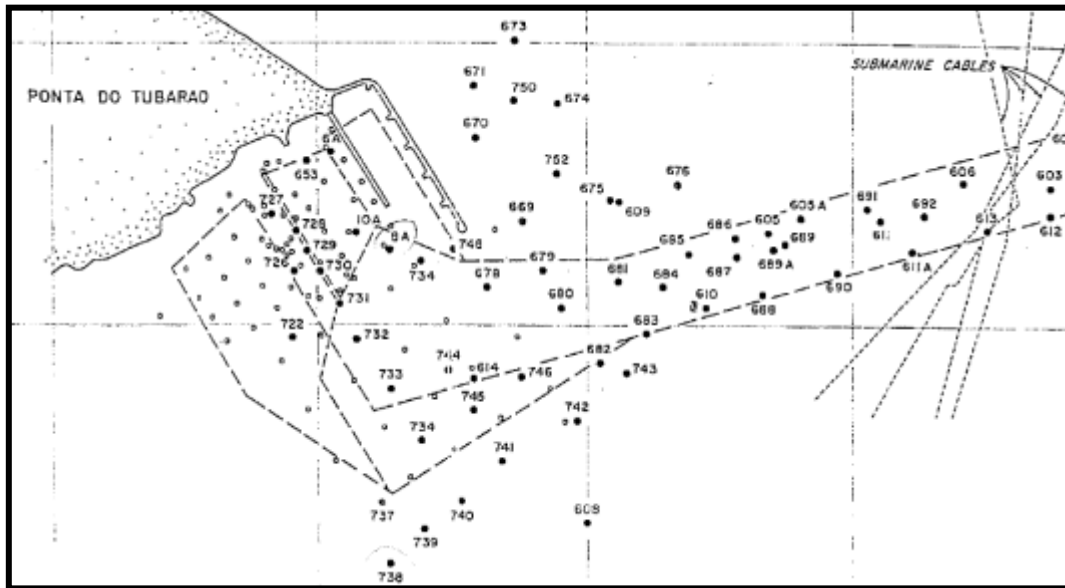


Figura 3.9 - Mapa geral dos furos de sondagem em 1970 (McLelland, 1970)

Os resultados dos furos da campanha de 1970 foram compilados nos boletins de sondagem datilografados e em língua inglesa (Figuras 3.10 e 3.11) e serviram de embasamento para montagem do Modelo Geológico proposto. São exemplificados os boletins dos furos 680, 681, 732 e 733 pertencentes à Área de Estudo.

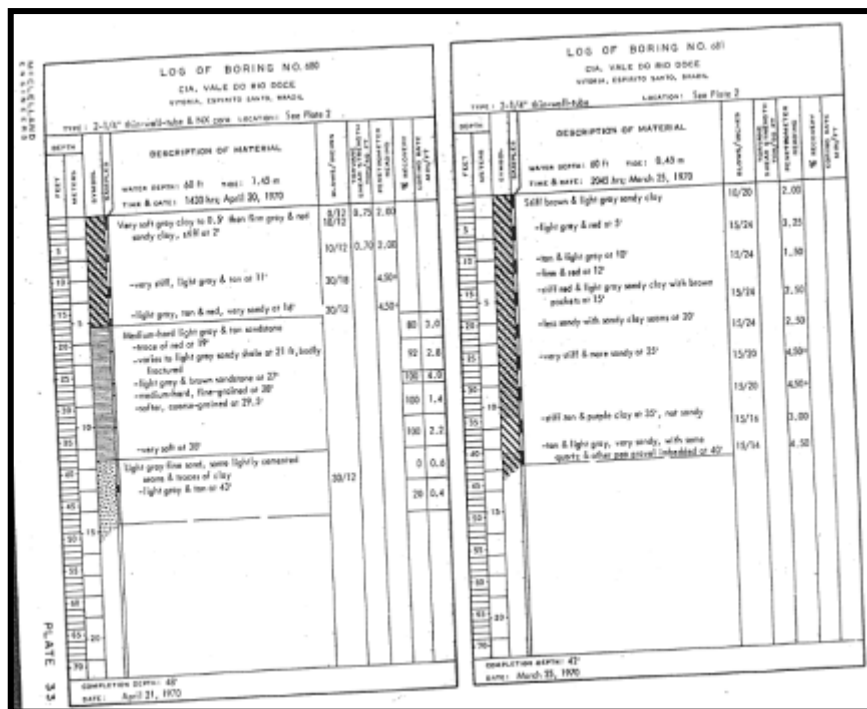


Figura 3.10 - Exemplo de boletim realizado em 1970 (McLelland, 1970).

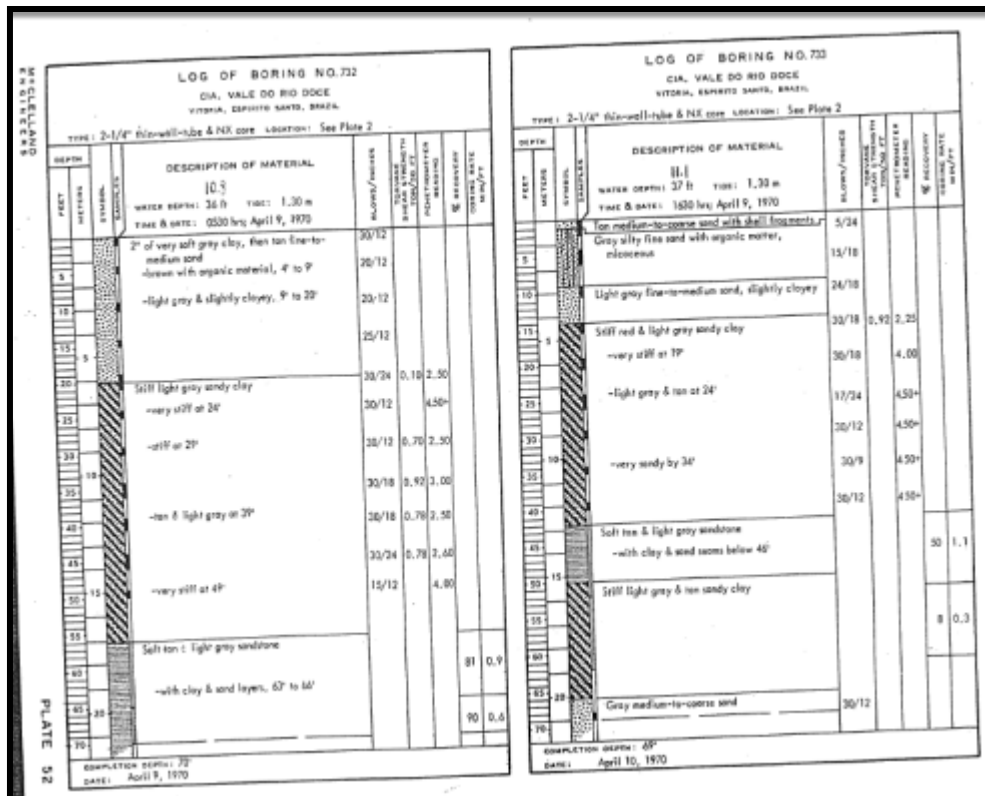


Figura 3.11 - Exemplo de boletim realizado em 1970 (McLelland, 1970).

Para proposição do modelo, foram traduzidos fielmente 78 boletins de sondagens (inseridos no canal e bacia) daquela época e transformados em planilhas eletrônicas, necessárias para inserção e alimentação do *software* utilizado (Figura 3.12).

	A	B	C	D	E	F	G
	Identificação do Furo	Maré (m)	Profundidade da água (m)	De (m)	Até (m)	Espessura da Amostra (m)	Classificação Visual
1							
2	733	1,3	11,27	0,00	9,97	9,97	Lâmina d'água
3	733	1,3	11,27	9,97	10,27	0,30	Areia amarelada clara, fina a grossa, possuindo fragmentos de conchas
4	733	1,3	11,27	10,27	13,02	2,74	Areia fina cinza lodosa com matéria orgânica, micáceo
5	733	1,3	11,27	13,02	14,54	1,52	Areia cinza clara, fina a média, ligeiramente argilosa
6	733	1,3	11,27	14,54	23,08	8,53	Argila arenosa rígida, vermelha e cinza clara: - Muito dura em 5,8 metros; - Cinza claro e amarelada a 7,3 metros; - Muito arenoso em 10,36 metros. Arenito mole, amarelado e cinza claro:
7	733	1,3	11,27	23,08	25,51	2,44	- Com argila e fissuras de areia abaixo de 14 metros
8	733	1,3	11,27	25,51	30,09	4,57	Argila arenosa rígida cinza claro e amarelada
9	733	1,3	11,27	30,09	31,00	0,91	Areia cinza média a grossa
10	731	0,5	10,67	0,00	10,17	10,17	Lâmina d'água
11	731	0,5	10,67	10,17	10,63	0,46	Argila cinza muito mole em 15 cm, em seguida areia amarelada fina a média com fragmentos cinza e lodosa de 30,48 cm a 45,72 cm. Argila arenosa cinza clara firme: - Com bolsões de areia de 1,22 metros a 1,83 metros;
	731	0,5	10,67	10,6272	19,9236	9,2964	

Figura 3.12 - Exemplo da planilha eletrônica utilizada para consolidar todos os furos traduzidos da campanha em questão.

A planilha de alimentação do programa foi definida com os seguintes *inputs*:

- **Identificação do furo** – respeitada a nomenclatura adotada na época;
- **Maré (m)** – leitura da tábua de marés no momento do furo. Informação consta no boletim de sondagem;
- **Profundidade da água (m)** – medida até o fundo do leito marinho descontando a variação da maré na hora da sondagem (definido como Lâmina d'água);
- **De (m)** – onde os materiais encontrados na sondagem iniciam;
- **Para (m)** – onde os materiais encontrados na sondagem terminam;
- **Espessura da Amostra (m)** – é a diferença encontrada nas colunas “de” e “até”;
- **Classificação visual** – descrição dos materiais encontrados nas sondagens;
- **Sigla** – definida conforme materiais encontrados, por exemplo, se foi encontrado argila arenosa rígida sua sigla ficou ARG. Caso haja interesse de informações mais detalhadas da litologia encontrada, bastará consultar a planilha nos anexos;

3.3.2. CAMPANHA DE 2011

A campanha de sondagem de 2011 foi realizada com intuito de aprofundar as informações obtidas na Geofísica realizadas no mesmo período. O objetivo principal foi a dragagem do canal de acesso e bacia de evolução para permitir acesso aos navios da classe Valemax, os maiores mineraleiros do mundo.

As amostras de materiais foram obtidas da seguinte maneira:

- Testemunhos completos em rochas;
- Amostras deformadas por ensaios SPT;

- Amostras indeformadas do tipo Shelby;

Estas amostras foram enviadas aos laboratórios de solos para as seguintes análises:

- Granulometria por peneiramento – NBR 7181/84
- Sedimentação - NBR 7181/84
- Umidade – Anexo da NBR 6457/86
- Limites de Plasticidade – NBR 7180/84
- Limites de Liquidez – NBR 6459/84
- Cisalhamento Direto - ASTM D3082-79
- Ensaio Triaxial Adensado Não Drenado nas amostras Shelby - ASTM D – 2850 (norte-americana) e BS 1377 – 90 (britânica)

As sondagens geotécnicas não foram possíveis de serem realizadas no canal de acesso e bacia de evolução face ao grande fluxo de navios que acessam o Porto de Tubarão. Isto implicaria em atrasos nas atividades portuárias impactando sobremaneira as metas de embarque e desembarque estabelecidas para o ano. (Figura 3.13).

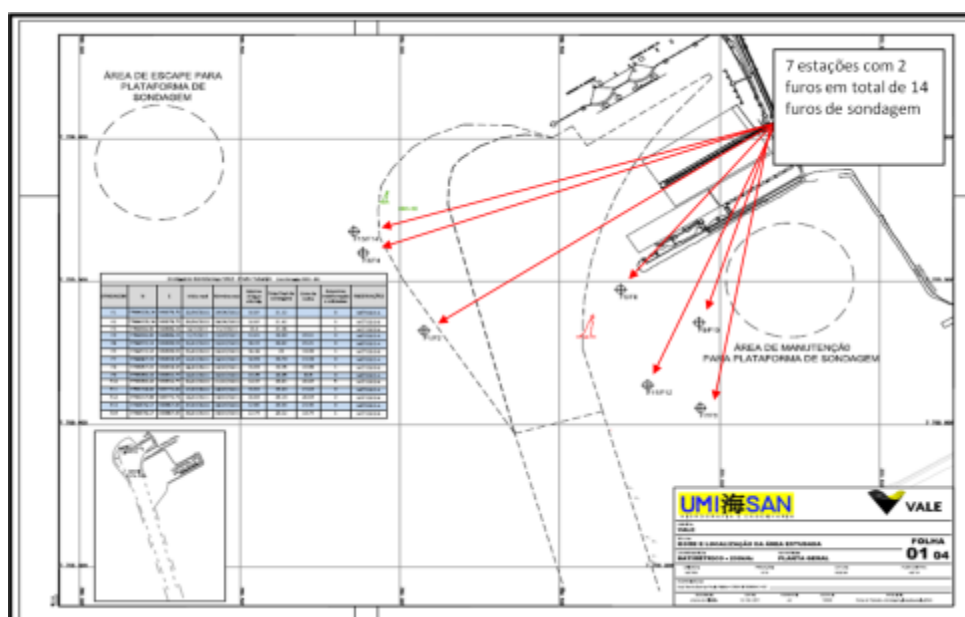


Figura 3.13 - Localização final dos testemunhos de sondagem (Umisan, 2011).

A coleta de dados geológicos e geotécnicos contemplou 14 furos de sondagem mista oceânica, com retirada de testemunhos íntegros e completos, amostras deformadas e indeformadas do tipo *Shelby* do subleito marinho sobre plataforma auto-elevatória (Figura 3.14), com utilização de quatro embarcações de apoio (Figura 3.15).



Figura 3.14 - Plataforma auto-elevatória utilizada para realização das sondagens (Umisan, 2011).



Figura 3.15 - Embarcações de apoio utilizadas durante a campanha de sondagem (Umisan, 2011)

A plataforma utilizada na sondagem foi posicionada nos locais das campanhas, em primeiro momento, com âncoras de fundo, também conhecidas como poitas de fundeio. Foram utilizadas três poitas confeccionadas em concreto com 2,5 t cada (Figura 3.16), sendo afixadas com correntes (amarras) nos vértices da plataforma, em conformidade com especificações do projeto da plataforma.



Figura 3.16 - Poitas utilizadas para fixação e estabilização da plataforma (Umisan, 2011).

O posicionamento das poitas foi realizado por um rebocador através de guincho elétrico elevatório na proa (Figura 3.17), deslocando a peça até o local definido, e georeferenciado por DGPS (marca Tech Geo – modelo GTR G2) em cota previamente definida, baseado no regime de ventos predominantes na área de estudo.



Figura 3.17 - Rebocador em operação de posicionamento das poitas utilizando guincho (Umisan, 2011).

Quando a plataforma chegou ao local estudado, os cabos de amarração foram tensionados a fim de atuarem como cabos de estaiamento (Figura 3.18). Em seguida o equipamento foi elevado através dos *spuds* atuando-se nos guinchos hidráulicos igualmente e com muita cautela, evitando-se elevações bruscas e mantendo-a nivelada. Foi necessário que, para se minimizar a ação das ondas no momento do içamento, a plataforma precisou ser içada por igual nos três *spuds* e o mais rápido possível.

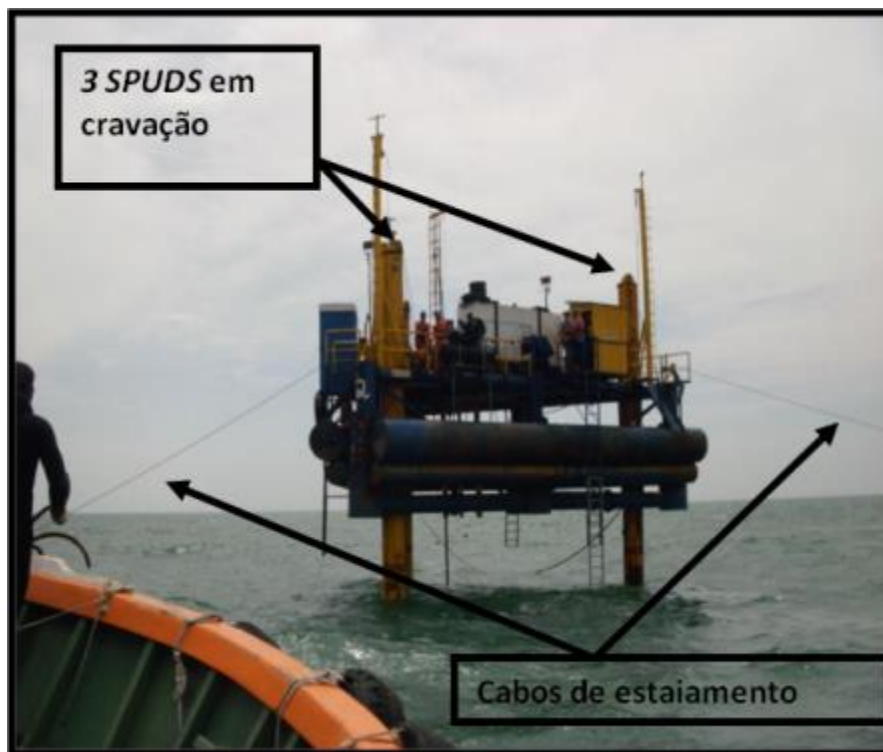


Figura 3.18 - Spuds de cravação e cabos de estaiamento para estabilização

Os tarugos de travamento foram instalados, bem como as abraçadeiras de ajuste bem apertadas, para solidarizar os *spuds* à plataforma assim que a mesma atingiu a cota de 2 m acima do nível do mar em preamar (maré cheia).

A planilha de alimentação do *software* foi definida, de maneira geral, com os mesmos *inputs* utilizados na Campanha de 1970 (Figura 3.19).

1	A	C	D	E	F	G	H
	furo	de	até	Espessura (m)	classificação visual		cli
10	F2	0	10.97	10.97	Lâmina de água		AG
11		10.97	12.97	2.00	Argila silto arenosa, grãos de areia		ARGL
12		12.97	14.97	2.00	Argila silto arenosa, grãos de areia		ARGL
13		14.97	17.97	3.00	Argila silto arenosa, grãos de areia		ARGL
14	F3	17.97	21.42	3.45	Areia siltoosa, muito argilosa, grãos de		ARIA
15		0	13.60	13.60	Lâmina de água		AG
16		13.60	15.10	1.5	Argila silto arenosa, grãos de areia		ARGL
17		15.10	18.10	3.00	Argila arenosa fina a média,		ARGL
18	F4	18.10	21.35	3.25	Areia média a grossa argilosa, com		ARIA
19		0	13.01	13.01	Lâmina de água		AG
20		13.01	16.01	3.00	Argila siltoosa, pouco arenosa fina a		ARGL
21		16.01	17.01	1.00	Areia argilosa média a grossa, com		ARIA
22	F5	17.01	19.39	2.38	Areia fina a média, pouco argilosa,		ARIA
23		19,39	28.61	9.22	Arenito fino a médio com níveis		ARNT
24		28.61	28.99	0.38	Arenito fino a médio, muito compacto,		ARNT
25		0	15.42	15.42	Lâmina de água		AG
26	F5	15.42	20.23	4.81	Argila arenosa, com grãos de areia		ARGL
27		20.23	23.62	3.39	Arenito siltooso, pouco argiloso, com		ARNT

Figura 3.19 - Exemplo da planilha eletrônica utilizada para consolidar todos os furos da campanha em questão.

O boletins de sondagens desta campanha estão exemplificados na (Figura 3.20) cuja campanha completa esta no CD em anexo.

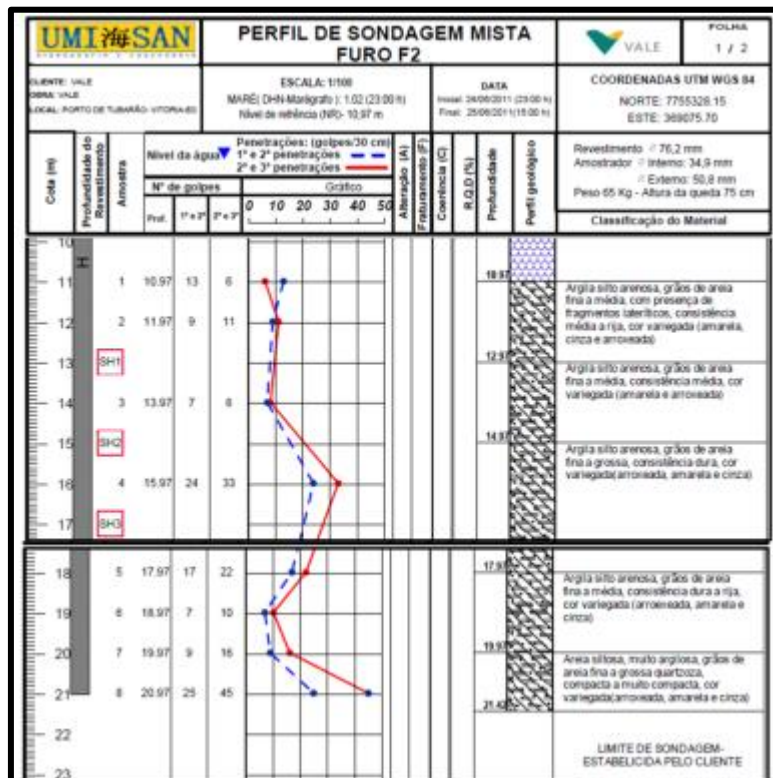


Figura 3.20 - Exemplo de boletim de sondagem utilizado na campanha de 2011 (Umisan, 2011).

3.3.2.1. Equipamentos Utilizados

Foram utilizados equipamentos para localização dos pontos na área de estudo, de sondagem geológica-geotécnica e amostradores. Os procedimentos foram realizados utilizando-se uma plataforma auto-elevatória, embarcações de apoio e mergulhos.

Para as campanhas de atividades de sondagem rotativa, foi utilizada sonda SS-51 (Figura 3.21), produzida pela SONDEQ. A sonda foi acoplada à plataforma e utilizado trilhos para movimentação da mesma sem a necessidade de manobra da plataforma para a realização dos dois furos em cada estação de sondagem. Cabe lembrar que foram estabelecidas 7 estações de sondagem em toda campanha totalizando 14 furos no projeto.



Figura 3.21 - Sonda SONDEC SS-51 instalada na plataforma (Umisa, 2011).

Quanto aos amostradores utilizados no projeto, são relacionados a seguir os seguintes:

- Obtenção de testemunhos completos em rochas;
- Obtenção de amostras deformadas por ensaios SPT;
- Obtenção de amostras indeformadas do tipo Shelby;

Os testemunhos completos das rochas perfuradas foram retidos no barrilete de sondagem, caracterizando informações do tipo de rocha, mineralogia, textura e estrutura, com as variações que poderiam ocorrer no avanço da perfuração (Figura 3.22).



Figura 3.22 - Modelo de boletim de amostras da sondagem rotativa para posterior envio ao laboratório (Umisan, 2011).

Foi utilizado o barrilete duplo giratório que consiste de dois barriletes concêntricos, ligados por uma cabeça permitindo os giros internamente e externamente independentes, apresentando maior integridade das amostras.

Na amostragem tipo *Shelby* (ABNT NBR 9820/1997) foi cravado amostrador padrão (Figura 3.23) no solo para obtenção de amostragem indeformada. O amostrador era composto de tubo inoxidável com 0,65m de comprimento fixado na haste de perfuração, sendo a extremidade inferior biselada com ângulo entre 5° e 10° a fim de facilitar a cravação.



Figura 3.23 - Amostrador tipo Shelby (Umisan, 2011)

3.3.2.2. Coleta de Amostras

A sondagem mista foi realizada nas técnicas rotativa, percussão e com ensaio SPT. Antes da perfuração a lâmina de água foi aferida através da descida de revestimento necessário para alcançar o fundo marinho, descontando-se a cota da plataforma até a água (medidor de nível na lateral da plataforma).

A sondagem rotativa consistiu na cravação de revestimento através da rotação (Figura 3.24) provocando a fricção entre a rocha ou solo, com as coroas de perfuração acopladas em sua extremidade, desgastando o material perfurado apresentando testemunhos com 111 mm de diâmetro (Figura 3.25) retidos no barrilete pela mola inserida na coroa de perfuração.



Figura 3.24 - Sondagem rotativa (Umisan, 2011).



Figura 3.25 - Testemunhos coletados com 111 mm de diâmetro (Umisan, 2011)

Quando houve a constatação de perfuração com comprimento igual ao do barrilete ou inferior desejados, hastes e barriletes foram içados pelo guincho hidráulico com a retirada da amostra que, em seguida, foi identificada e separada para envio ao laboratório.

Na amostragem *Shelby* houve a cravação do tubo inoxidável no solo a fim de serem retiradas amostras indeformadas. Iniciou-se a amostragem na cota desejada após a limpeza do furo com o amostrador acoplado à extremidade inferior da composição de hastes. O amostrador foi introduzido no furo e apoiado no solo com início da cravação em velocidades variando entre 15cm/s e 30cm/s.

Encerrou-se a amostragem quando a penetração atingiu o comprimento útil, descontada a penetração inicial. Logo em seguida o amostrador foi retirado da composição de hastes, suas duas extremidades foram protegidas e impermeabilizadas, o amostrador foi identificado e encaminhado ao laboratório. Assim ocorreu com toda campanha de amostragem (Figuras 3.26 e 3.27).



Figura 3.26 - Exemplo de amostra tipo Shelby 01 (Umisan, 2011).



Figura 3.27 - Exemplo de amostra tipo Shelby 03 (Umisan, 2011)

3.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

As amostras coletadas nas campanhas de sondagens foram acondicionadas em caixas padrão e encaminhadas para análise tátil/visual dos técnicos da geotecnia. Essas análises iniciais classificatórias permitiram informações quanto à granulometria, compactidade/consistência, cor e presença de concreções. Estas análises possibilitaram a geração de perfis individuais presentes no CD em anexo.

Além das análises, foram solicitados ensaios laboratoriais com intuito de melhor caracterizar as propriedades físicas dos materiais coletados. As amostras foram enviadas ao laboratório MC SOLOS Engenharia e Tecnologia Ltda localizado em Vitória/ES e para o laboratório da Universidade Federal de Viçosa em Minas Gerais.

3.4.1. ENSAIOS DE SOLOS

Nos ensaios referentes aos solos, foram utilizados os métodos consagrados e especificados em normas. Abaixo foram relacionados os ensaios solicitados e suas respectivas normas empregadas:

1. Granulometria por peneiramento – NBR 7181/84
2. Sedimentação - NBR 7181/84
3. Cisalhamento Direto - ASTM D3082-79
4. Ensaio Triaxial Adensado Não Drenado nas amostras Shelby - ASTM D – 2850 (norte-americana) e BS 1377 – 90 (britânica)

3.4.2. ENSAIOS DE ROCHAS

No ensaio referente aos corpos de prova em rochas, foi solicitada a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (NBR 7222/11), bem como a resistência por compressão uniaxial, utilizando o método de ensaio do *United States of Bureau of Mines* e como referência o *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock* – Leonard Obeat Wilbur I. Durvall.

3.5. CRITÉRIOS DE MODELAMENTO GEOLÓGICO ADOTADOS

O Modelo Geológico foi construído a partir da interpretação dos furos de sondagem das campanhas realizadas em 1970 e 2011. Os furos de sondagem apresentam-se dispostos em malha irregular, cobrindo a bacia de evolução e o canal de acesso do Porto de Tubarão. As seções verticais principais foram posicionadas transversalmente à direção do canal de acesso, procurando o alinhamento médio dos furos de sondagem. Foram geradas seções verticais auxiliares posicionadas longitudinalmente ao canal de acesso para contribuir no detalhamento do modelo e aferir as espessuras dos materiais encontrados.

Na (Figura 3.28) é mostrado o mapa de localização das sondagens e seções verticais na região da bacia de evolução. Verifica-se que a distância entre as seções é variável, entre 130m a 200m. Desta forma, ficou definido que as seções verticais seriam modeladas utilizando os furos com alcance de 75m em relação eixo da seção, além de analisar os furos com alcance de 100m para verificar a continuidade das litologias, conforme mostrado na (Figura 3.29).

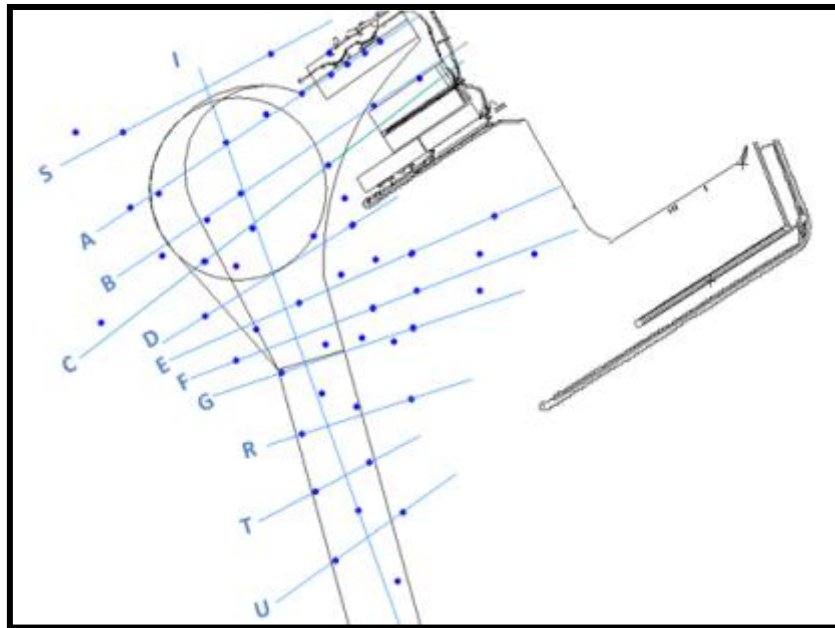


Figura 3.28 - Mapa de localização das sondagens e seções verticais.

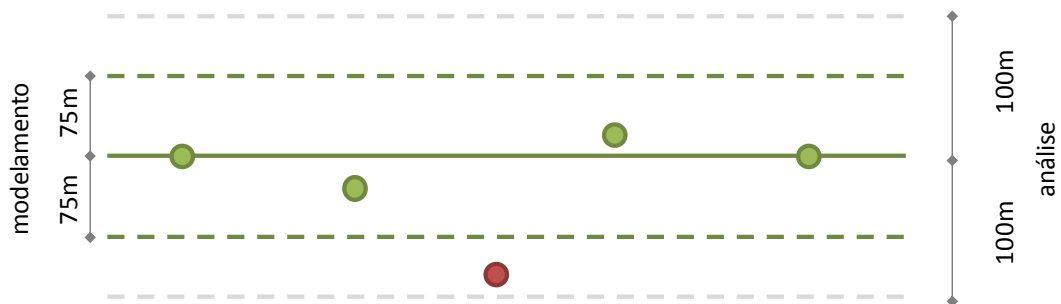


Figura 3.29 - Representação do alcance utilizado no modelamento geológico.

Inicialmente foi definido o modelo geológico dos tipos de materiais, formado por rocha e sedimentos. Na segunda etapa, foram discretizados os sedimentos areia e argila, em formato lenticular. Na (Figura 3.30) é mostrada uma seção vertical típica construída a partir da interpretação dos furos de sondagem. O critério para delimitar as lentes dos sedimentos foi a distância média entre dois furos, além da avaliação da continuidade das mesmas.

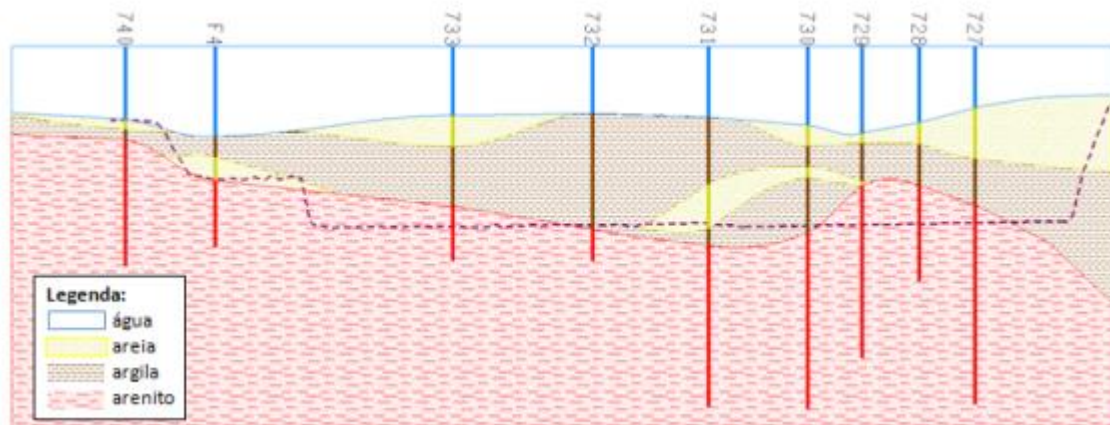


Figura 3.30 - Tipo de seção vertical do Modelo Geológico.

A partir das seções verticais do modelo de tipos de materiais (rocha e sedimentos) foi gerado o modelo tridimensional, conforme mostrado na (Figura 3.31)

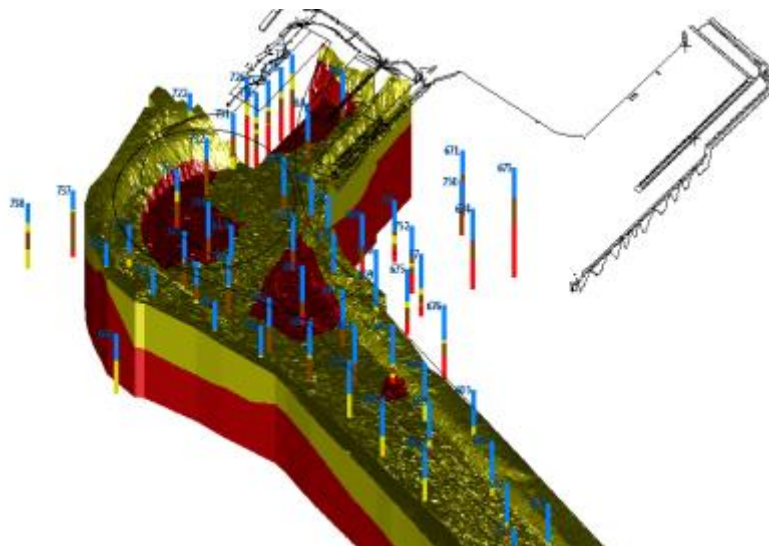


Figura 3.31 - Modelo geológico tridimensional dos tipos de materiais

O programa utilizado para o modelamento foi o MineSight®, voltado para o desenvolvimento de projetos na área de mineração em ambiente 3-D. Os *inputs* foram através de planilhas eletrônicas, onde todas as informações técnicas dos furos de sondagem de ambas as campanhas (1970 e 2011) foram consideradas. As planilhas são definidas como *assay.csv*, *collar.csv* e *survey.csv*.

A consolidação *assay.csv* foi definida com os seguintes *inputs* (Figura 3.32):

- DHID – nome do furo;
- FROM/TO – início e fim da camada do material da sondagem;
- INTERVAL – diferença entre FROM/TO permitindo obter a espessura da camada;
- ROCK – tipo de material encontrado na sondagem;
- SONDAGEM – ano da campanha;

	A	B	C	D	F	I
1	DHID	FROM	TO	INTERVA	ROCK	SONDAGEM
83	F14	0,00	13,47	13,47	AG	2011
84	F14	13,47	21,32	7,85	ARG	2011
85	F14	21,32	22,32	1,00	AREIA	2011
86	F14	22,32	23,32	1,00	ARNT	2011
87	F14	23,32	24,56	1,24	ARNT	2011
88	F14	24,56	26,04	1,48	AGLT	2011
89	F14	26,04	26,76	0,72	ARNT	2011
90	F14	26,76	28,32	1,56	ARNT	2011
91	733	0,00	9,97	9,97	AG	1970
92	733	9,97	10,27	0,30	AREIA	1970
93	733	10,27	13,02	2,74	AREIA	1970
94	733	13,02	14,54	1,52	AREIA	1970
95	733	14,54	23,08	8,53	ARG	1970
96	733	23,08	25,51	2,44	ARNT	1970
97	733	25,51	30,09	4,57	ARNT	1970
98	733	30,09	31,00	0,91	ARNT	1970
99	731	0,00	10,17	10,17	AG	1970
100	731	10,17	10,63	0,46	ARG	1970
101	731	10,63	19,92	9,30	ARG	1970
102	731	19,92	26,32	6,40	AREIA	1970
103	731	26,32	28,76	2,44	ARG	1970
104	731	28,76	30,29	1,52	ARNT	1970
105	731	30,29	35,47	5,18	ARNT	1970
106	731	35,47	43,39	7,92	ARNT	1970
107	731	43,39	46,44	3,05	ARNT	1970

Figura 3.32 - Exemplo da planilha utilizada para a consolidação *assay.csv*.

Nesta consolidação é também necessário considerar a variação da maré no momento da execução do furo, cujo esquema de cálculo é apresentado na (Figura 3.33).

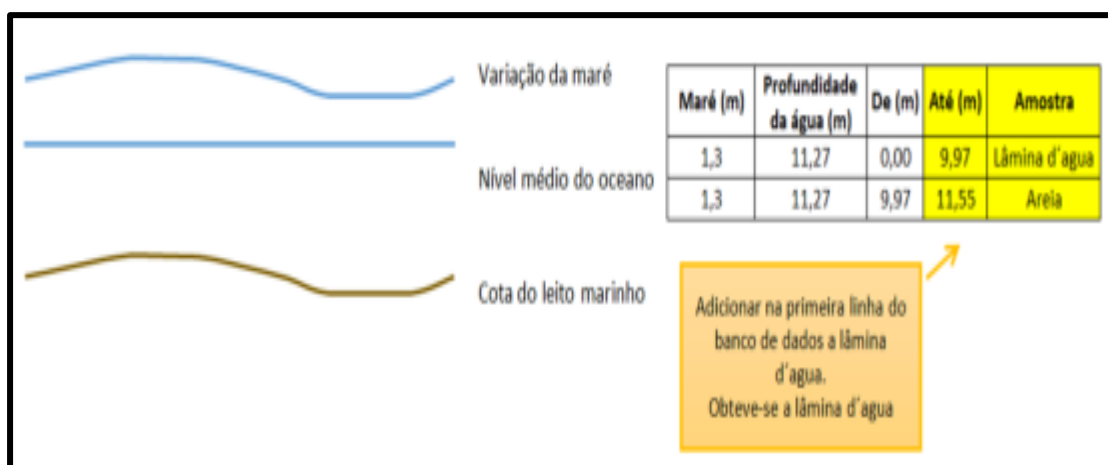


Figura 3.33 - Esquema e detalhamento do cálculo utilizado para variação da maré.

A consolidação collar.csv foi definida com os seguintes inputs (Figura 3.34):

- DHID -- nome do furo;
- EASTING E NORTHING – georeferenciamento dos furos;
- ELEVATION – elevação dos furos;
- DEPH – profundidade;
- SONDAGEM – ano da campanha;

	A	B	C	D	E	F
1	DHID	EASTING	NORTHING	ELEVATION	DEPTH	SONDAGEM
2	F1	369075,70	7755328,15	0,00	21,12	2011
3	F2	369077,70	7755330,15	0,00	21,42	2011
4	F3	368885,21	7755600,40	0,00	21,35	2011
5	F4	368887,21	7755602,40	0,00	28,99	2011
6	F5	369689,61	7755472,31	0,00	28,02	2011
7	F6	369691,61	7755474,31	0,00	28,00	2011
8	F7	369939,36	7755057,41	0,00	28,79	2011
9	F8	369941,36	7755059,41	0,00	29,15	2011
10	F9	369934,77	7755356,42	0,00	28,25	2011
11	F10	369936,77	7755358,42	0,00	28,01	2011
12	F11	369774,00	7755138,00	0,00	28,04	2011
13	F12	369776,00	7755140,00	0,00	28,14	2011
14	F13	368857,06	7755675,17	0,00	28,36	2011
15	F14	368859,06	7755677,17	0,00	28,32	2011
16	602	370003	7753113	0,00	28,91	1970
17	603	369987	7753362	0,00	28,14	1970
18	604	370169	7752730	0,00	27,87	1970
19	605	369895,9	7754321	0,00	27,77	1970
20	606	369973,5	7753662	0,00	27,15	1970
21	608	368644,8	7755084	0,00	27,55	1970
22	609	369730,7	7755020	0,00	27,19	1970
23	610	369477,7	7754634	0,00	27,55	1970
24	612	369838,6	7753322	0,00	28,09	1970
25	613	369801,5	7753584	0,00	31,55	1970
26	614	369275,4	7755461	0,00	30,54	1970

Figura 3.34 - Exemplo de planilha eletrônica de consolidação *collar.csv* onde é possível observar os anos em que as sondagens foram realizadas na coluna SONDAGEM.

O georeferenciamento de todos os furos, para ambas as campanhas (1970 e 2011), foi importado do mapa exibido na (Figura 3.35).

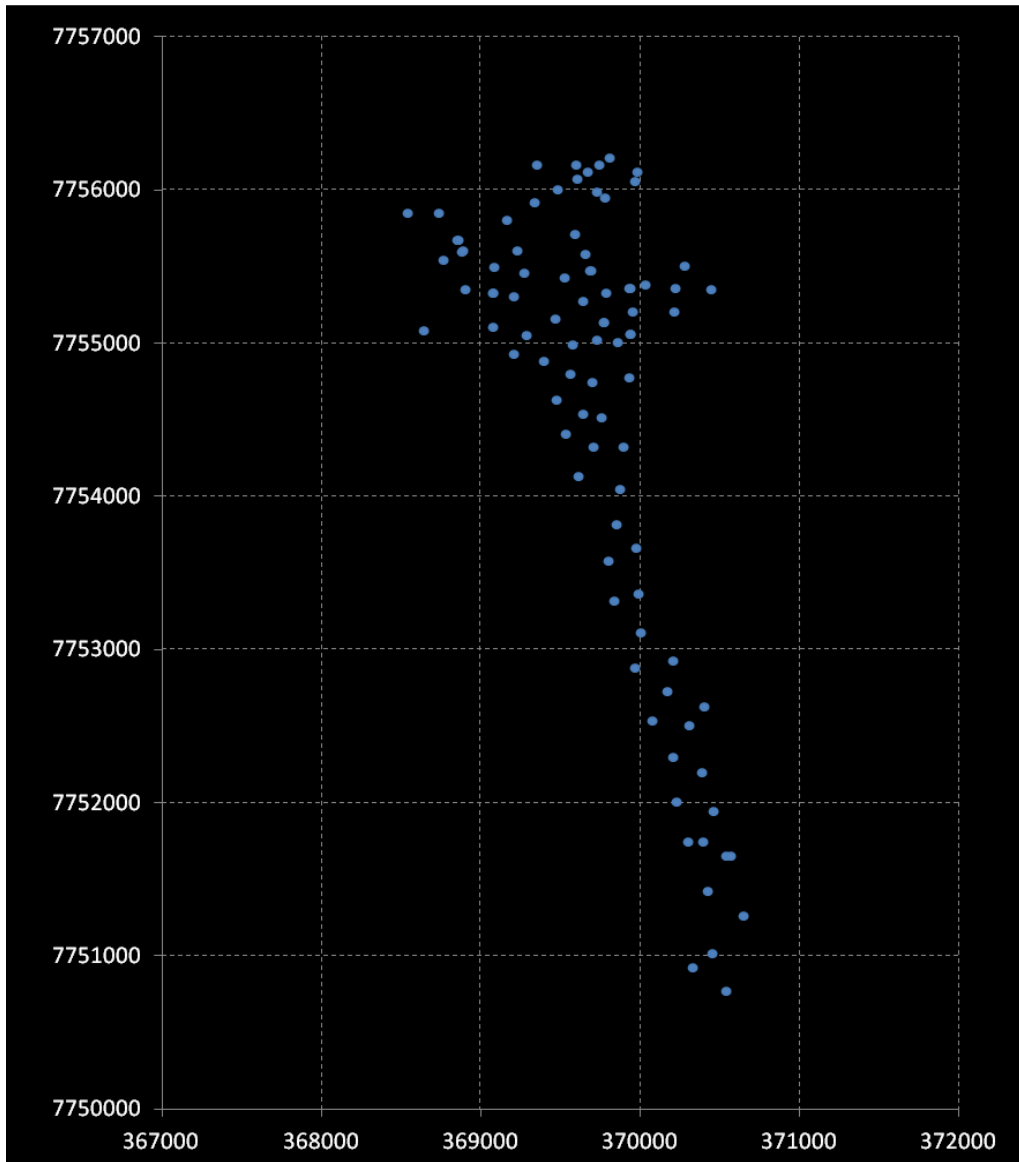


Figura 3.35 - Mapa de georeferenciamento de todos os furos utilizados no Modelo Geológico para ambas as campanhas.

A consolidação *survey.csv* foi definida com os seguintes *inputs* (Figura 3.36):

- DHID -- nome do furo;
- DIP -- direção do mergulho do furo;
- SONDAGEM -- ano da campanha;

	A	D	E	F
1	DHID	DIP	SONDAGEM	
2	F1	-90	2011	
3	F2	-90	2011	
4	F3	-90	2011	
5	F4	-90	2011	
6	F5	-90	2011	
7	F6	-90	2011	
8	F7	-90	2011	
9	F8	-90	2011	
10	F9	-90	2011	
11	F10	-90	2011	
12	F11	-90	2011	
13	F12	-90	2011	
14	F13	-90	2011	
15	F14	-90	2011	
16	602	-90	1970	
17	603	-90	1970	
18	604	-90	1970	
19	605	-90	1970	
20	606	-90	1970	
21	608	-90	1970	
22	609	-90	1970	

Figura 3.36 - Exemplo de planilha eletrônica de consolidação *survey.csv* onde é possível observar os anos em que as sondagens foram realizadas na coluna SONDAGEM.

Em resumo, para a geração do Modelo Geológico foram necessárias as informações dos mapas de localizações das duas campanhas, suas descrições gerais e coordenadas, cálculo da lâmina de água e preenchimento das planilhas *collar*, *survey* e *assay*. O fluxograma geral de entrada de dados é descrito na (Figura 3.37).

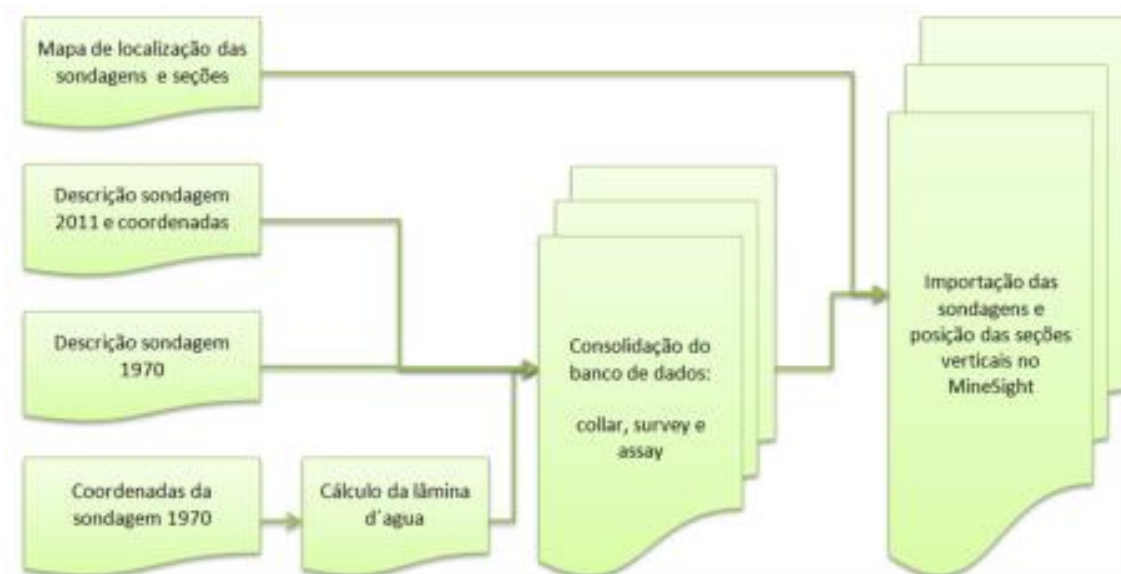


Figura 3.37 - Fluxograma geral de entrada de todos os dados no programa para modelamento.

3.6. CORRELAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E GEOFÍSICA

Esta correlação foi realizada localizando-se os furos de ambas as campanhas (1970 e 2011) sobre os mapas de resultados da geofísica (Reflexão e Refração). Os perfis de sondagem foram comparados aos indicadores da geofísica e puderam ser correlacionados de forma global, uma vez que a geofísica aponta indicativos de possíveis materiais constituintes da sub-superfície marinha. Estes materiais foram encontrados nos boletins de sondagens em sua quase totalidade como argila, areia e arenito com suas variações ao longo do perfil.

Na Sísmica Rasa por exemplo, no Compartimento 1 (apresentado no Capítulo 4), houve o indicativo, de espessuras máximas de 10m, de sedimentos definidos como provável material arenoso, que quando sobrepõe-se e compara-se aos furos 737 e 722 da campanha de 1970, da mesma área, confirmam-se areia e argila arenosa com suas variações.

Na Sísmica de Refração, em sua porção Noroeste e Sudoeste (apresentado no Capítulo 4), foram encontradas velocidades variando de 1800 a 2200m/s com indicativo de prováveis sedimentos (muito) compactados/consolidados a partir da

cota -25m. Quando se realizou a sobreposição dos furos de sondagem nesta mesma área, por exemplo, da seção AA' (apresentada no Capítulo 5), encontrou-se arenito praticamente em todos os nove furos realizados, confirmando o indicativo da geofísica.

Desta forma, sobrepondo as campanhas de sondagem aos estudos geofísicos, foi possível cancelar os indicativos apontados pela sísmica. Importante esclarecer que os estudos geofísicos apenas apontam para uma composição de materiais do fundo oceânico, mas somente com as investigações de sondagens é possível obter-se dados mais precisos e concretos do substrato marinho.

3.7. CUBAGEM DAS CAMADAS DE SEDIMENTOS E ARENITO

No Modelo Geológico, para fins práticos de nomenclatura e como hipótese simplificadora, considerou-se que areia e argila serão considerados Sedimentos, bem como todo arenito considerado Rocha. Isto facilita o entendimento e visualização do mesmo.

Com todos os furos de sondagem de interesse, de ambas as campanhas, devidamente traduzidos e lançados em meio eletrônico, foi possível encontrar e delimitar as camadas de ocorrências dos sedimentos e rochas, com suas respectivas localizações (georeferenciadas) e profundidades, exportando-os ao software MineSight®, que compilou todas as informações, interpolou os dados e gerou os sólidos e relatórios indicativos de volumes de cada material constituinte.

Importante observar que, apesar da não ocorrência de rocha nas sondagens a partir do furo 685 (pertencente ao canal), o Modelo continua propondo existência de rocha até a entrada do canal de aproximação. Os furos da campanha de 1970, a partir deste ponto, não foram profundos o suficiente para alcançar a rocha. Esta hipótese de continuidade do contato do arenito, a partir da cota -35m (em média) até a cota -55m do Modelo, elevou sobremaneira o volume total de rocha. Caberá aos estudos geofísicos e campanhas de sondagem futuras apontarem ou não a hipótese de ocorrência desta rocha em tais profundidades.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. GEOFÍSICA

4.1.1. SÍSMICA DE REFLEXÃO (SÍSMICA RASA)

Os dados coletados no levantamento foram processados no software *CODA SURVEY ENGINE*, gerando o Mapa de Isópacas que apresenta a variação de espessura de uma camada ou simplesmente penetração máxima da onda sísmica (UMISAN, 2011).

Foram observadas espessuras principais entre 0m e 2,5metros, apontando para um material de elevada consistência por impedir os sinais de atingirem profundidades maiores e possibilitarem uma leitura mais apurada das camadas inferiores. Percebeu-se na análise uma camada sedimentar superficial na extensão do canal de aproximação, Píer 2, bacia de evolução e na sua sobrebacia.

Resumindo todas as análises obtidas no levantamento de campo, pode-se dividir a área de estudo em 3 compartimentos (Figura 4.1) com espessuras semelhantes entre si.

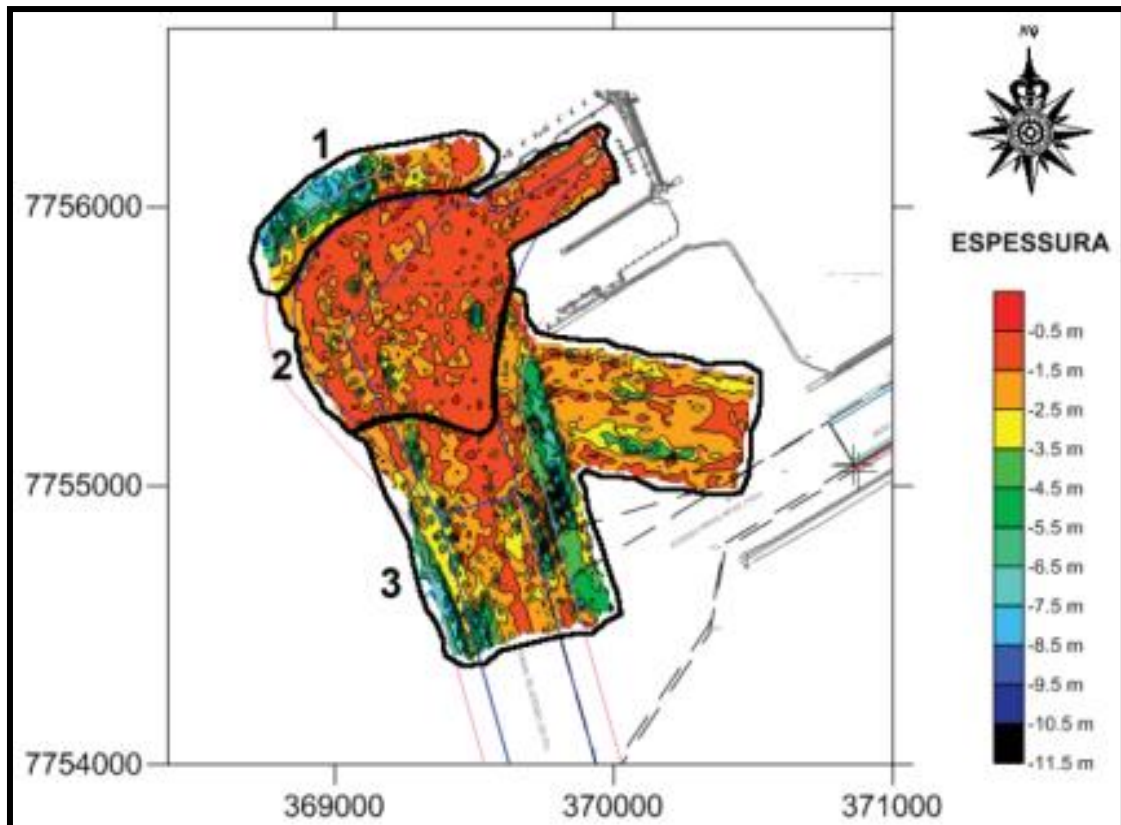


Figura 4.1 - Compartimentação da área de estudo criada a partir da interpretação da Sísmica de Reflexão (UMISAN, 2011).

Após compilação dos levantamentos e análises de compartimentação, concluída pela equipe de Umisan, 2011, resumiu-se da seguinte maneira:

- **Compartimento 1:** Domínio de elevadas espessuras de sedimentos e definido como provável material arenoso;
- **Compartimento 2:** Espessuras sedimentares menos representativas com elevada densidade dificultando propagação do sinal;
- **Compartimento 3:** Padrão similar ao compartimento 1, maiores espessuras, provável sedimento de baixa consolidação e maior porosidade;

Há necessidade da combinação dos levantamentos da Sísmica de Reflexão com a Sísmica de Refração no intuito de aproximar-se, de forma mais precisa a um ponto em comum na caracterização da área de estudo, cancelados pelas campanhas de sondagens e ensaios laboratoriais.

4.1.2.SÍSMICA DE REFRAÇÃO

4.1.2.1. Processamento e Interpretação de Dados

Resumidamente, com base nos relatórios dos estudos em campo, segundo (G-tec, 2011), o Processamento dos Dados referentes aos estudos consistiram na correção da navegação bruta, recálculo da posição, aplicação de ganhos, filtragem, escolha (*picking*) da primeira chegada e inversão numérica, características práticas e usuais neste tipo de levantamento.

A (G-tec, 2011) também considerou a Interpretação dos Dados baseados na identificação das diferentes camadas sísmicas encontradas, ajuste das escolhas (*picking*), integração da sísmica de reflexão, seções horizontais e verticais no modelo e gráficos. Os resultados propriamente ditos são representados como:

- Mapas de contorno da profundidade do refrator e das velocidades sísmicas;
- Seções verticais mostrando a geometria e as velocidades sísmicas das diferentes camadas;
 - **Azul**: Profundidade da coluna d'água;
 - **Bege**: Sedimentos pouco compactados e altamente desgastados ou rochas bastante fraturadas;
 - **Verde** para sedimentos altamente compactados e rochas desgastadas ou fraturadas;

- Amarelo para rochas pouco desgastadas ou fraturadas;
- Vermelho para rocha sólida;
- Seções horizontais em diferentes níveis com mesmos referenciais de cores das seções verticais citadas acima;

Importante informar que para a proposição deste trabalho foram estudadas faixas de velocidades sísmicas a partir da cota -25m pois o canal e bacia foram dragados no corrente ano até esta cota. As velocidades encontradas nos levantamentos e conseqüentemente as correlações com os materiais na área de estudo, foram comparadas com os valores a seguir e com a (Figura 4.2):

- 1400 a 1600m/s: Água – camada de baixa velocidade – sedimentos moles;
- 1600 a 2000m/s: Sedimentos compactados e/ou consolidados – muito intemperizados e/ou rocha fraturada;
- 2000 a 2500m/s: Sedimentos altamente compactados - intemperizados e/ou rocha fraturada;
- 2500 a 3000m/s: Material pouco intemperizado e/ou rocha fraturada;
- 3000 a 3500m/s: Rocha são levemente fraturada;
- > 3500m/s: Rocha são;

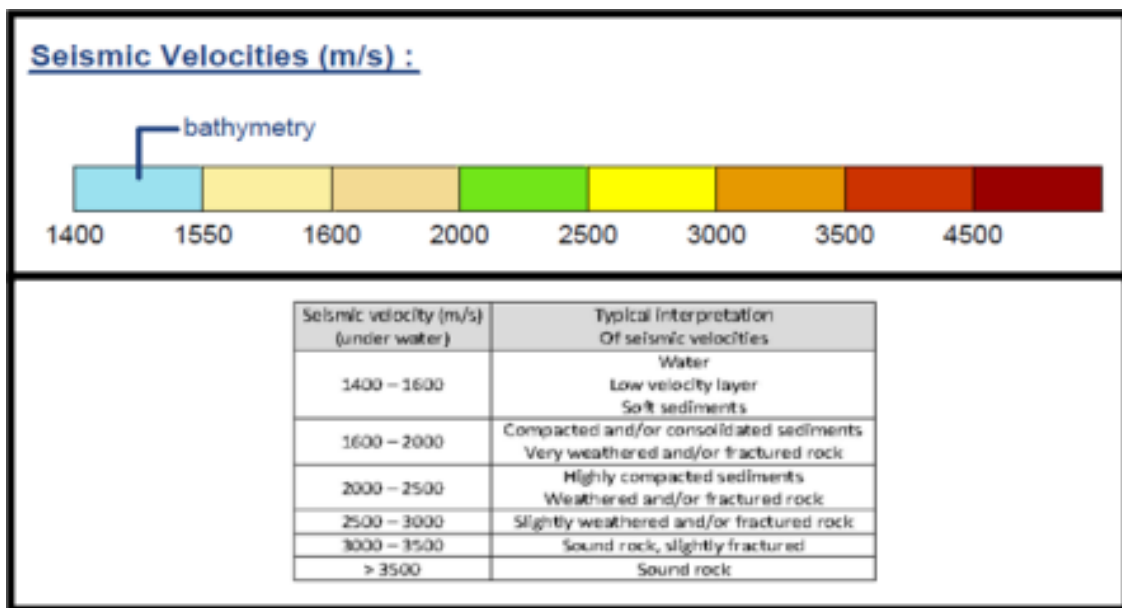


Figura 4.2 - Referência utilizada para as velocidades sísmicas submersas e suas interpretações geológicas típicas (G-TEC, 2011)

Apesar das velocidades apontadas no mapa, na região noroeste e sudoeste da área de estudo (hachurada em preto na (Figura 4.3) estarem entre as cotas -20m e -25m, e as velocidades variando de 1800 a 2200m/s são indicativo de prováveis sedimentos (muito) compactados/consolidados a partir da cota -25m.

Na mesma região e cotas observou-se uma pequena área com velocidade de até 2750m/s (hachurada em vermelho na Figura 12) apontando para rochas levemente desgastadas e/ou fraturadas.

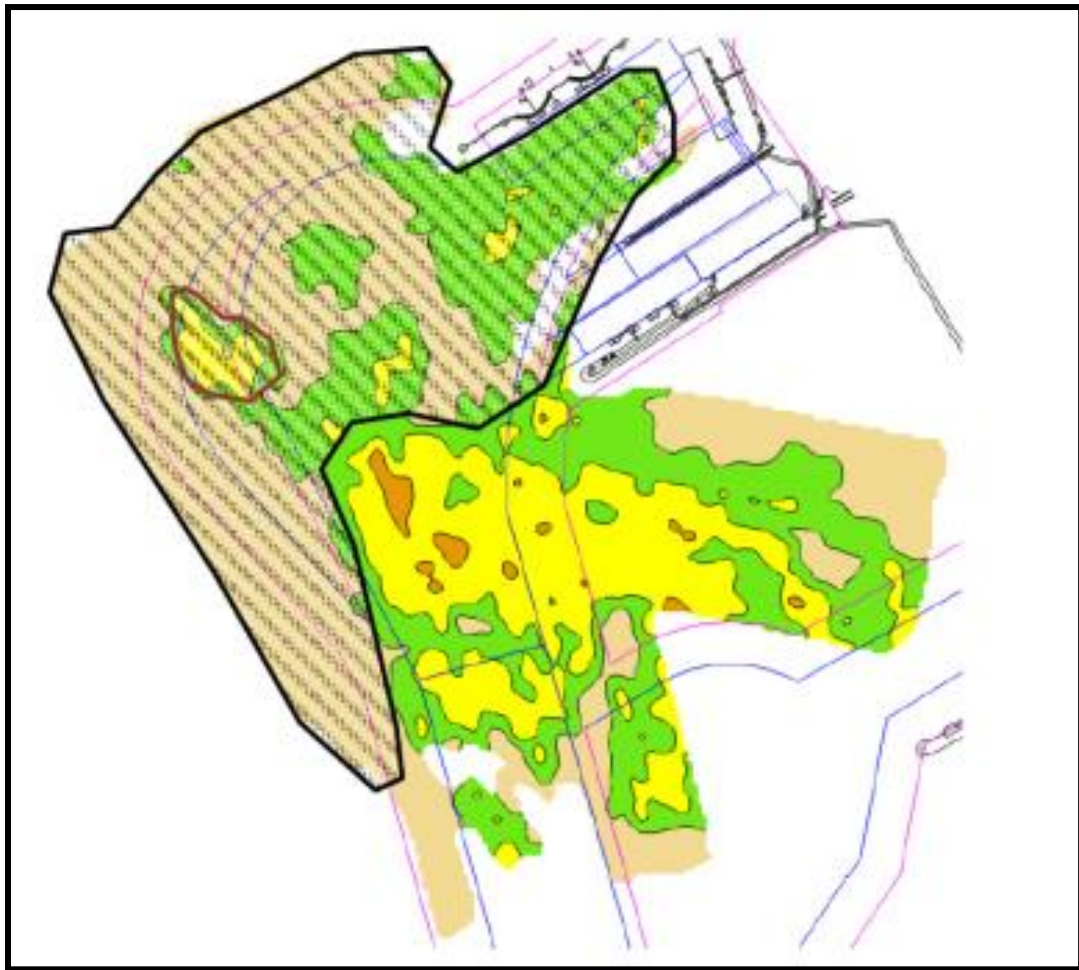


Figura 4.3 - Áreas em vermelho e preto (-20m a -25m) - velocidades de 1800 a 2750m/s. (G-TEC, 2011)

As maiores velocidades sísmicas encontradas na área de estudo foram localizadas na zona central da mesma (área circulada em azul da Figura 4.4), aparecendo em pequenos locais específicos, formação rochosa pouco desgastada (cota -30 m) e com velocidades que chegaram a 3200 m/s pontuais no canal de acesso e na doca.

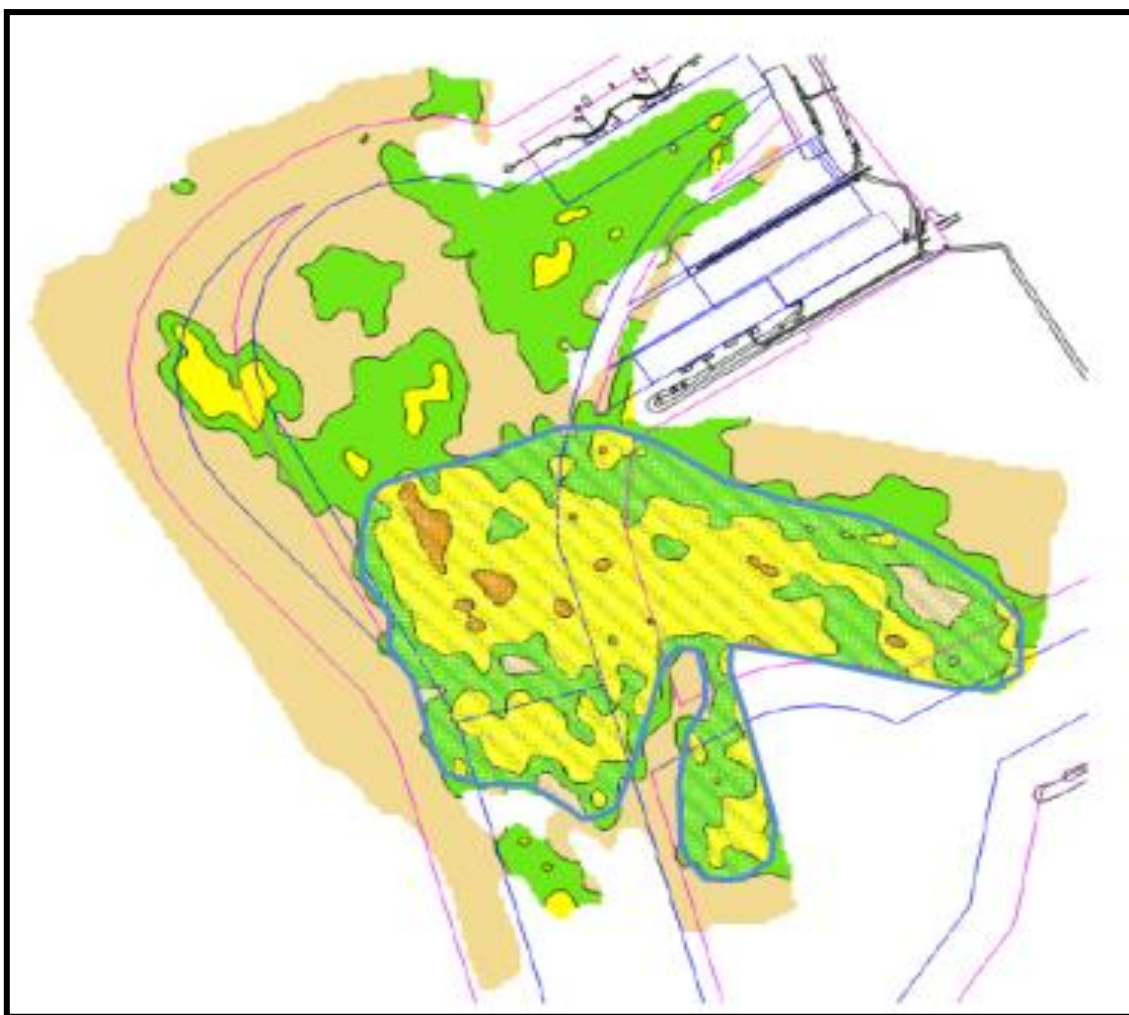


Figura 4.4 - Área em azul com velocidades sísmicas na região central chegando até 3200 m/s (G-TEC, 2011)

Na (Figura 4.5), região sudeste da área de estudo, circulada na cor alaranjada, velocidades sísmicas girando em torno de 1800m/s, correspondendo a uma camada de sedimentos compactados, foram detectadas próximas ao leito marítimo.

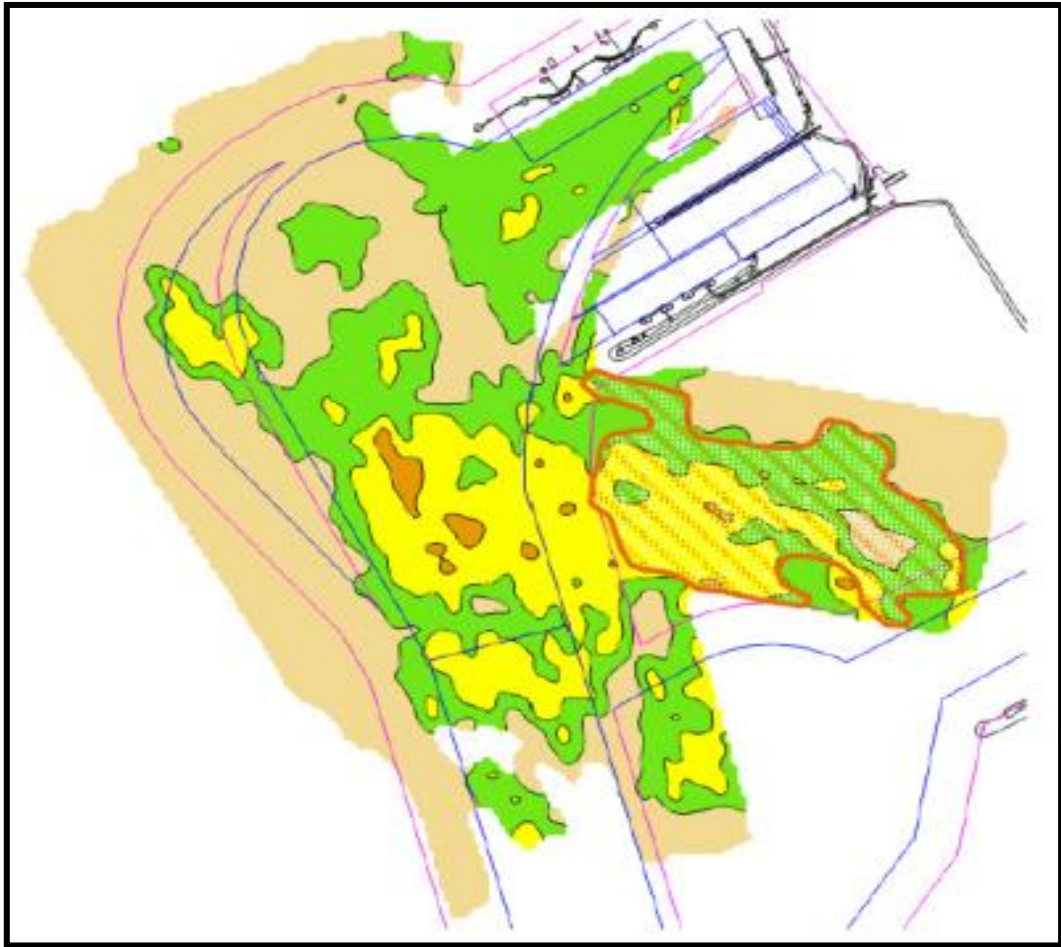
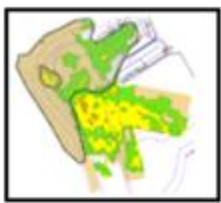
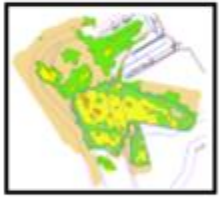
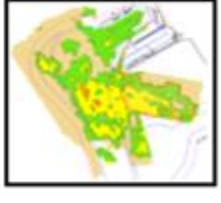


Figura 4.5 - Área circulada em alaranjado com velocidades sísmicas de 1800m/s (G-TEC, 2011)

4.1.2.2. Resumo dos Resultados da Refração

A seguir foi preparado um quadro resumo, a fim de compilar as principais informações como local, relevância do local para este estudo, velocidades e as interpretações geológicas com vistas às faixas de velocidades sísmicas adotadas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Comparativo resumo com suas interpretações geológicas através das faixas adotadas de velocidades.

	LOCAL	RELEVÂNCIA NESTE ESTUDO	INTERVALOS DE VELOCIDADES (m/s)	INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA
Noroeste e Sudoeste		Alta	1800 a 2750	Sedimentos (muito) compactados/consolidados (hachurado em preto) e rochas levemente desgastadas e/ou fraturadas (hachurado em vermelho)
Central do Canal e Sudeste na Doca		Alta	2000 a 3200	Sedimentos (muito) compactados/consolidados e em poucos locais formação rochosa pouco desgastada
Sudeste		Baixa	1800	Sedimentos (muito) compactados/consolidados rasos, próximos ao leito marinho

4.2. INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

Os dados apresentados na sequência referem-se à campanha de sondagem de 2011, uma vez que não possível resgatar os ensaios de laboratório da campanha de 1970, considerada mais completa e substancial, portanto, para o Modelo Geológico a identidade do substrato sedimentar marinho da área de estudo será baseada nos resultados encontrados na campanha mais recente. Todos os resultados, fotos, tabelas, gráficos e relatórios encontram-se no CD em anexo.

4.2.1. PROPRIEDADES E ÍNDICES FÍSICOS DOS SEDIMENTOS E ROCHAS

4.2.1.1. Limites de Atterberg

A argila encontrada na região de estudo possui plasticidade intermediária, muito arenosa de média a grossa com grãos compostos de quartzo e eventualmente feldspato;

Para as argilas e areias encontradas em todas as amostras retiradas da campanha, adotou-se considerar valores médios que represente toda área de estudo (Modelo), como uma identidade dos sedimentos lá encontrados. Os valores médios dos sedimentos citados são:

- **Limite de Liquidez (LL)** - 42,25%;
- **Limite de Plasticidade (LP)** - 23,16%;
- **Umidade Natural** - 18,80%;

4.2.1.2. Granulometria

Quanto à areia, foram retiradas poucas amostras, consideradas muito argilosas, em sua maioria de granulometria média a fina, com grãos de quartzo;

Foram adotados os seguintes resultados representativos para todo Modelo:

- **Pedregulho Grosso** – 0% em função da sua baixíssima ocorrência em todas as amostras;
- **Pedregulho Fino** – variando de 3% a 11% no universo de amostras;
- **Areia Grossa** – variando de 2% a 15% no universo de amostras;
- **Areia Média** – variando de 20% a 42% no universo de amostras;
- **Areia Fina** – variando de 15% a 30% no universo de amostras;

4.2.1.3. Cisalhamento Direto

Em todos os furos da campanha de 2011 foram retiradas amostras de solos a fim de se obter os valores de resistência ao cisalhamento para tensões normais definidas de 0,5kgf/cm², 1,0kgf/cm² e 2,0kgf/cm².

Em todas as amostras indeformadas retiradas com amostrador Shelby o material foi argila silto-arenosa, com algumas variações na cor e consistência. Apesar de praticamente corresponder ao mesmo material encontrado, com o aumento da profundidade, não houve aumento significativo da resistência ao cisalhamento. As amostras foram coletadas nas cotas variando de -12,97m até -20,69m havendo pouca dispersão nos valores de tensões cisalhantes encontradas.

Apesar da convergência nos valores encontrados, definiu-se que as maiores tensões cisalhantes encontradas, para cada tensão normal definida, serão as representativas para todo Modelo (Tabela 4.2).

Tabela 4.2.- Resumo dos valores de resistência ao cisalhamento encontrados nos ensaios, em função das tensões normais definidas. As amostras foram coletadas com amostrador Shelby e todas pertencentes a campanha de 2011 (MC SOLOS, 2011).

Furo / Shelby / Amostra	Amostra (Prof.)	Material*	Tensão Normal Definida			
				0,5 kgf/cm ²	1,0 kgf/cm ²	2,0 kgf/cm ²
2/sh1/1,2,3	12,97	A-S-Ar	Resistência ao Cisalhamento	0,33	0,65	1,05
2/sh2/1,2,3	14,97	A-S-Ar		0,26	0,49	1,11
2/sh3/1,2,3	16,97	A-S-Ar		0,46	0,64	0,93
3/sh1/1,2,3	14,05	A-S-Ar		0,40	0,75	1,02
6/sh1/1,2,3	15,60	A-S-Ar		0,61	0,77	1,34
6/sh3/1,2,3	18,60	A-S-Ar		0,54	0,77	1,33
8/sh2/1,2,3	20,69	A-S-Ar		0,35	0,57	1,41
10/sh1/1,2,3	14,61	A-S-Ar		0,31	0,68	1,66
10/sh3/1,2,3	17,61	A-S-Ar		-	1,02	1,68
10/sh5/1,2,3	20,61	A-S-Ar		0,58	0,91	1,89
12/sh1/1,2,3	17,59	A-S-Ar		0,47	0,69	1,44
12/sh2/1,2,3	19,09	A-S-Ar		0,35	0,60	0,92
14/sh4/1,2,3	18,32	A-S-Ar		0,31	0,50	0,67
Maiores Tensões Cisalhantes					0,61	1,02

*A-S-A: Argila Silto-Arenosa

4.2.1.4. Ensaio de Compressão

Os testemunhos de rocha foram retirados dos furos realizados no ano de 2011. Foram compilados em uma tabela resumo apresentando seus resultados de resistência à compressão bem como a descrição de cada corpo de prova retirado (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Resultados de resistência a compressão do arenito (MC SOLOS, 2011)

Furo	De	A	Carga	Área	Resistência (Mpa)	Material
F6	23,55	26,95	3080,00	92,06	3,20	Arenito siltoso
	26,55	26,95	10630,00	91,50	11,20	Arenito silto-argiloso
	26,96	28,00	13750,00	92,12	14,30	Arenito siltoso
	26,96	28,00	14100,00	93,77	14,40	Arenito siltoso
F8	22,04	23,04	24840,00	96,13	24,80	Arenito fino
	23,40	25,08	6100,00	92,46	6,30	Arenito fino
	24,04	25,08	10570,00	93,83	10,80	Arenito fino
	25,08	26,08	7280,00	92,40	7,60	Arenito fino
	26,08	27,15	10650,00	98,34	10,30	Arenito fino
	27,15	28,15	2620,00	92,86	2,70	Arenito fino silto argiloso
	28,15	29,15	4310,00	93,37	4,40	Arenito fino silto argiloso
F12	27,14	28,14	2860,00	90,37	3,00	Arenito com grão quartozozos
	26,14	27,14	8610,00	95,09	8,60	Arenito com grão quartozozos
	27,14	28,14	18820,00	98,40	18,20	Arenito com grão quartozozos
	27,14	28,14	2820,00	94,11	2,90	Arenito com grão quartozozos
F14	23,32	24,32	350,00	98,99	0,30	Arenito silto-argiloso
	25,32	26,32	550,00	90,20	0,60	Arenito fino
	27,32	28,32	710,00	93,03	0,70	Arenito fino silto-argiloso

Os resultados de resistência à compressão foram lançados no mapa da área de estudo afim de melhor visualização das retiradas dos testemunhos e considerados os valores menos conservadores, ou melhor, os maiores valores encontrados acima da cota -25m (Figura 4.6).

Para o furo F14, as amostras de rocha apresentaram material de arenito fino silto-argiloso e com 0,60MPa a -25,32m aproximadamente, caracterizando-se de baixa resistência e pertencente a Formação Barreiras.

No furo F6 o material encontrado foi arenito siltoso, com 11,20MPa a -26,55m de profundidade. O furo F12 surgiu arenito com forte influência de grãos quartzosos e 2,90MPa na cota -27,14m de profundidade. O furo F8 é predominante o arenito fino a médio com 2,70MPa a -27,15m de profundidade..

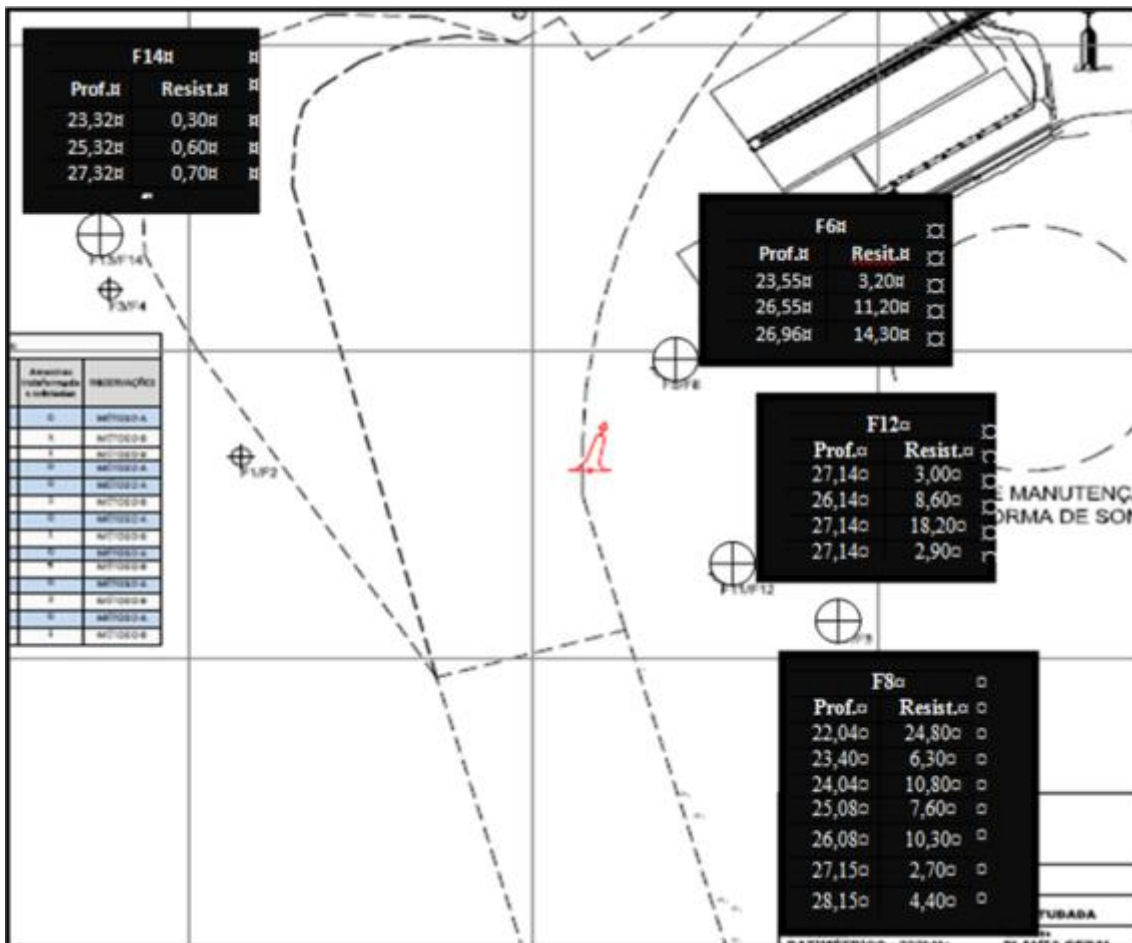


Figura 4.6.- Localização dos furos aonde surgiram testemunhos em rocha para ensaios em laboratório. O arenito encontrado pertence a Formação Barreiras.

Os furos de década de 70 que apresentaram surgimento de rocha foram resumidos no quadro a seguir (Tabela 4.4).

Tabela 4.4.- Furos da década de 70 que apontaram surgimento de rocha na área de estudo.

Identificação do Furo	Maré (m)	Profund. água (m)	De (m)	Até (m)	Espessura da Amostra (m)	Classificação Visual	Sigla
733	1,3	11,27	23,08	25,51	2,44	Arenito mole, amarelado e cinza claro;	AREN
680	1,45	18,29	21,72	28,42	6,70	Arenito medianamente compacto, cinza claro e amarelado;	AREN
722	0,8	9,14	16,57	29,37	12,80	Arenito de graduação fina, medianamente compacto, cinza claro e amarelado;	AREN
684	0,1	17,68	29,47	30,69	1,22	Arenito cinza claro, de rigidez média e granulação fina;	AREN
683	1,3	16,76	27,65	30,70	3,05	Arenito macio, cinza claro e marrom;	AREN
674	1	15,55	23,69	36,19	12,50	Arenito rígido cinza claro e amarelado;	AREN
674	1	15,55	36,19	37,11	0,91	Arenito cinza claro e castanho, mole;	AREN
750	0,2	13,7	22,95	24,47	1,52	Arenito mole, castanho e cinza claro;	AREN
673	1,15	14,94	26,90	35,43	8,53	Arenito mole, cinza claro e castanho;	AREN
673	1,15	14,94	35,43	50,37	14,94	Arenito mole, cinza claro e castanho: Muito mole abaixo de -31,4 m;	AREN
752	1	15,24	22,16	31,00	8,84	Arenito cinza claro macio, quebrado	AREN
671	0,6	12,2	24,71	30,19	5,49	Arenito macio, cinza claro, castanho e vermelho;	AREN
669	0,5	15,24	22,36	29,68	7,32	Arenito medianamente compacto, marrom e cinza claro.	AREN
679	1,4	18,6	21,77	30,61	8,84	Arenito mole, cinza claro.	AREN
678	1,2	18,29	21,05	30,50	9,45	Arenito mole, cinza claro e castanho.	AREN
746	0,4	14	25,79	31,58	5,79	Arenito medianamente compacto, cinza claro e castanho.	AREN
8A	0,85	18,28	28,40	31,15	2,74	Arenito mole, cinza claro.	AREN
6A	0,65	17,7	21,32	30,16	8,84	Arenito mole, cinza claro.	AREN
744	0,15	16,46	24,84	30,03	5,18	Arenito mole, cinza claro e castanho, de granulação grossa.	AREN
676	0,25	16,46	23,83	34,50	10,67	Arenito cinza mole	AREN
676	0,25	16,46	36,02	37,55	1,53	Arenito amarelado mole	AREN
685	0,05	17,68	23,73	31,35	7,62	Arenito cinza claro mole	AREN
675	1,15	16,15	24,14	30,24	6,10	Arenito Cinza claro mole	AREN
726	0,2	10,97	19,30	30,28	10,97	Arenito medianamente compacto, cinza e marrom	AREN
726	0,2	10,97	35,46	36,68	1,22	Arenito cinza claro com fissuras de argila	AREN
726	0,2	10,97	45,82	48,87	3,05	Arenito muito mole cinza claro com areia e fissuras de argila arenosa em -35,97m	AREN
727	0,9	9,75	22,87	51,83	28,96	Arenito medianamente compacto, cinza claro com fissuras de argila em -26,82 m. Com camadas muito rígidas de argila de -29,26 a -32,31m. Arenito mole em -32,31m com algumas fissuras de argila; - medianamente compacto em -35,36 m; - Mole com fissuras de argila em -38,4m; - medianamente compacto em -39,93 m; - Mole com fissuras de argila abaixo de -41,45m;	AREN

Com intuito de procurar estabelecer uma relação próxima de ambas as campanhas de sondagem, foram consideradas áreas de influência dos furos de 2011 sobre os furos de 1970 e assim poder considerar valores de resistência à compressão mais representativos do Modelo (Figura 4.7).

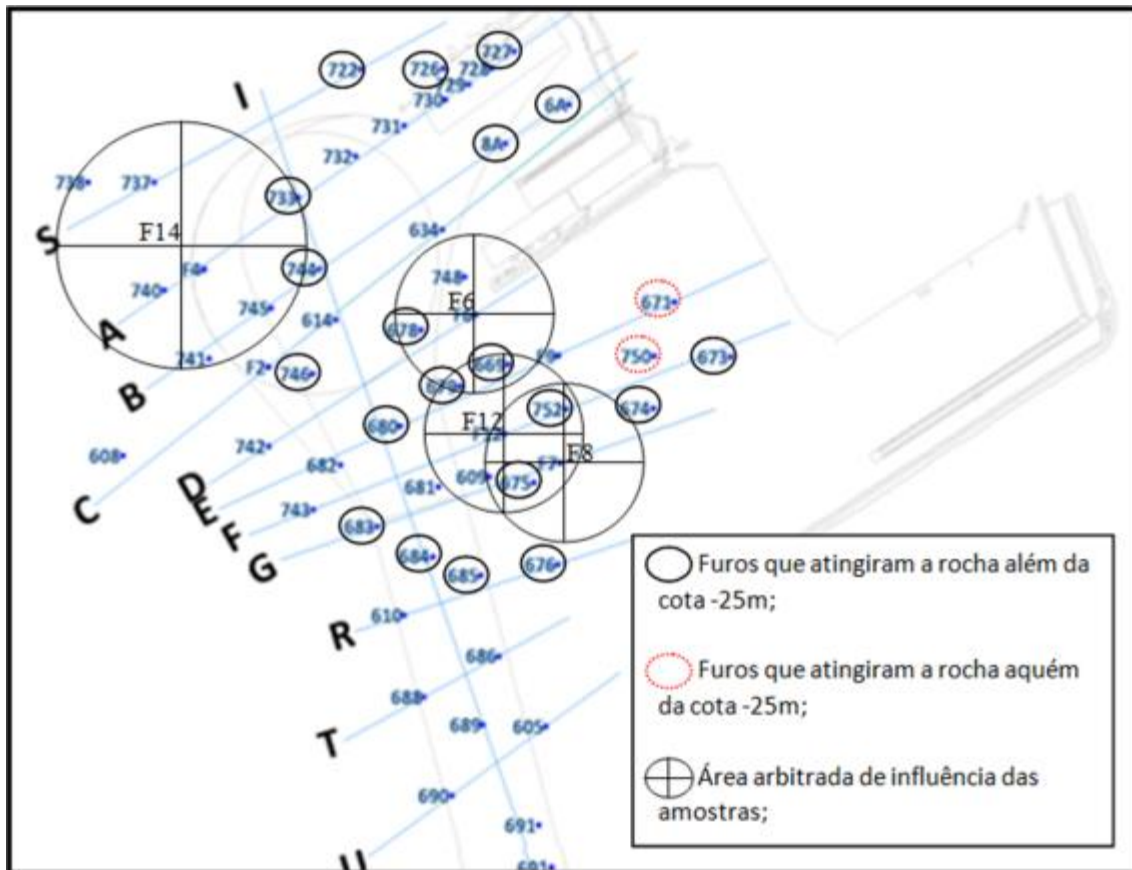


Figura 4.7.- Localização dos furos, da campanha de 1970, que atingiram a rocha além da cota -25m

Os critérios estabelecidos para correlação dos resultados dos ensaios dos furos de 2011 com os furos da década de 70 são:

1. Pertencer ao Canal de Acesso e Bacia de Evolução;
2. Deverá haver proximidade;
3. Os valores adotados de resistência deverão ser de amostras retiradas a profundidades superiores -25m;
4. Adotar os maiores valores de resistência;

Na área de influência do furo F14 estão os furos 733 e 744, ambos na Bacia de Evolução, que adotarão os mesmos valores de baixa resistência à compressão (0,70MPa) uma vez que apresentaram surgimento de arenito mole.

No furo F6, respeitando os critérios adotados, está inserido apenas o furo 678 com também surgimento de arenito mole e adotado o valor de 14,30MPa de resistência. Para o furo F12 foi considerado o furo 680 com material de arenito medianamente compacto e adotado o valor de 18,20MPa de resistência. Na influência do furo F8, adotou-se o furo 685 com arenito cinza-claro mole e valor de resistência arbitrado, segundo critérios, de 10,30MPa.

De maneira geral, no interior do Canal de Acesso e Bacia de Evolução, os resultados interpolados, apontaram para baixo grau de resistência à compressão do arenito, com o pico maior de 18,20MPa e mínimo de 0,70MPa, corroborado pelo fato de que todos os furos que apresentaram rocha no interior daquela área (733, 744, 746, 678, 680, 683, 684 e 685) apresentaram arenito mole ou meio duro em suas classificações. Para o Modelo Geológico proposto fica estabelecido, portanto, o valor de 18,20MPa como resistência a compressão deste arenito.

Desde a década de 70 houve várias dragagens e derrocagens de aprofundamentos e manutenções no Canal e Bacia, no intuito de manter a navegabilidade na cotas estabelecidas. Provavelmente estas intervenções desagregaram e fraturaram o maciço nestes locais, tonando suas resistências mais baixas na faixa até a cota de -30m aproximadamente.

Valores de resistência mais expressivos desta rocha são encontrados fora do Canal de Aproximação e Bacia de Evolução, principalmente nas áreas aonde foram realizados os furos F6, F8 e F12 (Sudeste da Doca), com valores de resistência chegando a 24,80MPa. Justamente nesta mesma região a geofísica de refração já apontava para as maiores velocidades observadas, variando de 2000 a 3200 m/s, indicando sedimentos muito compactados/consolidados e formação rochosa pouco desgastada.

É possível que neste local, o fato desta área ter sido preservada em sua condição primitiva, ou seja, sem intervenções de derrocagens, os valores mais elevados de resistência tenham sido preservados.

4.2.1.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios foram compilados na planilha da (Figura 4.8).

RESULTADOS					
CP N°.	Identificação	Diâmetro Médio (cm)	Altura (cm)	Carga (Kgf)	Resistência (MPa)
01	F6/R1	10,99	20,12	250	0,7
02	F6/R2	10,98	20,13	2100	6,1
03	F6/R3	10,91	20,11	23450	10,0
04	F8/R1	10,94	20,42	4700	13,4
05	F8/R2	11,04	20,52	4650	13,1
06	F8/R3	11,10	19,83	2550	7,4
07	F8/R4	10,95	20,29	3100	8,9
08	F8/R5	10,92	20,24	2200	6,3
09	F8/R6	11,07	19,99	2050	5,9
10	F8/R7	10,97	20,23	450	1,3
11	F10/R1	10,96	20,47	150	0,4
12	F12/R1	10,88	19,99	250	0,7
13	F14/R8	12,14	19,84	150	0,4
14	F14/R1	11,15	20,11	1700	4,8
15	F14/R2	10,91	20,22	2100	6,1

Figura 4.8 - Resultado de resistência à tração (Brazilian Split Test) do arenito (MC Solos, 2011).

Em conformidade com os resultados de resistência à compressão, os resultados da resistência à tração foram igualmente baixos no Canal de Acesso e Bacia de Evolução (F12 e F14). Em contrapartida, na área Sudeste da Doca (F6 e F8), apesar da grande dispersão observada, foram encontrados os maiores valores de resistência à tração. Foi estabelecido, portanto, o valor de 13,40MPa de resistência à tração, para representar topo o Modelo proposto.

Ao analisar-se os valores encontrados nos ensaios de compressão e de tração, pode-se concluir que o arenito é de fácil dragagem/derrocagem para futuras intervenções na área, utilizando-se o equipamento correto para este fim.

4.2.2. IDENTIDADE GEOTÉCNICA DO MODELO

Investigações	Resultados
Limites de Atterberg (argila)	
(LL)	42,25%
(LP)	23,16%
UN	8,80%
Granulometria (Areias)	
Areia Média	20% a 42%
Areia Fina	15% a 30%
Cisalhamento direto (argila)	0,61 / 1,02 / 1,89 Kgf/cm ²
Compressão simples (arenito)	18,20 MPa
Compressão diametral (arenito)	13,40 MPa

5. PROPOSIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO

5.1. SEÇÕES TRANSVERSAIS

Com a obtenção das campanhas de sondagens resgatadas, principalmente da década de 70, foi possível propor um Modelo Geológico para a Área de Estudo, subdividindo em seções transversais e permitindo as análises do solo com a Geofísica executada, no intuito de confirmar as informações iniciais e subsidiar a cubagem dos materiais para futuras expansões do Porto, auxiliando também na escolha das melhores métodos executivos para tal.

As seções transversais foram geradas considerando a simplificação de todos os materiais encontrados nas sondagens (areia, argila, argilito, arenito e siltito), ou seja, apenas dois tipos de materiais, tais como, sedimentos e rochas. Isto se deve ao fato de que o tipo de intervenção a ser realizada (dragagem), leva em consideração a dureza (baseado em compressão e tração) dos materiais da litologia da Área de Estudo. Esta condição é que define qual equipamento de corte ou sucção que será utilizado na obra.

Após as investigações realizadas encontrou-se, de maneira geral, uma camada superficial de areias argilosas (baixa consolidação) e argilas arenosas intercaladas entre si em diferenciação de espessura entre as mesmas, bem como argilas (medianamente compacta a compacta - tabatinga), podendo conter formações lateríticas (Formação Barreiras), típicas da região de estudo.

Abaixo destas camadas aparecem materiais rochosos classificados como arenitos, siltitos e argilitos, estes dois, com pouquíssima ocorrência. O arenito representa maiores complexidades para futuros aprofundamentos da área de estudo.

Do total do arenito a ser derrocado, 60% possui baixa velocidade de propagação na refração, ou seja, encontram-se menores valores de dureza (compressão e tração) para este material. Para os arenitos medianamente compactos, aproximadamente 36% correspondem do total encontrado e apenas 4% aponta para alta resistência (duro) com altas velocidades de propagação.

Para confirmação dos dados obtidos na Geofísica, foram utilizadas as campanhas de sondagens com a grande maioria das amostras retiradas e ensaiadas, apresentando baixos valores de resistência à tração/compressão, mostrando que o maior volume de derrocagem de arenito do projeto, constitui-se de baixa a média dureza e resistência.

Importante frisar que a linha tracejada em azul constante em todas as seções refere-se a atual cota (calado) do canal de acesso e bacia de evolução, que varia entre -25,00m e -26,00m, portanto, toda estratigrafia constante acima desta linha tem a função meramente ilustrativa e histórica, pois já foi dragada em aprofundamentos anteriores e não farão parte das análises. Em algumas seções a linha tracejada está acima da cota -25,00m, isto se deve ao fato da seção estar localizada fora do Canal e Bacia, ou seja, em locais mais rasos. A estratigrafia discretizada abaixo desta linha é a real proposição do Modelo e resultado de todos os estudos levantados anteriormente.

Na (Figura 5.1) apresenta-se o layout das seções transversais propostas.

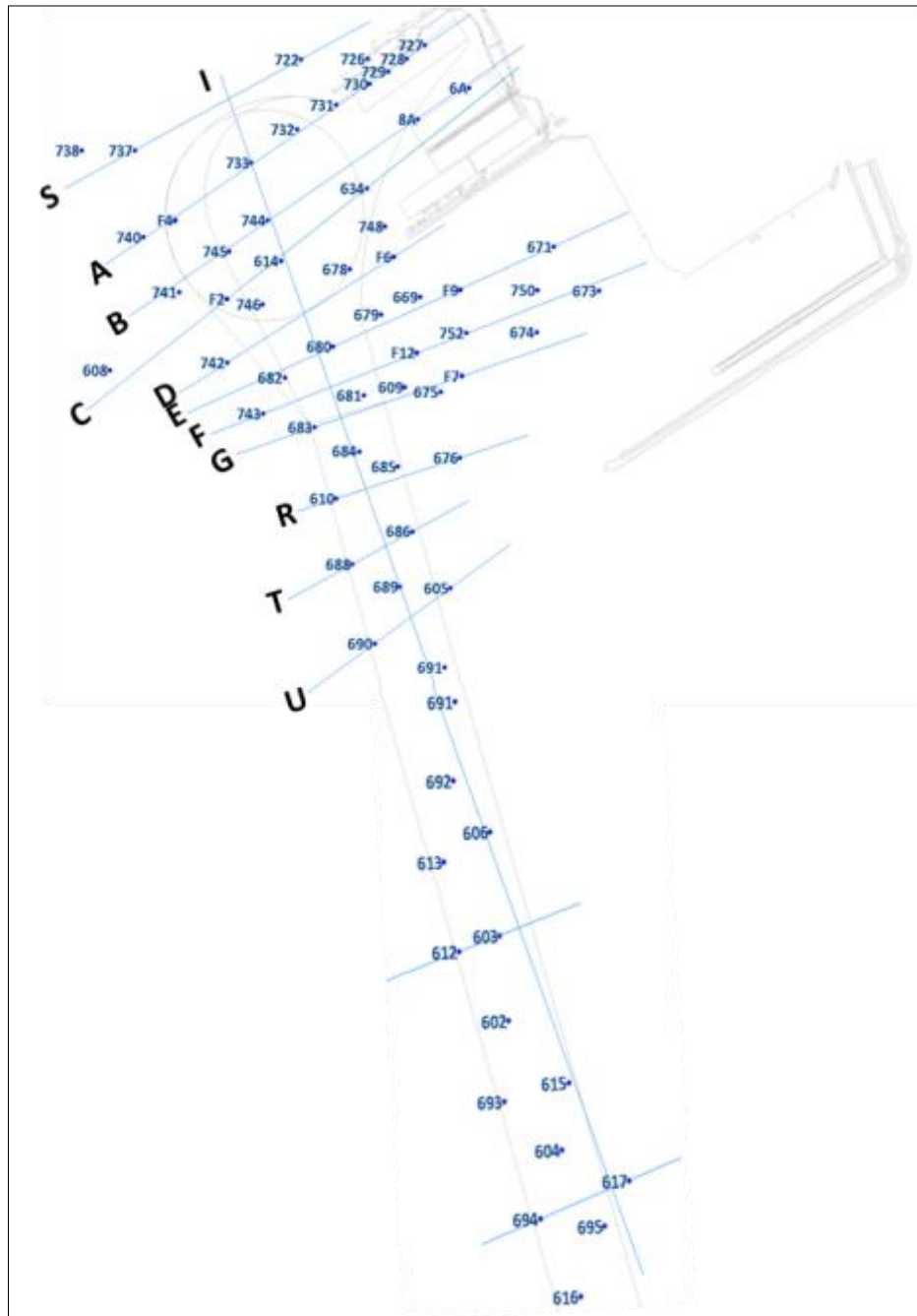


Figura 5.1 - Localização das seções transversais propostas no Modelo Geológico.

Para todo o Modelo Geológico proposto, foram adotados os valores de 0,7MPa de resistência a compressão, bem como 0,4MPa de resistência à tração.

5.1.1. SEÇÃO SS'

A seção SS' (Figura 5.2) localizada na porção mais ao norte da área de estudo, em local menos representativo, apresenta em sua maioria camada de argila rígida, arenosa, dura com rastros de arenito (737), mostrando claramente a transição para camada de rocha (arenito) presente na mesma (737/722). Isto vem a confirmar o levantamento geofísico de refração (Local Noroeste e Sudoeste) que apontou para sedimentos muito compactados/consolidados e rochas levemente desgastadas e/ou fraturadas. Quanto ao levantamento geofísico de reflexão no Compartimento 1, apontou para provável material arenoso. Acredita-se que isto se deve ao fato das amostras de materiais coletadas apresentarem composição arenosa.

5.1.1.1. Seção SS'

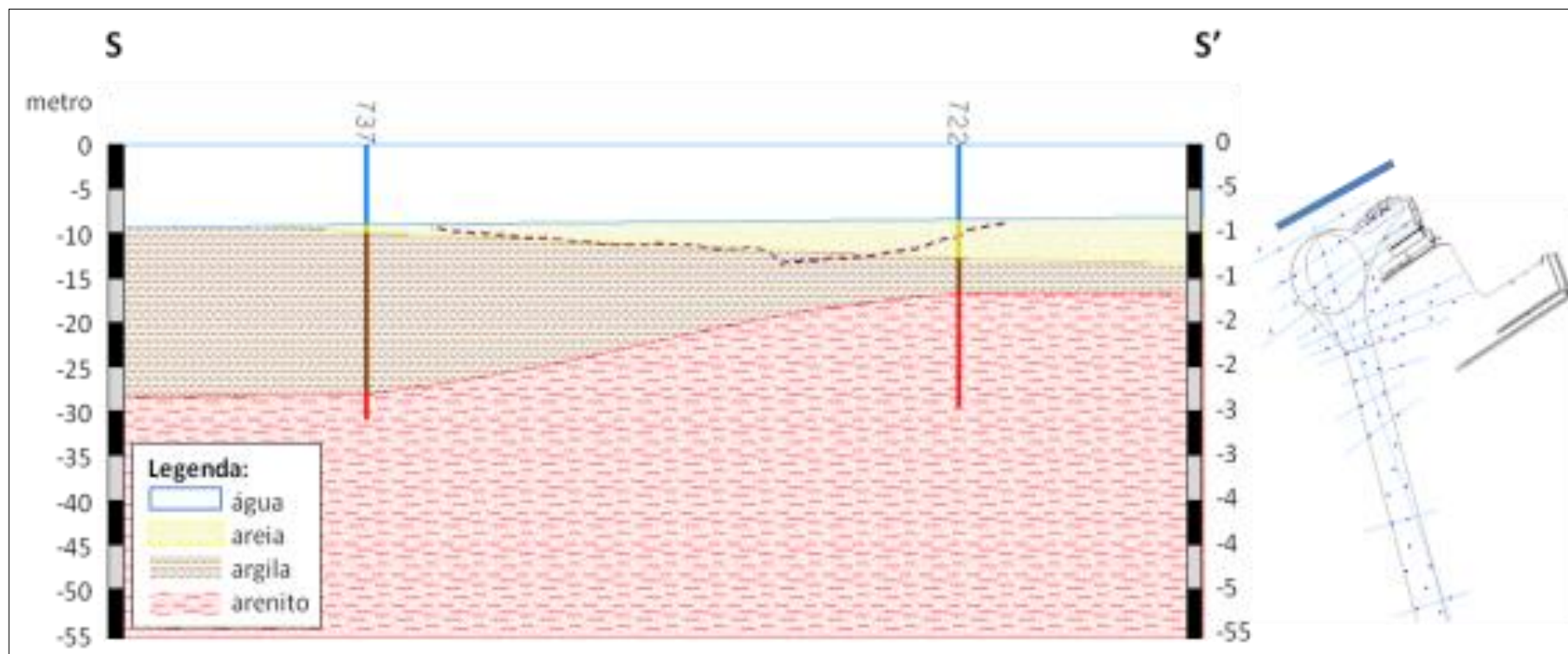


Figura 5.2 - Seção transversal SS' na porção mais ao norte da área de estudo. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.2. SEÇÃO AA´

A seção AA´ (Figura 5.3) foi considerada uma das principais seções neste estudo em função da sua localização (bacia de evolução) e por apresentar em quase sua totalidade arenito a partir de -26,00m. A geofísica de refração já apontava para existência de sedimentos muito compactados/consolidados e rochas levemente desgastadas e/ou fraturadas nesta região, diferentemente da geofísica de reflexão que apontou para dificuldades de propagação do sinal por encontrar espessuras sedimentares com elevadas densidades.

Acredita-se que este provável desgaste/fraturamento seja em função das intervenções de dragagens/derrocagens, na faixa até -30m, sofridas na Bacia de Evolução desde inauguração do Porto. Isto pode ter influenciado na diminuição das resistências encontradas nos ensaios. Nas campanhas de sondagens foram encontradas formações rochosas até a cota de -53,00m, com o Modelo sendo extrapolado até a cota de -55,00m.

5.1.2.1 Seção AA'

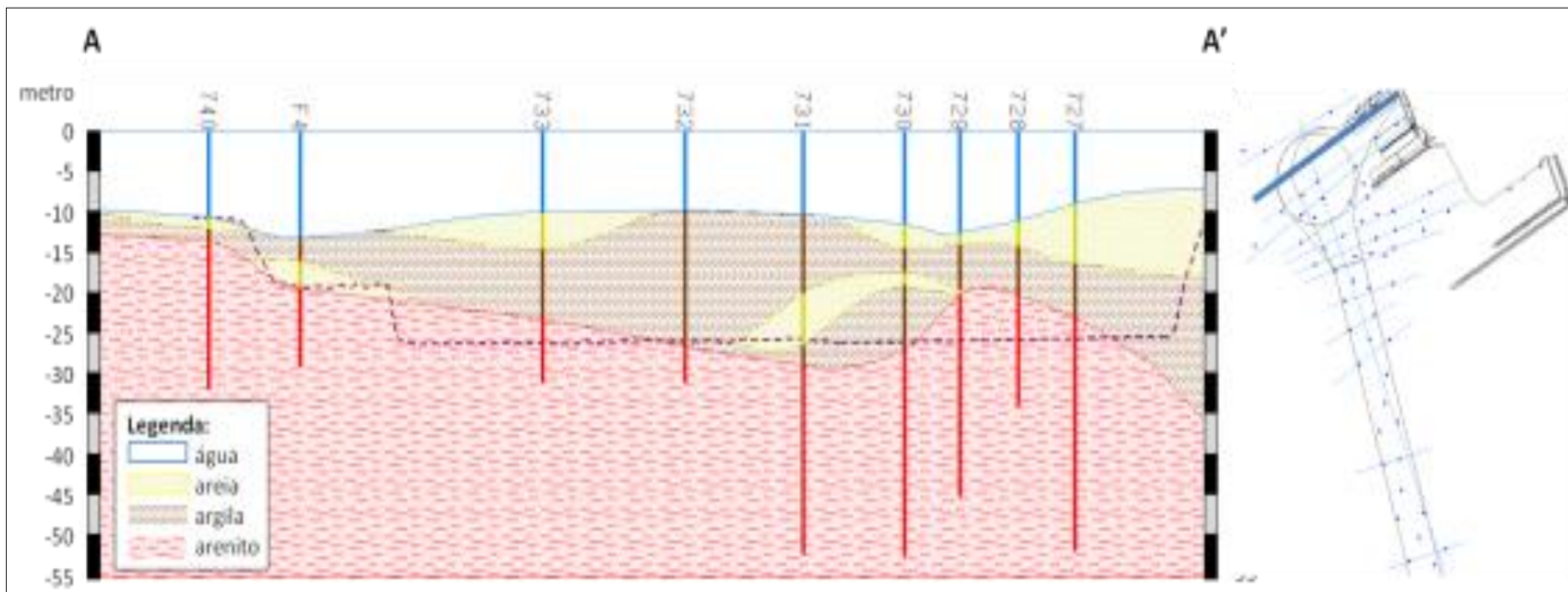


Figura 5.3 - Seção AA'. Está entre as seções mais importante do Modelo, uma vez que foi definida para contemplar a estratigrafia da bacia de evolução dos navios e a entrada do pier 2 do Porto. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.3. SEÇÃO BB´

Esta seção transversal (Figura 5.4) apresenta elevada espessura de areia fina/média/grossa fora da bacia de evolução (608) não contemplado nas análises geofísicas, bem como argila arenosa enrijecida (614) e uma lente de areia cinza fina a média com traços de material orgânico (634). Nos levantamentos geofísicos a interpretação foi a mesma que na seção AA´, ou seja, confirmada a geofísica de refração e certa indefinição da geofísica de reflexão.

Apenas o furo 6A (década de 70), pertencente a região de atracação dos navios, apontou para formação de arenito mole, ratificando os baixos valores de resistência à compressão e tração do Modelo.

5.1.3.1. Seção BB'

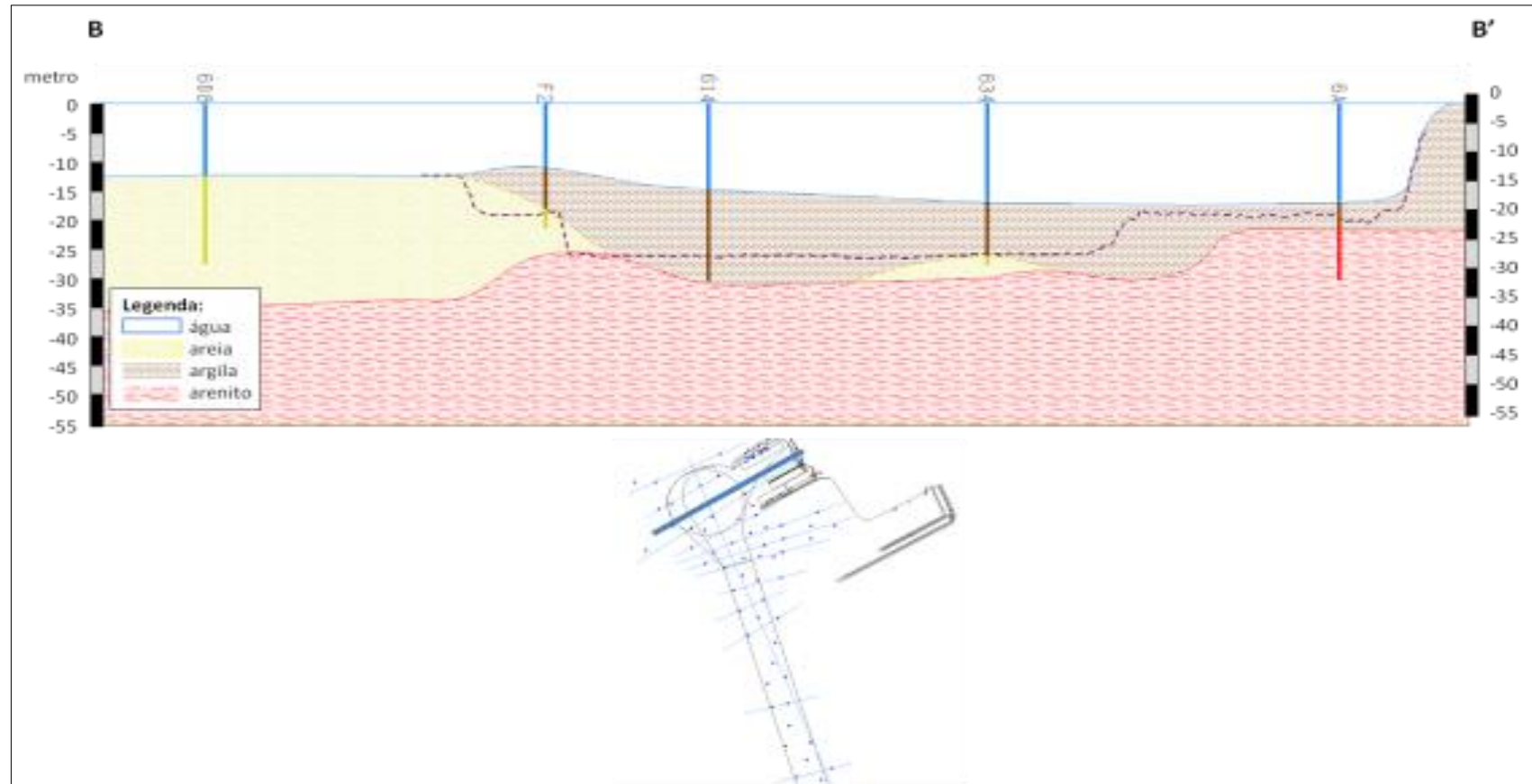


Figura 5.4 - Seção BB'. Juntamente com a seção AA' está entre as mais importantes e foi idealizada com o mesmo embasamento da seção AA'. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.4. SEÇÃO CC'

A seção (Figura 5.5), principalmente na parte central da bacia de evolução, possui uma lente de argila arenosa cinza, compacta a rija (8A), em transição ao arenito mole, cinza claro dominante na área.

Há ocorrência desta argila, nas mesmas características citadas acima, na periferia da bacia (741/745), tornando-se fonte importante de informação para futuros alargamentos desta área.

Nos levantamentos geofísicos a interpretação foi a mesma que na seção AA', ou seja, confirmada a geofísica de refração e certa indefinição da geofísica de reflexão.

5.1.4.1. Seção CC'

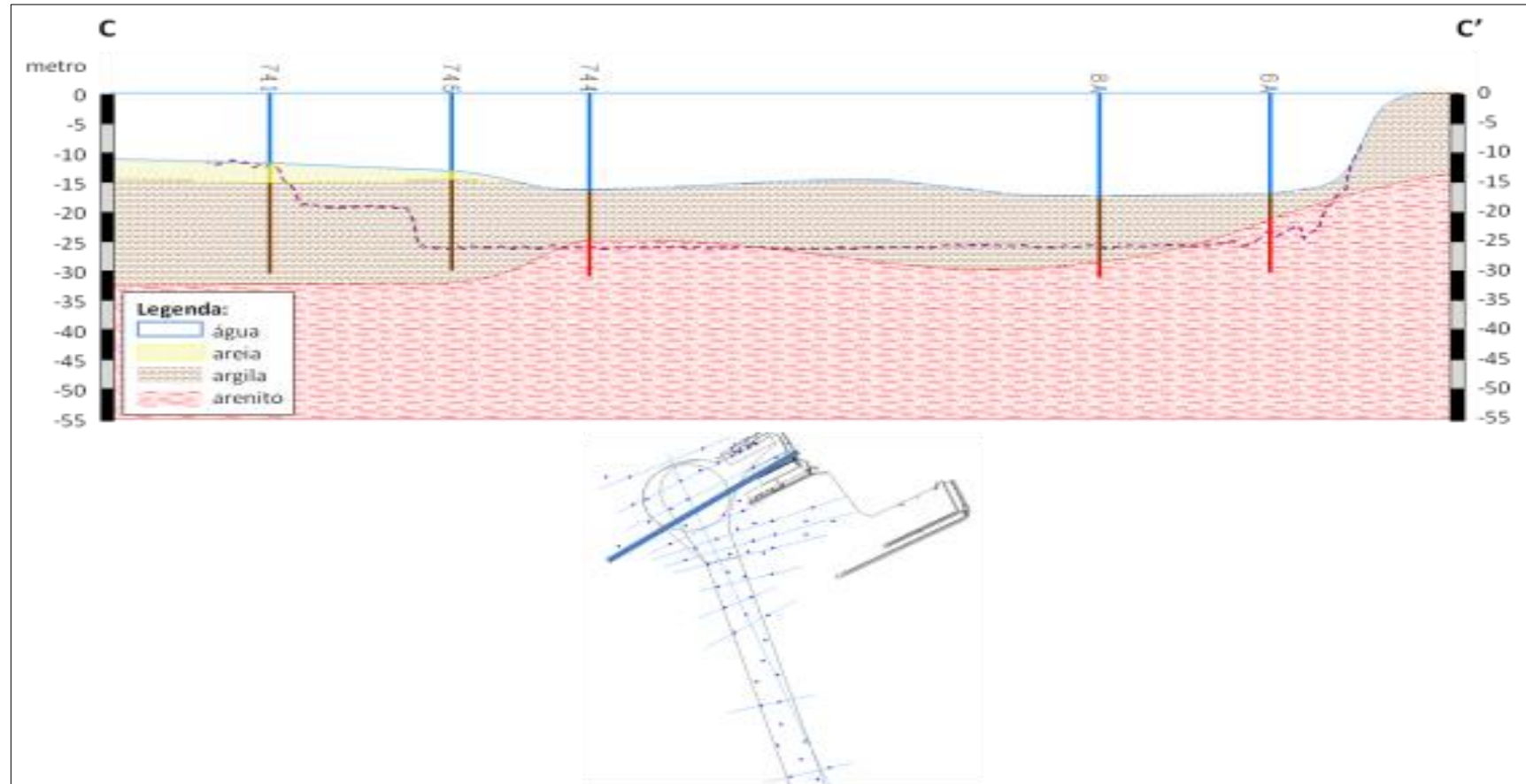


Figura 5.5 - Seção CC'. Igualmente importante por suas características geográficas estabelecidas para o Modelo. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.5. SEÇÃO DD'

A seção DD' (Figura 5.6) localiza-se na entrada da bacia de evolução e apresenta formação rochosa a partir da linha tracejada (678) na cota -26,00m, confirmada pela sondagem vizinha (F6). Ocorre o surgimento de lente de pequena espessura de areia cinza fina a média e argila arenosa cinza clara fina a média, pouco sedimentada, na periferia da entrada da bacia (742).

A geofísica de reflexão apresentou espessuras sedimentares menos representativas com elevada densidade e dificultado a penetração do sinal, enquanto que a geofísica de refração apresentou velocidades na faixa de 2000m/s a 3200m/s, indicando sedimentos muito compactados/consolidados e locais de formação rochosa.

5.1.5.1. Seção DD'

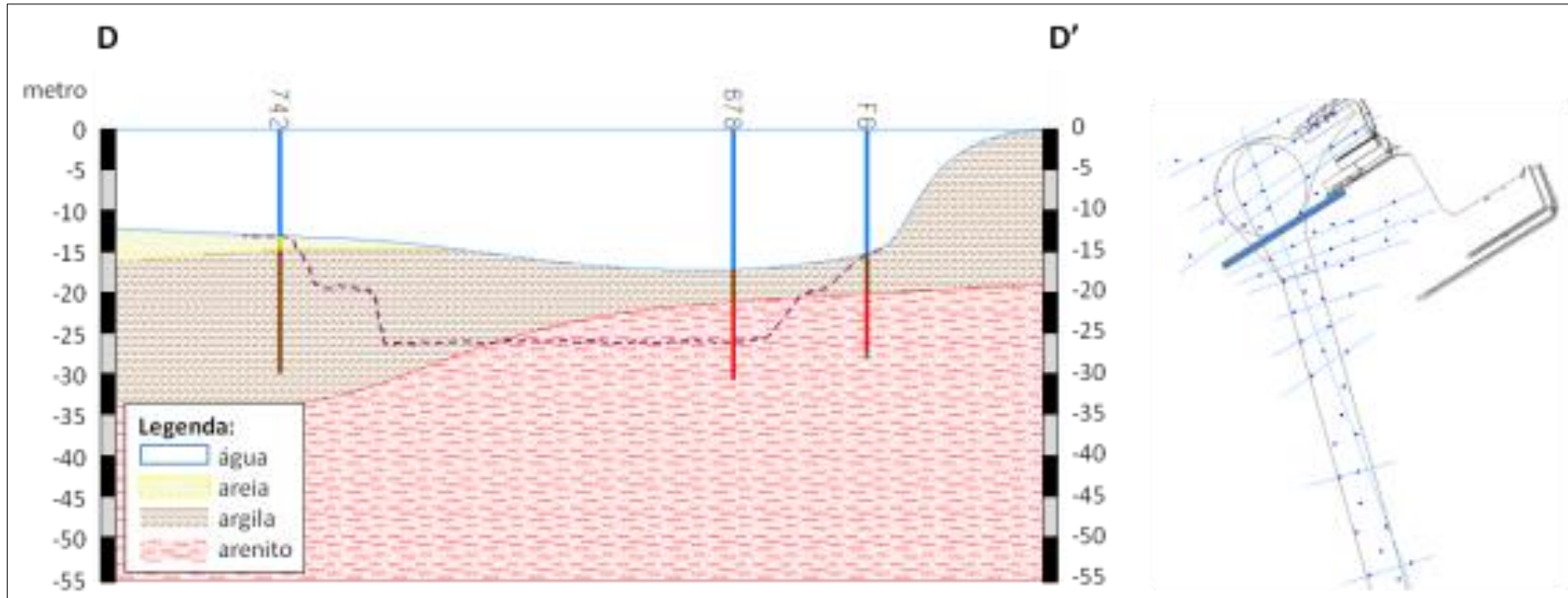


Figura 5.6 - Seção DD'. Situada na entrada da bacia de evolução. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.6. SEÇÃO EE´

Localizada ao norte do canal de acesso e pertencente ao funil de entrada da bacia, esta seção (Figura 5.7) caracteriza-se pelo surgimento de arenito medianamente compacto, com expressiva camada de areia fina a média, ligeiramente argilosa (682).

Em meio a extensa e rasa camada de argila arenosa muito rija, pertencente à área de escape (679/669/F9/671) são encontradas duas ocorrências de areia silto-argilosa, com areia média quartzosa em transição ao arenito fino a grosso quartzoso, com marcações de minerais escuros (provável laterita da Formação Barreiras).

A geofísica de reflexão apresentou provável sedimento de baixa consolidação e maior porosidade, enquanto que a geofísica de refração apresentou velocidades na faixa de 2000m/s a 3200m/s, indicando sedimentos muito compactados/consolidados e locais de formação rochosa.

5.1.6.1. Seção EE'

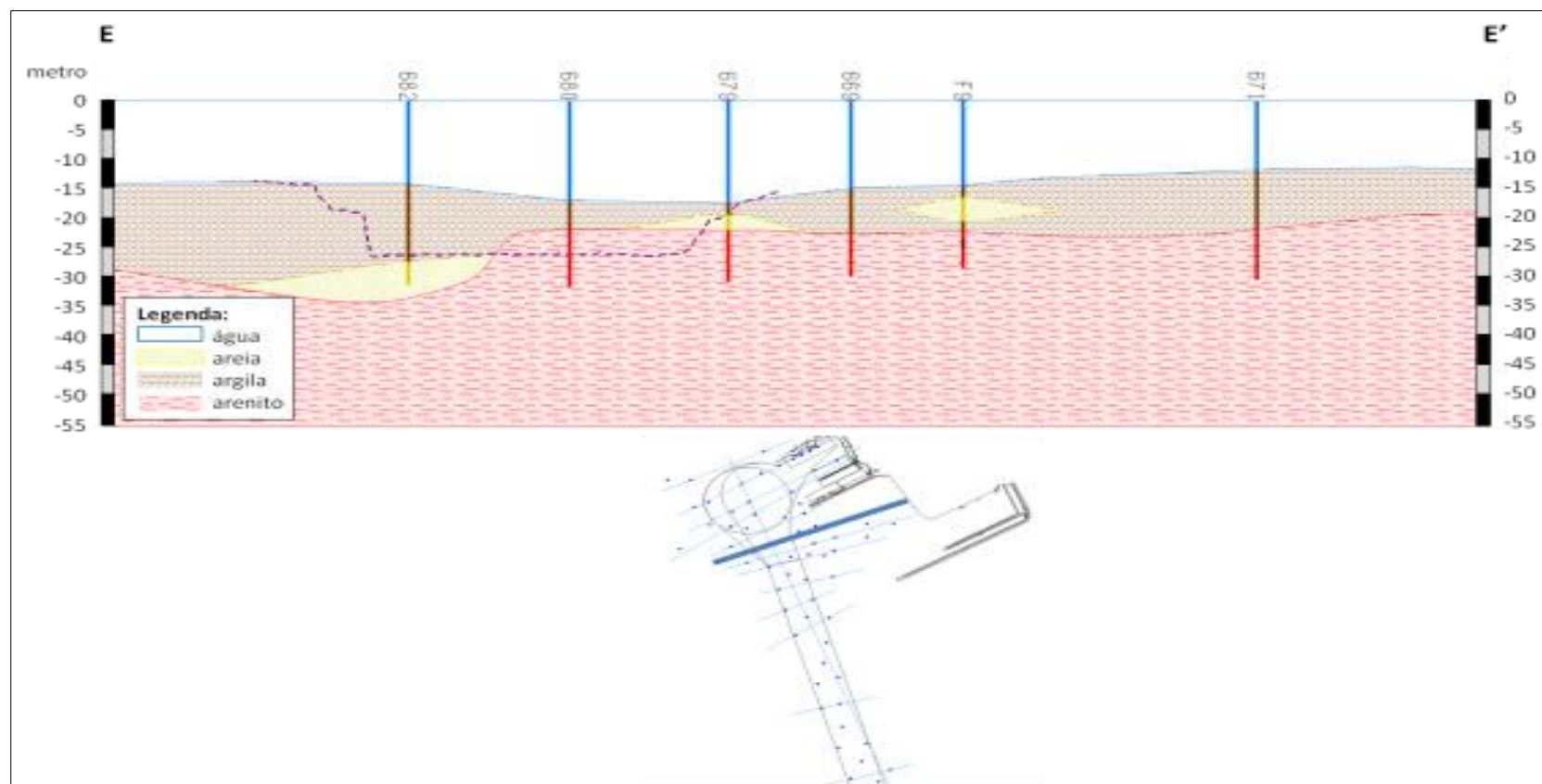


Figura 5.7 - Seção EE'. Pertence ao funil de aproximação da bacia de evolução. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta abaixo da seção.

5.1.7. SEÇÃO FF'

Abaixo da linha que delimita a atual cota de navegação do canal, há forte ocorrência de argila muito arenosa, rija, cinza claro e vermelho (743) em transição ao arenito composto por grãos de quartzo dominante em toda área (Figura 5.8).

Para região de escape (F12/752/750/673) considerável espessura de argila arenosa muito rígida antecedendo a ocorrência do arenito e com uma esbelta lente de areia fina a média, castanho, tendendo a siltoso cinza.

A geofísica de reflexão apresentou provável sedimento de baixa consolidação e maior porosidade, enquanto que a geofísica de refração apresentou velocidades na faixa de 2000m/s a 3200m/s, indicando sedimentos muito compactados/consolidados e locais de formação rochosa.

5.1.7.1. Seção FF'

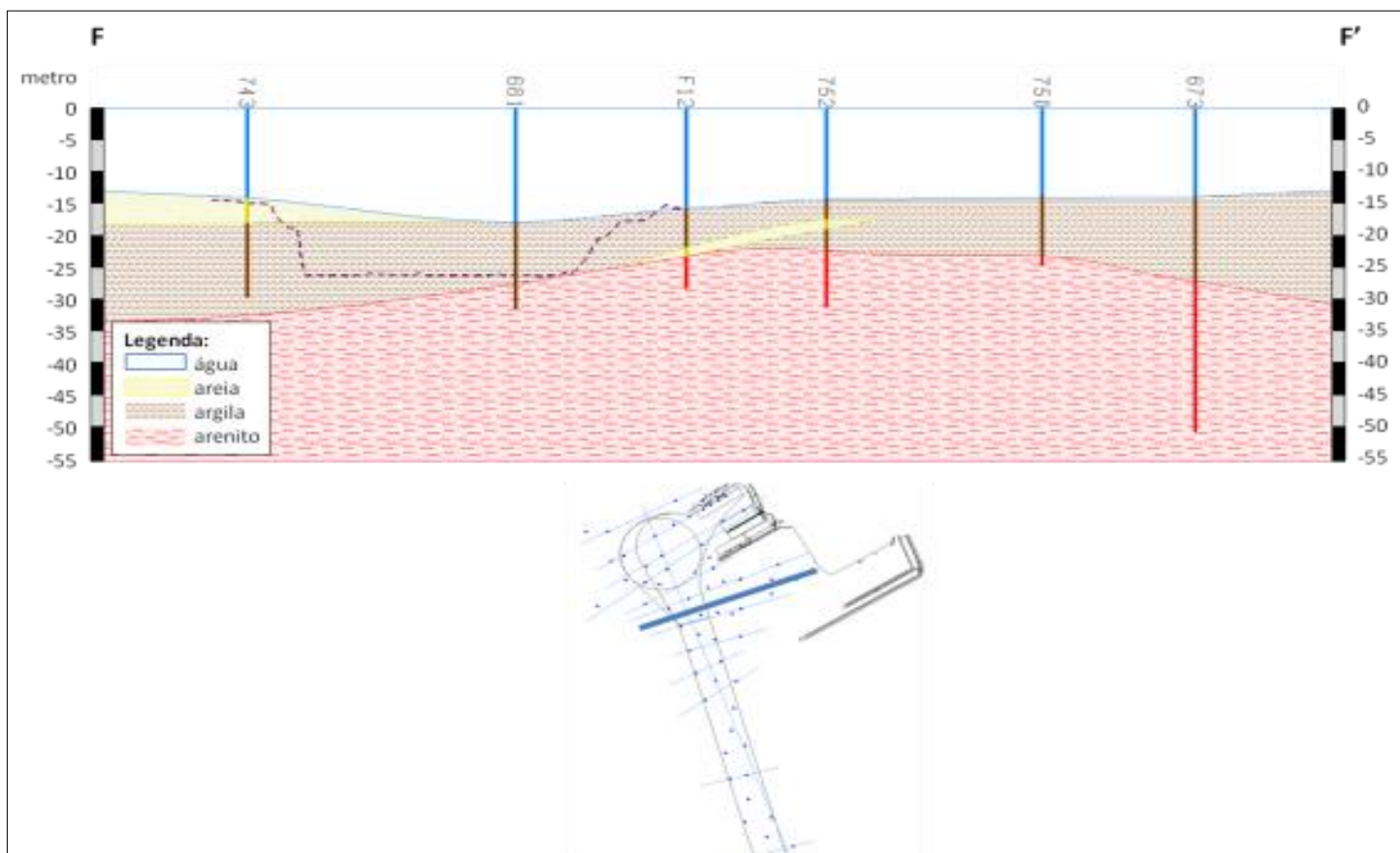


Figura 5.8 - Seção FF'. Já pertencente totalmente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta abaixo da seção.

5.1.8. SEÇÃO GG´

Na seção (Figura 5.9) há considerável ocorrência de argila muito arenosa, rija, (683/681) em transição ao arenito macio iniciando na cota -27,65m no canal de acesso. Para região de escape (609/675/F7/674) há ocorrência superficial de areia amarelada fina a média e de argila arenosa compacta, cinza claro e castanho.

O arenito já ocorre na cota -23,00m fora do canal de acesso e em -27,65m no interior do mesmo.

A geofísica de reflexão apresentou provável sedimento de baixa consolidação e maior porosidade, enquanto que a geofísica de refração apresentou velocidades na faixa de 2000m/s a 3200m/s, indicando sedimentos muito compactados/consolidados e locais de formação rochosa.

5.1.8.1. Seção GG'

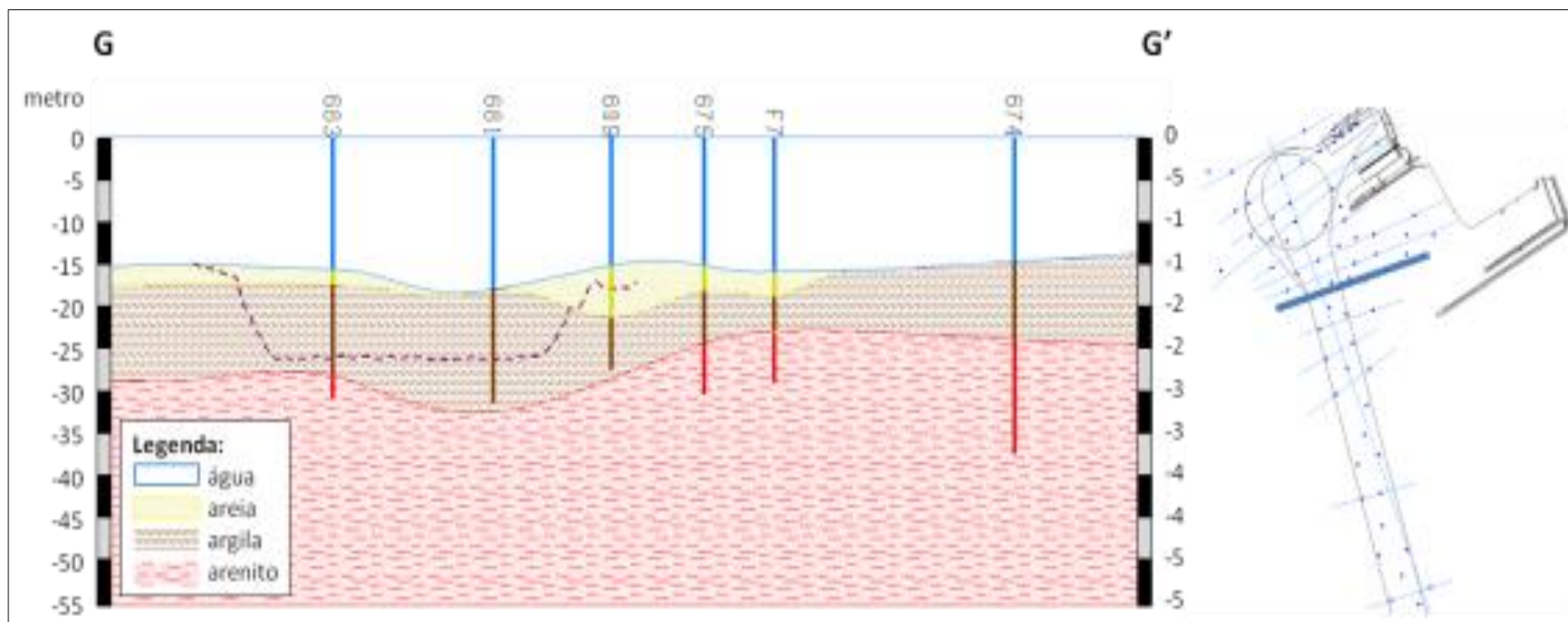


Figura 5.9 - Seção GG'. Pertencente totalmente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.9. SEÇÃO RR'

A seção RR' (Figura 5.10) pertence exclusivamente ao canal de acesso em sua porção norte e é verificada com uma lente de areia fina a média amarelada (610) e arenito cinza claro mole sob o canal e na entrada da área de escape (676), onde surge uma pequena camada de areia fina a média amarelada e considerável camada de argila arenosa firme.

Não foi realizado levantamento de geofísica de refração ao longo do canal de acesso. A geofísica de reflexão apontou padrão similar ao Compartimento 1, com maiores espessuras e provável sedimentos de baixa consolidação e maior porosidade, interpretado e atribuído a grande ocorrência de areia na seção.

5.1.9.1. Seção RR'

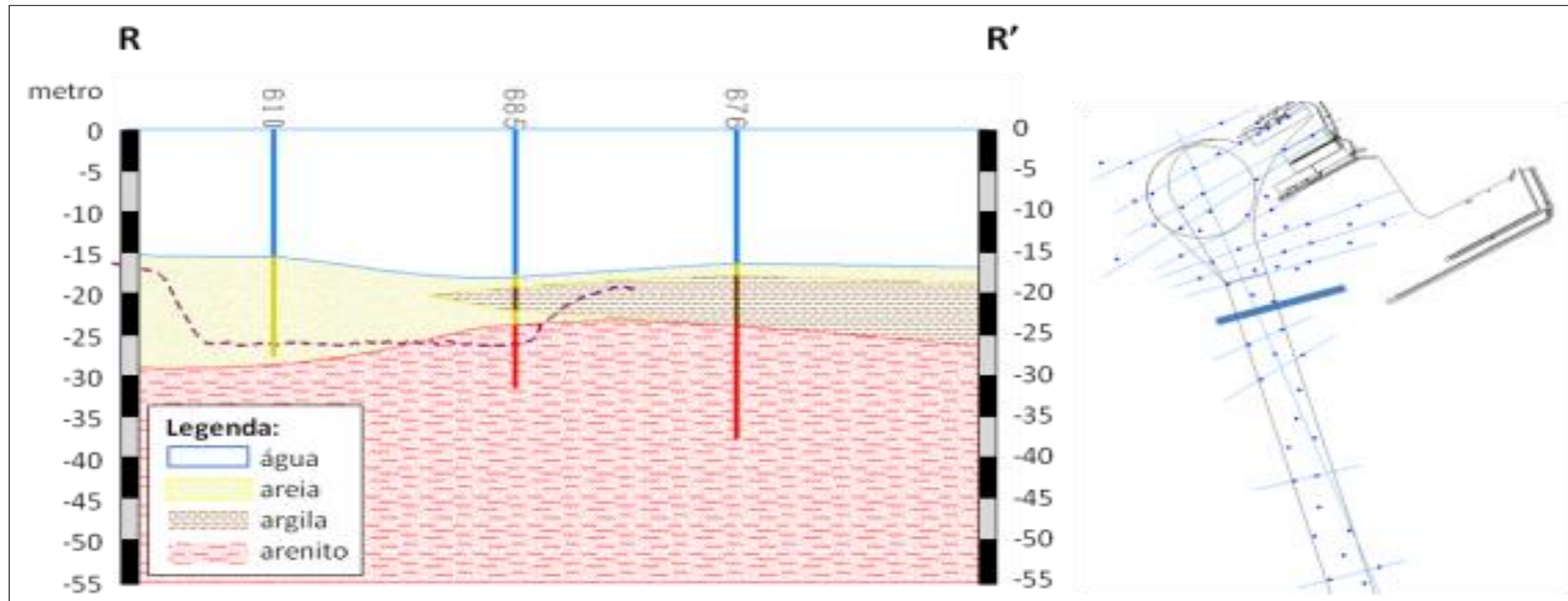


Figura 5.10 - Seção RR'. Inserida no canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.10. SEÇÃO TT'

Seção exclusivamente do canal de acesso (Figura 5.11) onde há surgimento de argila cinza firme e areia cinza fina a média sob o mesmo, com forte ocorrência de camadas de areias e argilas em sua periferia.

A ocorrência do arenito na seção é uma extrapolação e uma proposição de ocorrência, uma vez que não foram realizados ensaios de geofísica e os furos resgatados da década de 70 ocorrem até a cota de -32,87m neste local. Não há furos de sondagens recentes nesta região.

5.1.10.1. Seção TT'

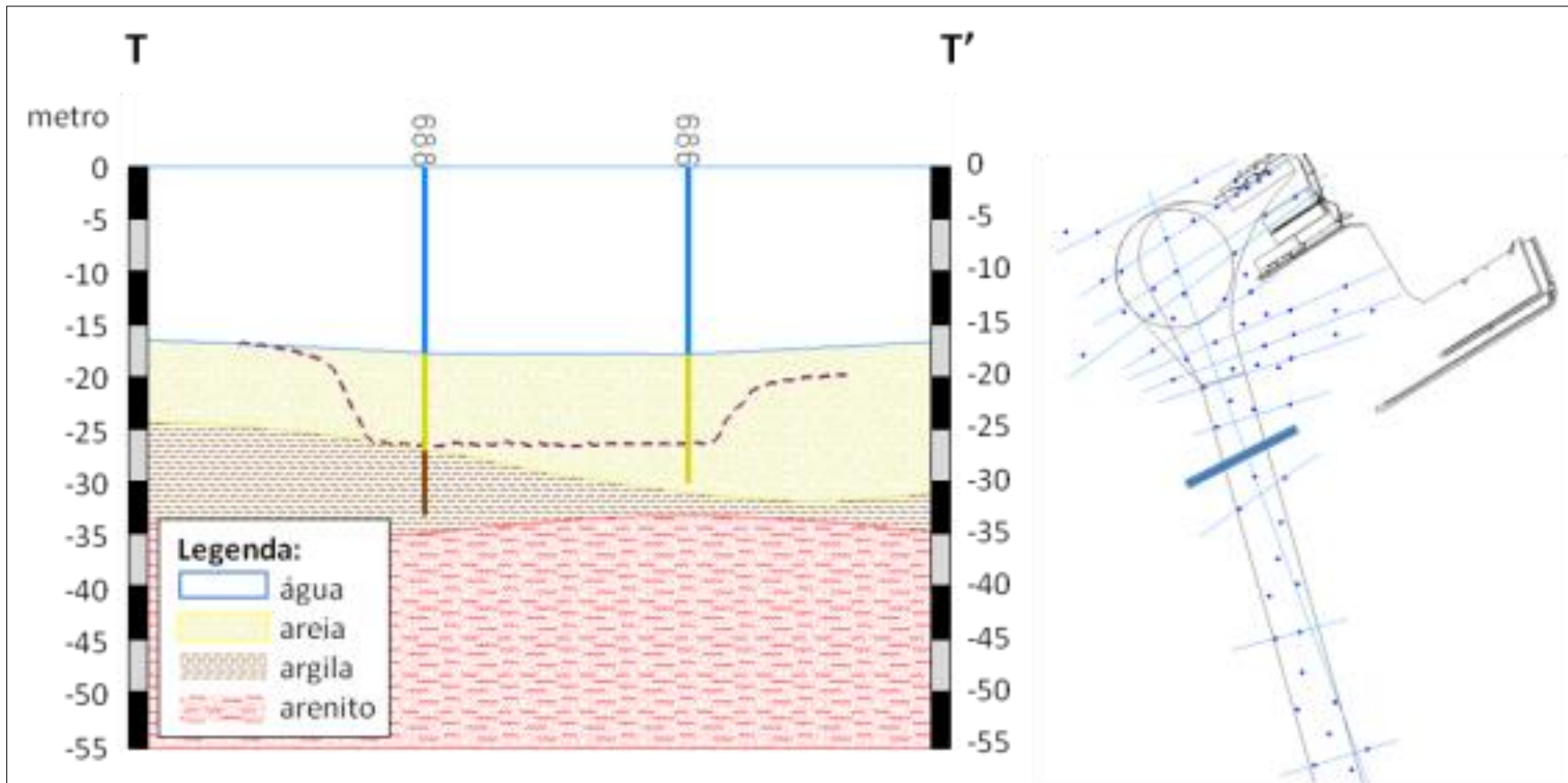


Figura 5.11 - Seção TT'. Pertencente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.11. SEÇÃO UU'

Seção exclusivamente do canal de acesso (Figura 5.12) onde há surgimento a partir de -27,50m de variação de argila cinza firme bem condensada para argila siltosa e areia amarela rosada fina a média com fragmentos de conchas em toda região.

A ocorrência do arenito na seção é uma extrapolação e uma proposição de ocorrência, uma vez que não foram realizados ensaios de geofísica e os furos resgatados da década de 70 ocorrem até a cota máxima de -28,72m neste local. Não há furos de sondagens recentes nesta região.

5.1.11.1. Seção UU'

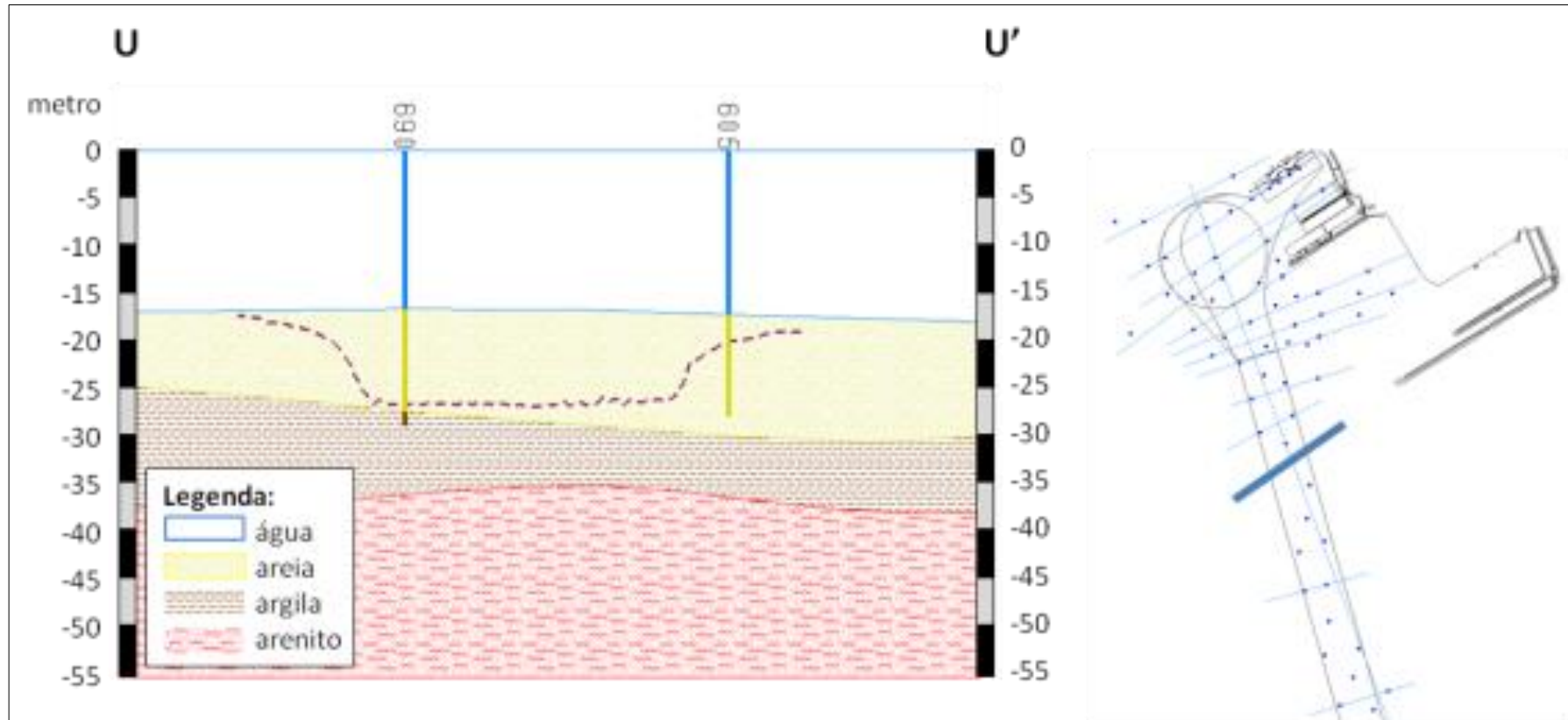


Figura 5.12 - Seção UU' pertencente ao canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.12. SEÇÃO VV'

Nesta seção (Figura 5.13) ocorre areia amarelada grossa sob o canal de acesso com uma lâmina de argila orgânica firme, com pedaços de madeira e forte odor de sulfeto de hidrogênio, a sudoeste do canal.

A ocorrência do arenito na seção é uma extrapolação e uma proposição de ocorrência, uma vez que não foram realizados ensaios de geofísica e os furos resgatados da década de 70 ocorrem até a cota máxima de -28,14m neste local. Não há furos de sondagens recentes nesta região.

5.1.12.1. Seção VV'

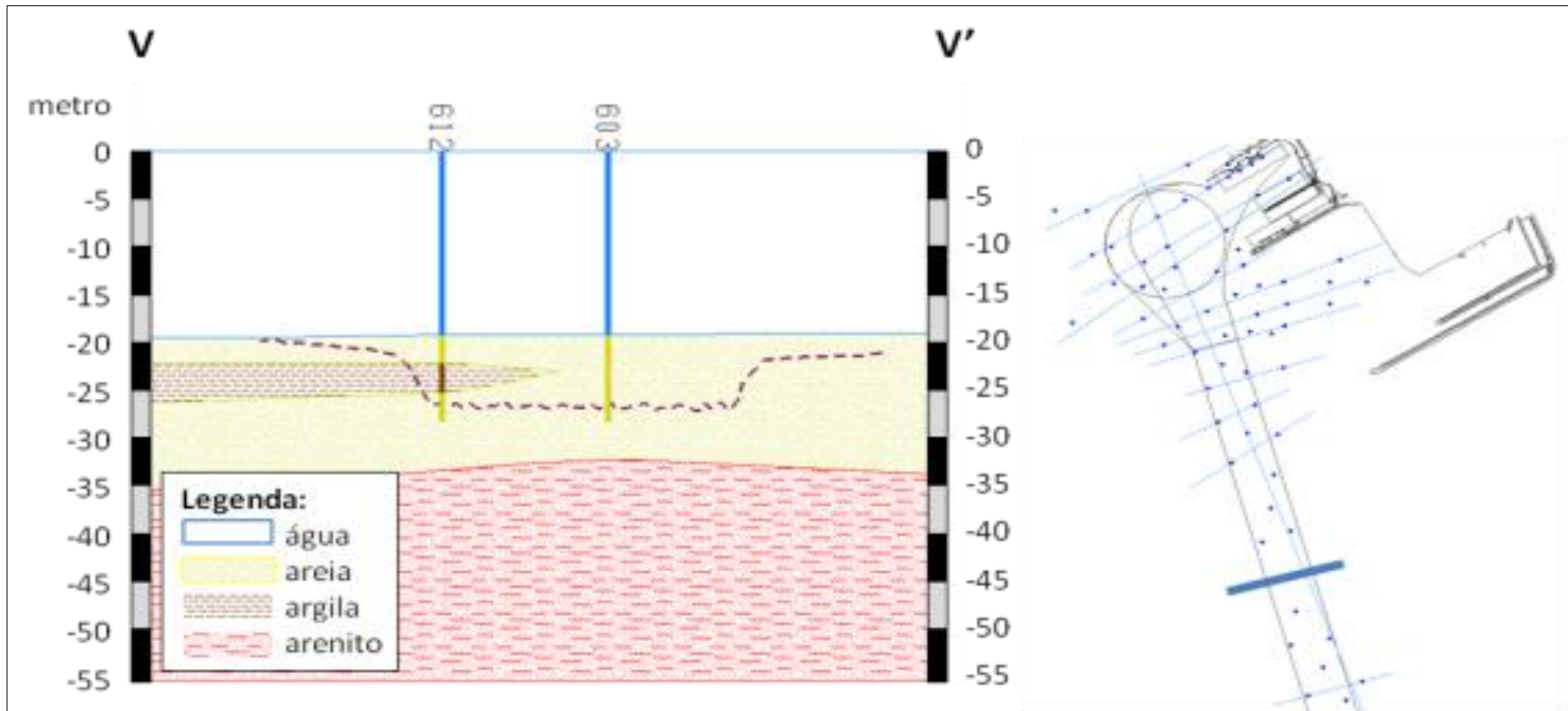


Figura 5.13 - Seção VV' do canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.13. SEÇÃO XX´

Nesta seção (Figura 5.14) ocorre areia amarelada grossa sob o canal de acesso e argila cinza mole com bolsões de areia e fragmentos de conchas em toda sua periferia sudoeste e sudeste.

A ocorrência do arenito na seção é uma extrapolação e uma proposição de ocorrência, uma vez que não foram realizados ensaios de geofísica e os furos resgatados da década de 70 ocorrem até a cota máxima de -30,29m neste local. Não há furos de sondagens recentes nesta região.

5.1.13.1. Seção XX'

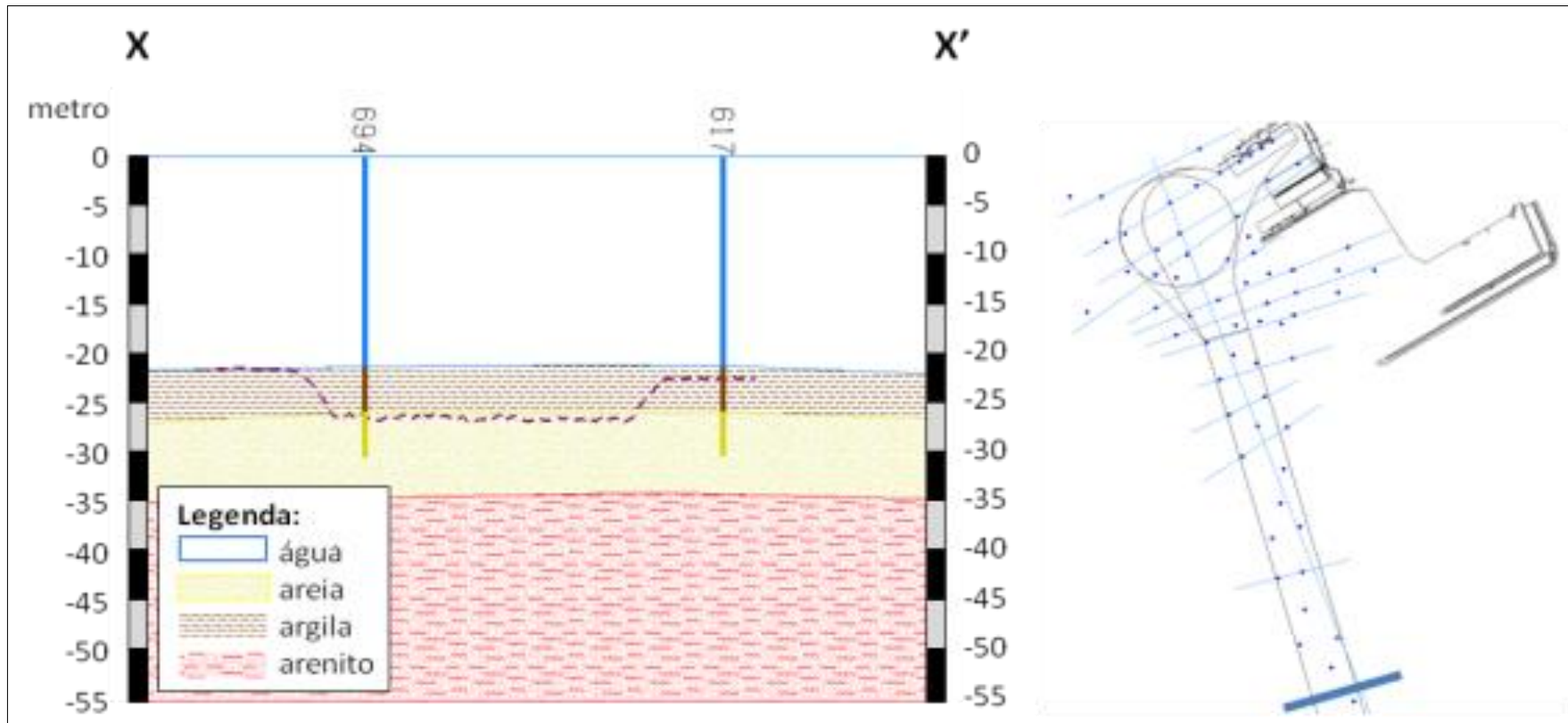


Figura 5.14 - Seção XX'. Última seção transversal do canal de acesso e exemplo da continuidade e padrão de ocorrência sedimentar (areia e argila) ao longo do canal de acesso. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.1.14. SEÇÃO II'

A seção longitudinal II' (Figura 5.15) estabelece uma relação entre todas as seções transversais do Modelo. Foi utilizada, entre outras seções, para aferir a estratigrafia cruzando as cotas de cada camada do Modelo. Isto permitiu maior aderência e credibilidade aos levantamentos.

Na entrada da bacia de evolução (681) e em seu funil de aproximação (684), confirma-se a presença de argila arenosa enrijecida apontadas nas seções AA', BB', CC' e DD' sob a cota de navegação atual. A partir daí (689), o surgimento de areia passa a ser uma constante em quase todo canal de aproximação, sendo intercalado com penetrações de argila.

Pode-se observar que a partir do furo 684, sentido entrada do canal, não há mais ocorrência de arenito na estratigrafia das sondagens, portanto, a ocorrência do arenito a partir deste ponto é uma extrapolação e uma proposição de ocorrência, uma vez que não foram realizados ensaios de geofísica nem furos adicionais confirmando.

5.1.14.1. Seção II'

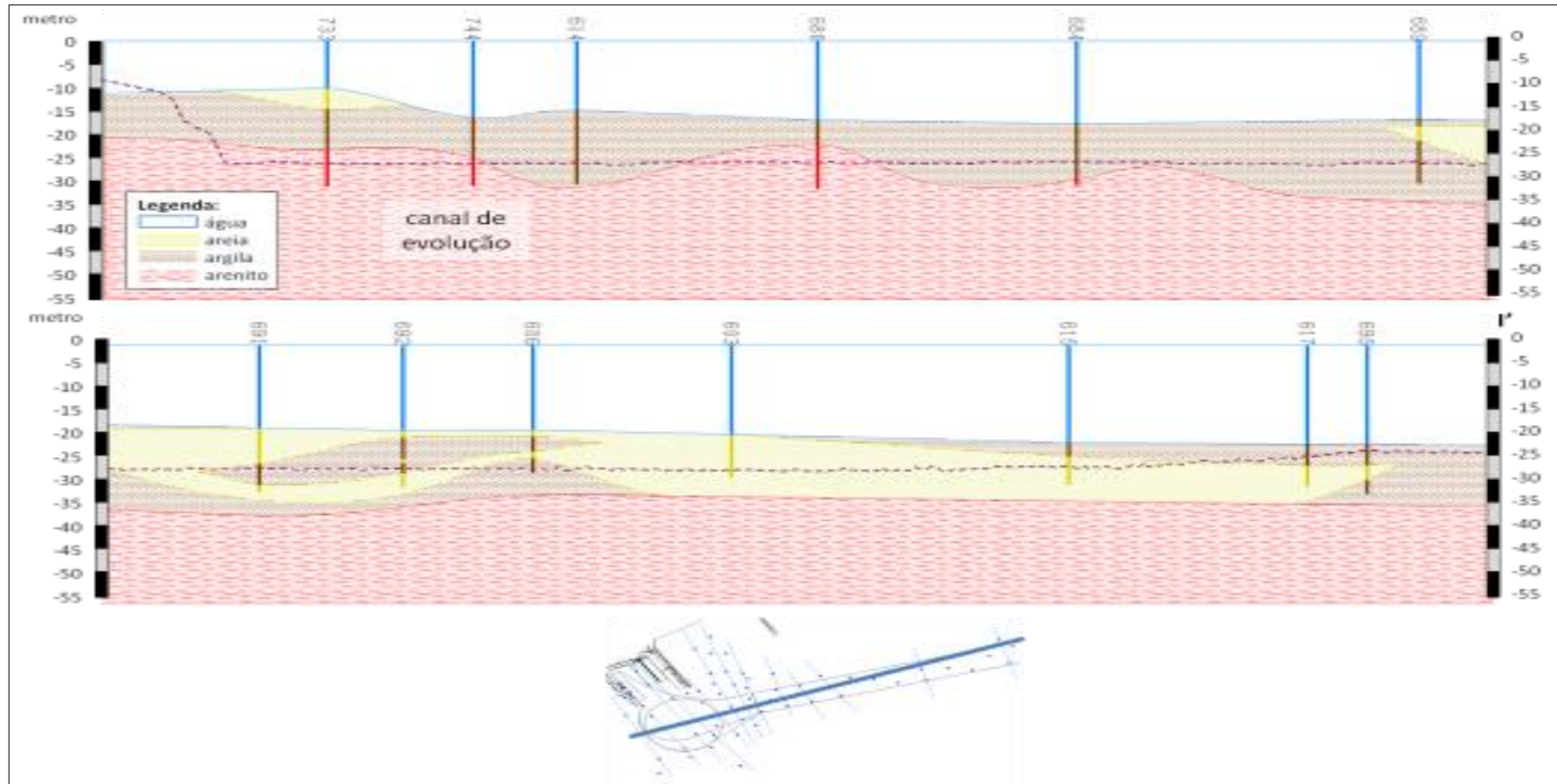


Figura 5.15 - Seção II'. Foi projetada para cobrir longitudinalmente toda área de estudo, a fim de confirmar as informações obtidas nas seções trasnversais, bem como cruzar a litologia da área. Esta seção longitudinal estabelece uma clara noção da estratigrafia existente na área como um todo. A seção transversal está representada pela linha azul ressaltada na planta ao lado.

5.2. MODELAGEM 3D

Na modelagem foram lançados todos os furos das campanhas conforme descritos no Capítulo 3. Com o resgate da batimetria realizada em 2013, onde consta o atual canal de navegação, variando entre as cotas -25,00m e -26,00m, pode-se modelar a situação atual em 3-D (Figuras 5.16 e 5.17) e lançar o fundo oceânico (Figura 5.18).

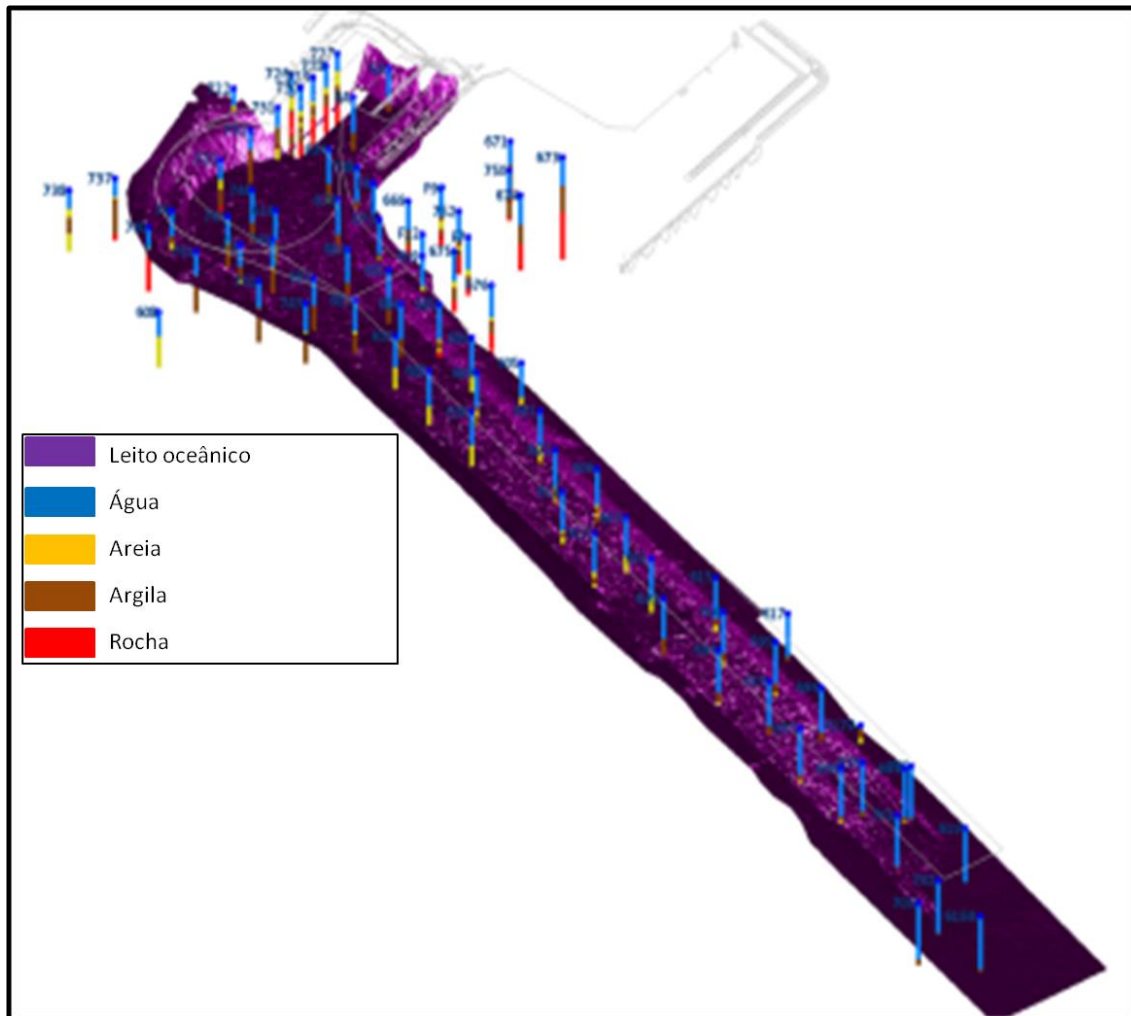


Figura 5.16 - Atual canal de navegação dragado em 2012/2013. Pode-se observar a calha de navegação desde a entrada do canal até a bacia de evolução. Foram lançados os furos de sondagem de ambas as campanhas para melhor visualização e entendimento de suas localizações.

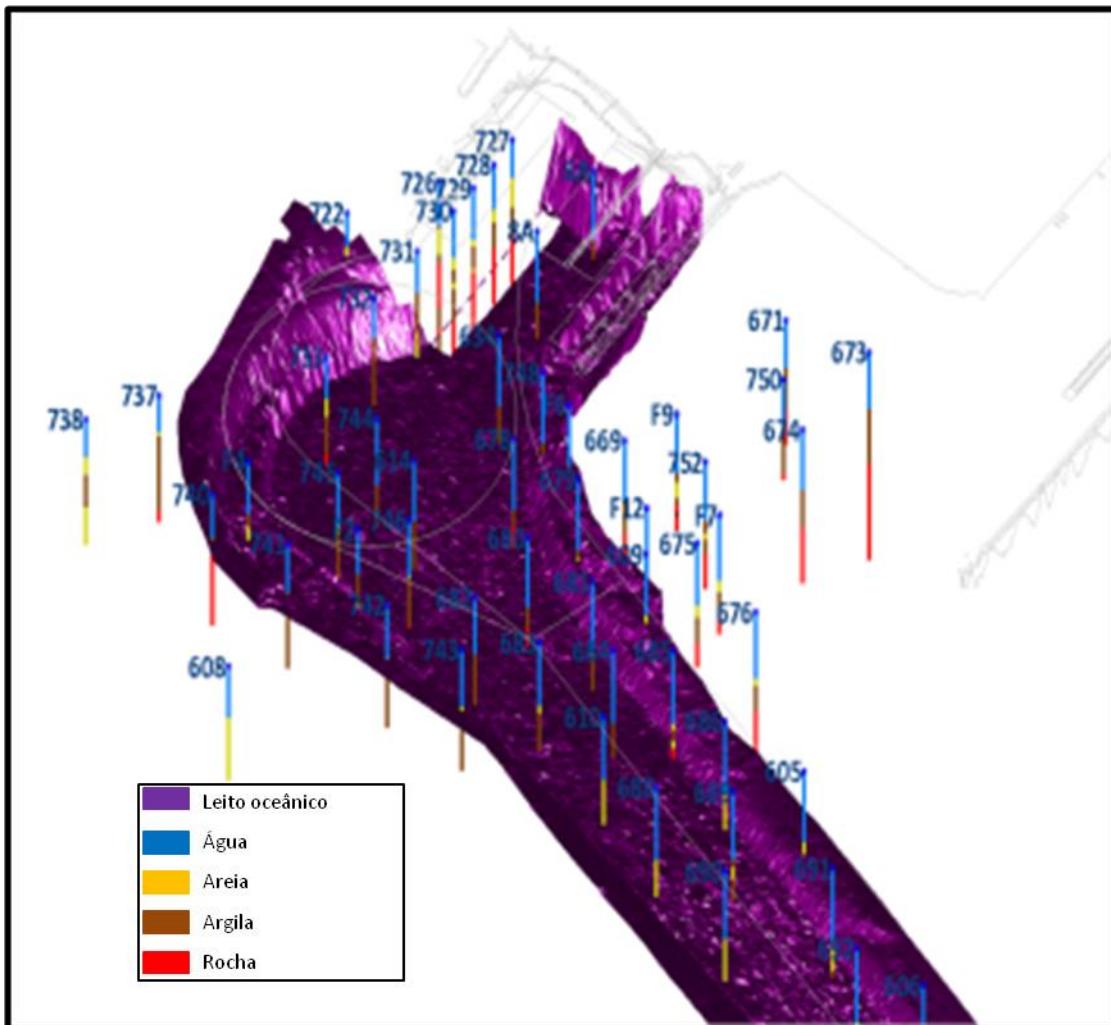


Figura 5.17 - Aproximação do canal dragado em 2012/2013. A cor lilás apresenta os volumes hoje existentes na área. Pode-se observar a calha de navegação atual do porto com suas escarpas bem definidas. Os furos foram locados na figura a fim de melhor entendimento da litologia.

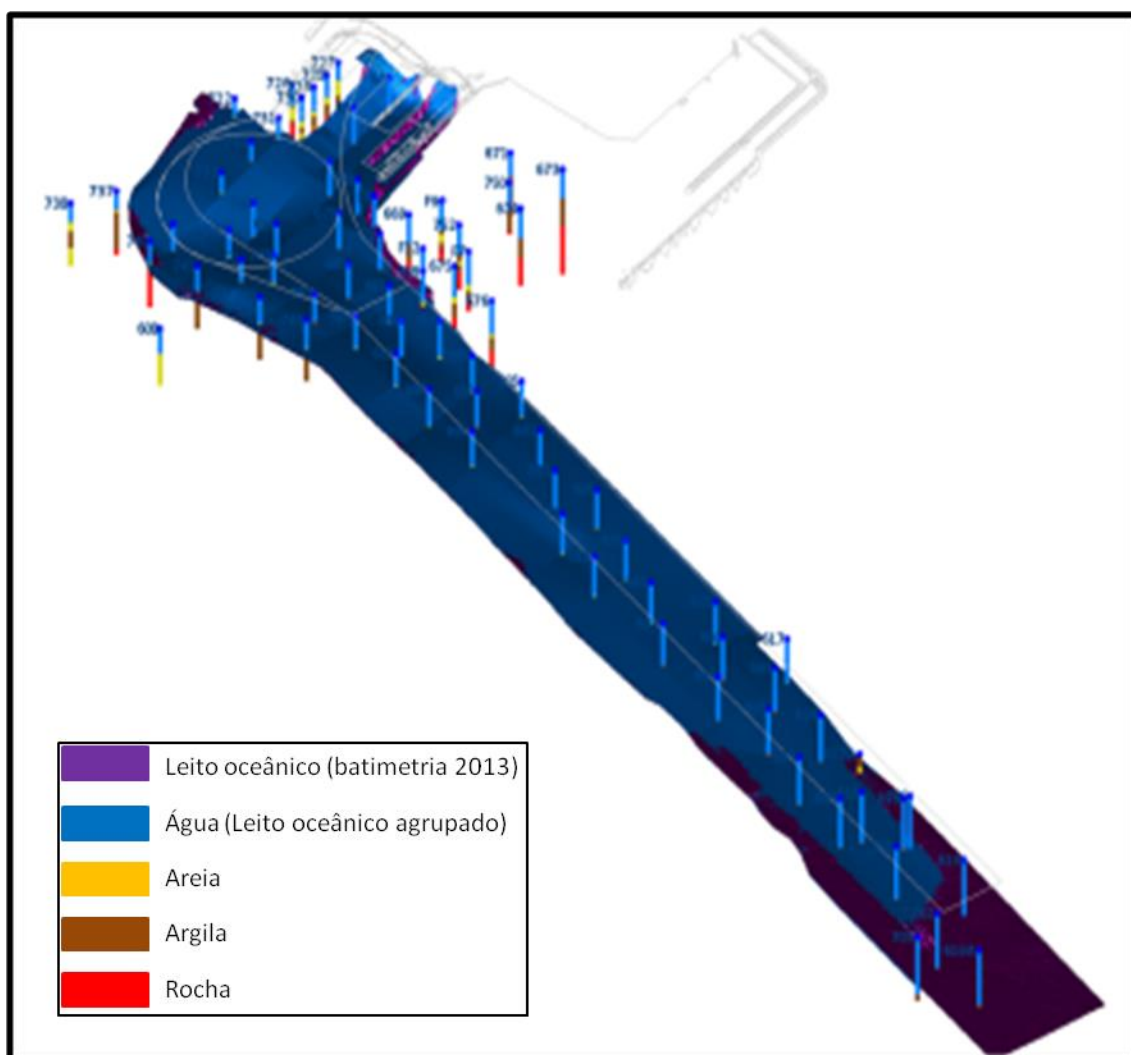


Figura 5.18 - Concepção do leito oceânico baseado nos furos de sondagem, ou seja, agrupando-se todos os furos nas cotas de recorrência da água, pode-se modelar o leito oceânico apresentado na cor azul.

Conforme já informado anteriormente, os estudos geofísicos contemplaram a bacia de evolução e funil do canal de aproximação, portanto, foi possível encontrar a ocorrência real do arenito nesta região, modelado como segue (Figura 5.19).

Pode-se observar no Modelo 3-D os furos de sondagens plotados com intuito de verificar, como maior clareza, o surgimento do arenito na bacia e funil do canal de aproximação. Observa-se que, a partir do furo 685, não há mais a evidência de ocorrência da rocha.

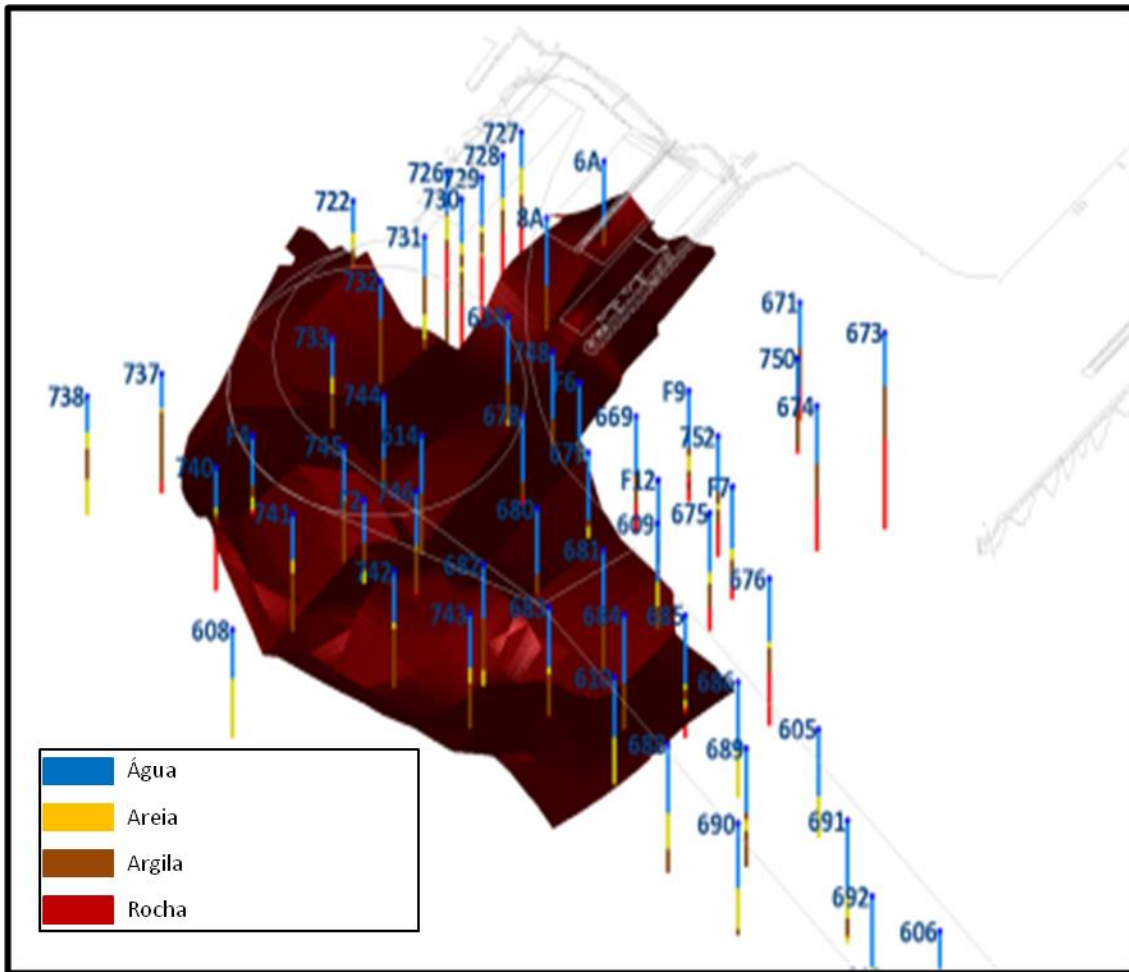


Figura 5.19 - Modelamento da ocorrência real do arenito nesta região considerando toda litologia encontrada nos furos de sondagem. Os afloramentos que já foram derrocados no corrente ano são contemplados e surgem no interior da bacia de evolução.

Com intuito de propor uma continuidade do contato da rocha, o Modelo propõe sua ocorrência a partir do furo 685 até a entrada do canal de aproximação (Figura 5.20).

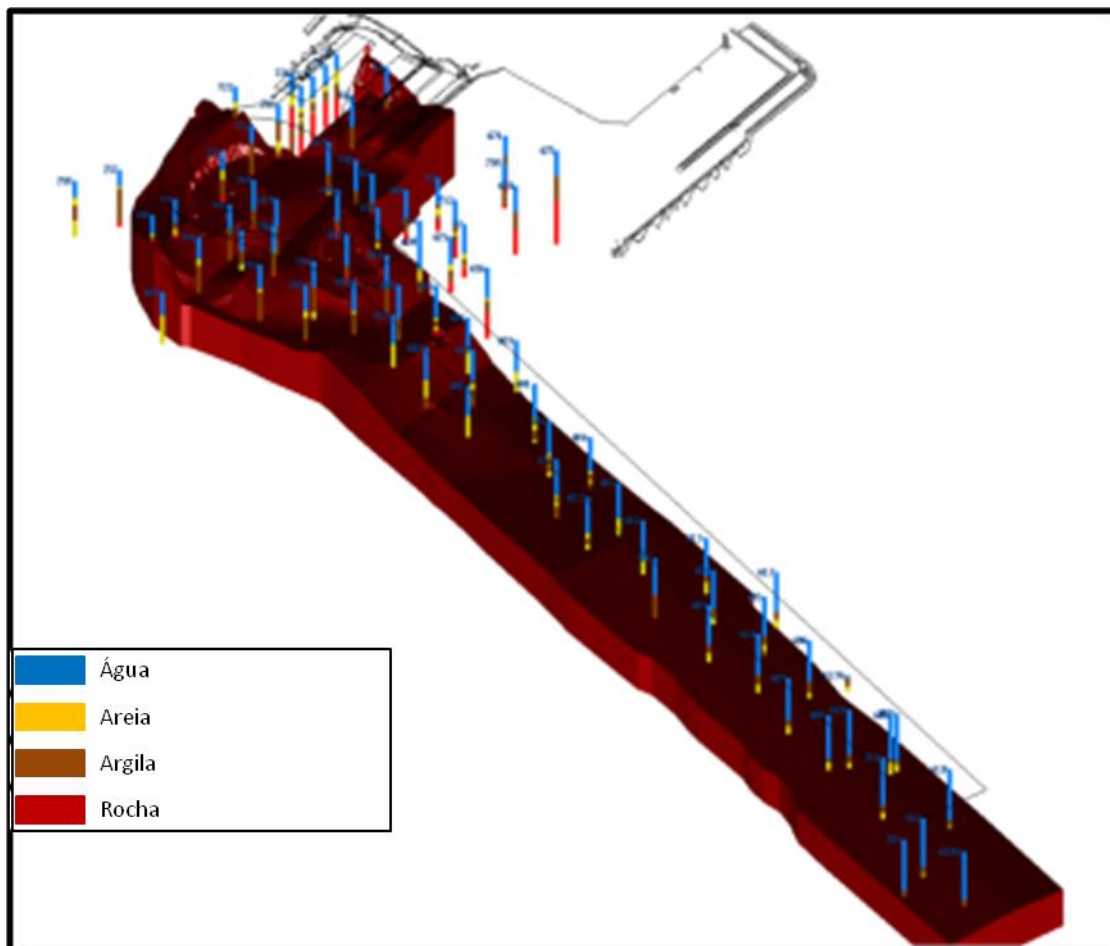


Figura 5.20 - Proposição de existência do arenito a partir do furo 685 até a entrada do canal. Os furos de sondagem da década de 70 não foram profundos o suficientes para encontrar o arenito. Os furos de 2011 não foram realizados ao longo do canal de acesso, portanto, o Modelo propõe a continuidade do arenito até a entrada do canal de acesso.

Ao sobrepor as informações da batimetria atual com as ocorrências rochosas, obtém-se os afloramentos segundo a (Figura 5.21). Importante ressaltar que estes afloramentos na bacia de evolução não existem mais, pois já foram derrocados em aprofundamentos anteriores, ficando assim o registro histórico dos mesmos.

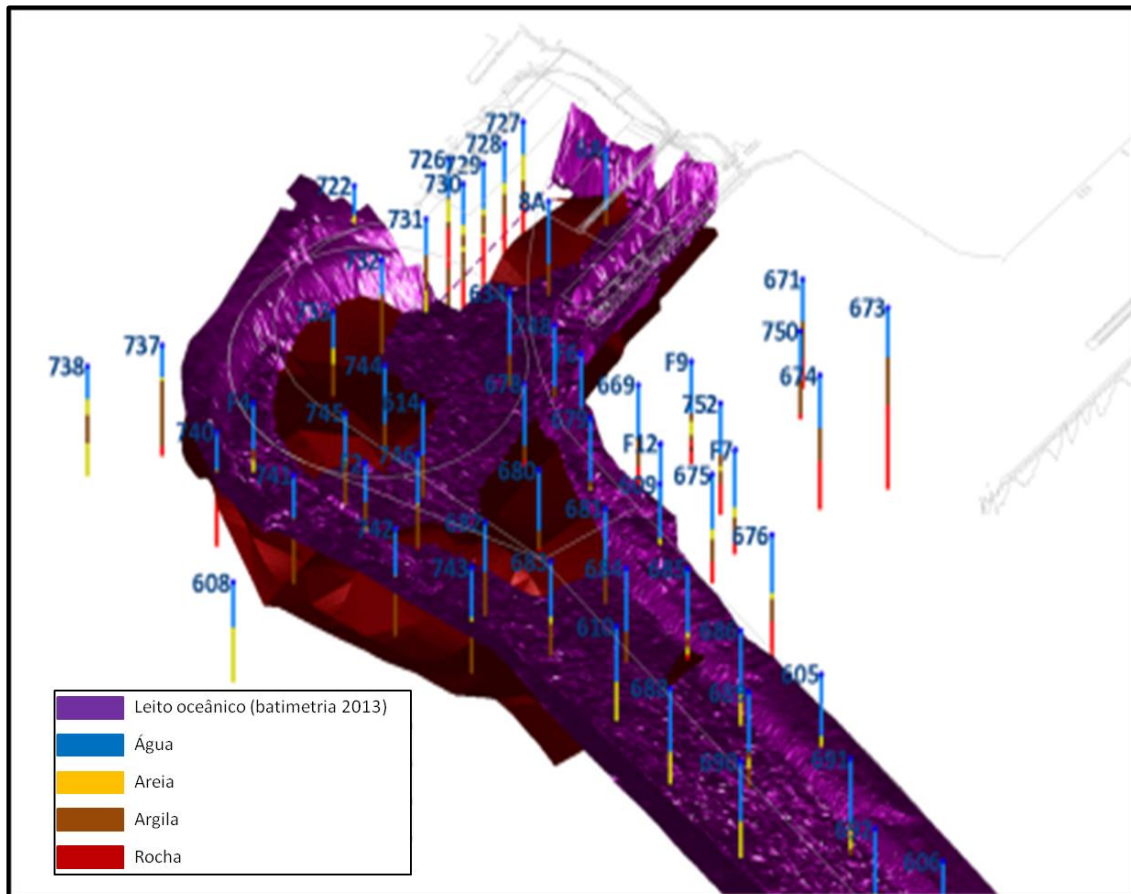


Figura 5.21 - Detalhe do afloramento de arenito no interior da bacia de evolução. Este arenito aflorado já foi derrocado em 2013.

5.3. VOLUMES DOS SUBSTRATOS MARINHOS

Ao definir-se que todos os materiais constantes neste estudo foram interpretados como camadas de rocha e sedimentos, pode-se determinar e visualizar claramente onde consta cada um a partir do atual canal de navegação (Figura 5.22). Todo material no Modelo que surge em amarelo foi definido com sedimento e todo material em vermelho é rocha, ou melhor, arenito.

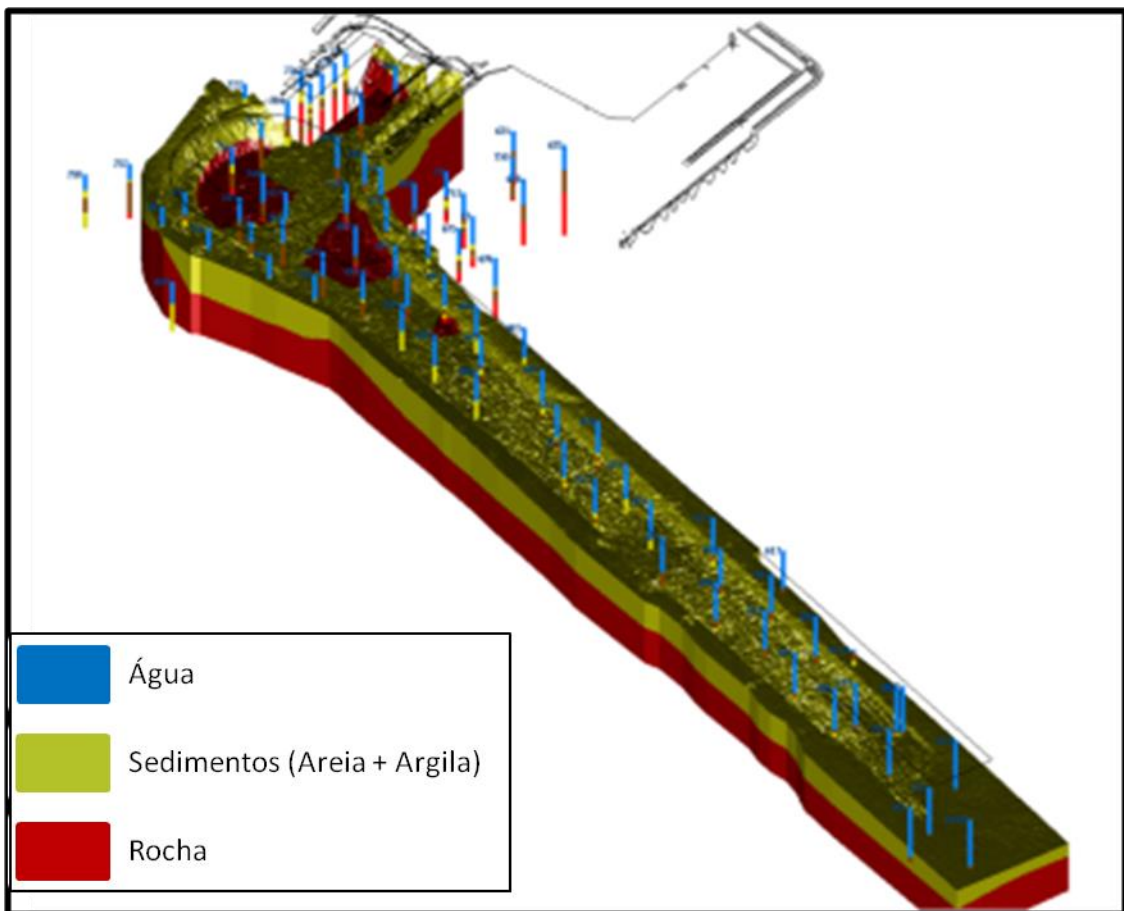


Figura 5.22 - Modelo em 3-D apresentando a diferenciação do que foi considerado sedimento (areia e argila) e rocha (arenito).

Desta forma foi possível realizar a cubagem deste materiais como forma de auxiliar nas futuras intervenções da área de estudo (Figuras 5.23 e 5.24).

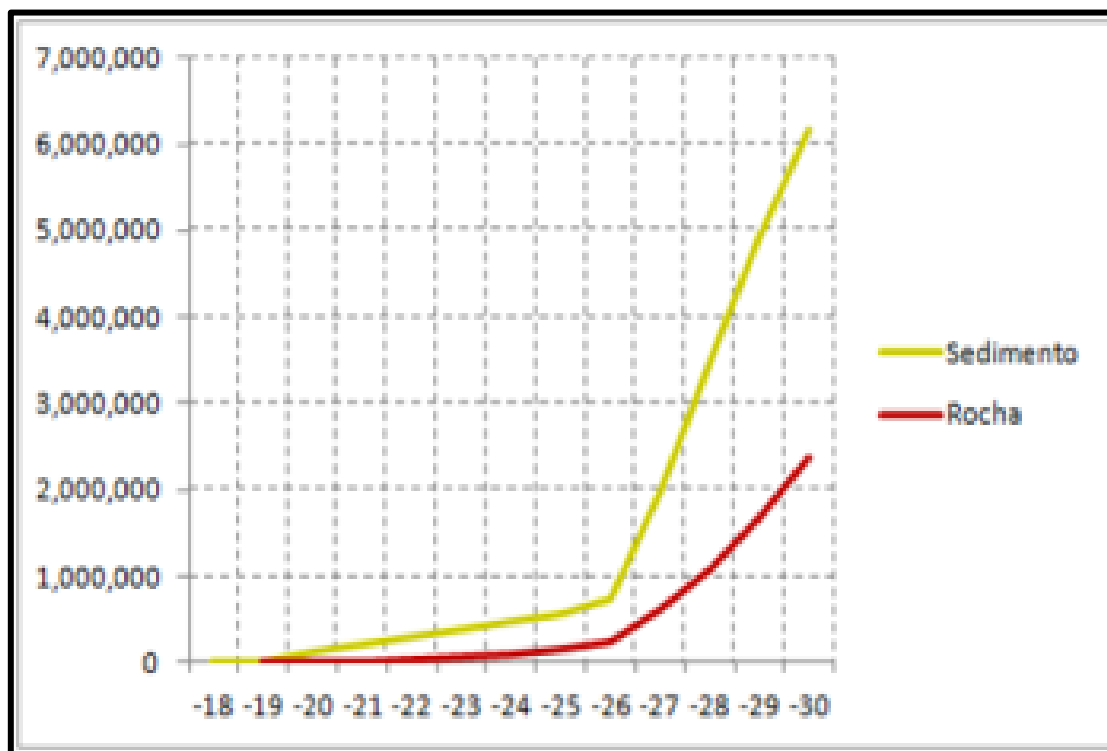


Figura 5.23 - Gráfico dos volumes de sedimentos e rocha calculados pelo Modelo.

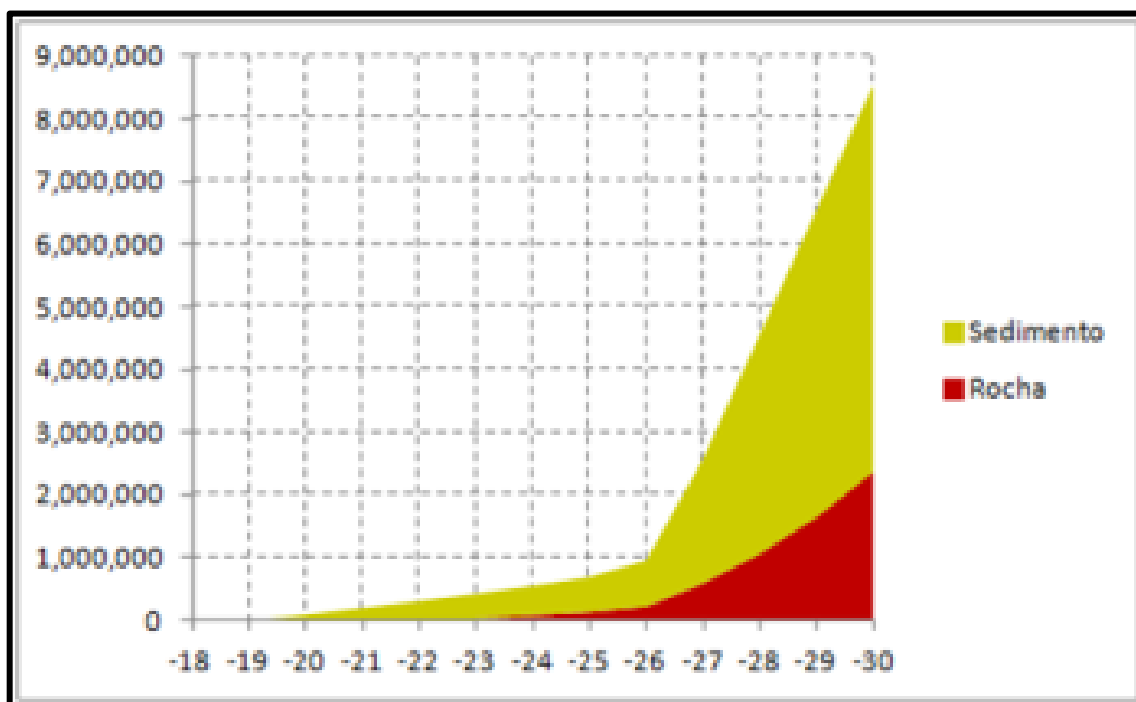


Figura 5.24 - Gráfico dos volumes acumulados de sedimentos e rocha calculados pelo Modelo.

Segue abaixo um resumo dos volumes encontrados (Tabela, 5.1).

Tabela 5.1 - Resumo dos volumes classificados dos substratos.

CLASSIFICAÇÃO	VOLUME (m³)
1. Sedimentos	6.169.867,00
2. Rocha	2.375.246,00
Total	8.545.113,00

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1. CONCLUSÕES

A proposta de modelamento realizada neste estudo contribui para futuros trabalhos de ampliação do porto. O conhecimento prévio da geologia e estratigrafia reduz o tempo e custo das obras devido á redução de ensaios e outras investigações geológicas-geotécnicas.

Outro ponto atrelado ao fator custo e tempo, foram as respostas que a geofísica de refração forneceu antes mesmo de serem realizados os estudos de sondagem geotécnica. Os indicativos obtidos pela geofísica de refração foram confirmados pelas sondagens rotativas após comparação entre os resultados das duas investigações.

Para este estudo os resultados apresentados pela geofísica de refração foram melhores que os resultados da reflexão. As três setorizações adotadas pela refração, apontando os valores das velocidades sísmicas para cada setor, bem como a penetração do sinal sísmico a grandes profundidades (atingindo a rocha), possibilitou mapear e correlacionar com maior assertividade as ocorrências geológicas às velocidades sísmicas. Tais resultados foram confirmados pelas campanhas de sondagem.

Por apresentar elevadas espessuras sedimentares consistentes (areia e argila) na área de estudo, o sinal sísmico da reflexão ficou impedido de penetrar e atingir profundidades maiores e possibilitar uma leitura mais apurada das camadas inferiores. Sua compartimentação ficou limitada a -11,5m.

Em futuras ampliações do Porto, poder-se-á utilizar a geofísica de refração e aferi-la com o Modelo Geológico proposto neste trabalho, economizando-se assim, em numerosas campanhas de sondagens.

Como os resultados da investigação geofísica foram compatíveis com as estratigrafias propostas no Modelo Geológico, propõem-se para futuras investigações a realização de maior número de levantamentos sísmicos que de perfurações de sondagens, pois seu impacto na movimentação das embarcações é minimizado ou até inexistente.

A geofísica de reflexão e refração, largamente empregada em projetos portuários e estudos de áreas submersas no Brasil e em outros países, fornece informações valiosas e complementares. Recomenda-se sua realização em toda extensão do canal e a profundidades superiores a -30m para se estabelecer importantes informações a respeito da litologia em profundidade naquela área.

A medida que a profundidade da subsuperfície aumenta, proporcionalmente elevam-se as velocidades sísmicas perfeitamente justificadas na ocorrência do arenito. Em profundidades da ordem de -26,00m e a velocidades superiores a 3000m/s já é possível encontrá-lo, o que justifica a eficácia da sísmica de refração nestes levantamentos.

Com relação ao tipo de equipamento a ser utilizado em futuros aprofundamentos do canal e bacia, sua escolha deverá ser embasada nos valores encontrados de resistência do arenito, uma vez que, os ensaios de laboratório forneceram baixo grau de resistência à compressão e tração para estas rochas.

Os tipos de arenito classificados nos testemunhos retirados variaram conforme a profundidade. Para um mesmo arenito siltoso obteve-se valores distintos de resistências à compressão aumentando a profundidade.

Para o arenito silto-argiloso, os valores de resistência diminuem conforme as profundidades avançam. Este fato foi observado cruzando-se os valores dos diferentes furos de sondagem. Já para um mesmo furo, ao compararmos as resistências, apesar de pequenas percebeu-se aumento com a profundidade. Notadamente a composição da argila no arenito reduziu seus valores de resistência à tração e compressão.

Os arenitos com grãos quartzosos apresentaram entre os maiores valores de resistência das amostras, variando a maior com a profundidade. Esta classificação foi encontrada em apenas um furo (F12).

Em resumo, os valores de resistências (tração e compressão) adotados para todo Modelo Geológico foram 0,4MPa e 0,7MPa respectivamente, respeitando-se a condição conservadora, uma vez que no interior do Canal de Acesso e Bacia de Evolução todos os furos apresentaram classificação de arenito mole, provavelmente pela composição da argila em suas amostras.

Conclui-se que os poucos testemunhos de arenito retirados da campanha de 2011, mesmo no perímetro do canal e bacia, foram suficientes para representar todo o maciço do Modelo Geológico, uma vez que foi possível estabelecer correlação destes com os furos da campanha de 1970.

Para as amostras indeformadas de solos, o material foi classificado como argila silto-arenosa, com algumas variações na cor e consistência, sem variações significativas da resistência ao cisalhamento a medida que a profundidade aumenta (variaram de -12,97m até -20,69m).

As características geológicas e geotécnicas dos sedimentos, tais como Limites de Atterberg e granulometria, obtidas com ensaios de amostras coletadas a partir dos furos de 2011 também foram correlacionadas aos sedimentos descritos pelos furos de 1970 e definidas como representativas para todo o Modelo Geológico.

O Modelo Geológico apresentado, em seu caráter único para a área do Porto de Tubarão, será referência para fundamentar possíveis alargamentos do Canal e criação de nova Bacia de Evolução, bem como, servir de orientação para construção dos novos píeres e/ou ampliações que se fizerem necessárias.

6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

1. Estudar a relação entre a resistência da rocha com o equipamento apropriado para derrocagem;
2. Executar um número maior de levantamentos geofísicos de refração e reflexão contemplando maiores profundidades na subsuperfície;
3. Realizar nova campanha de sondagem no interior do canal e bacia além da cota -33,00m, caso os levantamentos geofísicos não sejam conclusivos;
4. Utilizar outros métodos geofísicos a fim de comparar os resultados com a refração e reflexão utilizados neste estudo;
5. Ajustar o Modelo proposto a partir da cota -26m, quanto à ocorrência do arenito, utilizando investigações geofísicas de forte penetração;
6. Correlacionar às amostras dos sedimentos com vistas ao regime sedimentológico das correntes de marés na área de estudo;
7. Levantar através de batimetria multifeixe a geometria exata (com nuvem de pontos) do Canal de Acesso e Bacia de Evolução comparado-a a geometria do Modelo Geológico proposto neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINO, J. **Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das praias de Bicanga à Povoação-ES**. 1999, 182f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- ALBINO, J.; Girardi, G.; Nascimento, K. A. **Erosão e Progradação do litoral do Espírito Santo**. In: Muehe, D. (Org.). **Erosão e Progradação do Litoral do Brasil**. Brasília: Ministério de Meio Ambiente, v. 1, p. 226-264. 2006.
- ALBINO, J.; GOMES, R. C. **Modelagem, Monitoramento, Erosão e Ocupação Costeira**: Descrição dos Aspectos Oceanográficos do Litoral do Espírito Santo. Vitória: Instituto do Milênio/Recos, 2005.
- ALBINO, Jaqueline; GIRARDI, Gisele; NASCIMENTO, Kleverson Alencastre do. **Erosão e Progradação do Litoral do Espírito Santo**. In: MUEHE, Dieter (Org.). **Erosão e Progradação do Litoral do Brasil**. Brasília: Ministério de Meio Ambiente, 2006, v. 1, p. 226-264.
- APPLIED ACOUSTICS. **Bloomer Plates**. Disponível em: <http://www.appliedacoustics.com/sites/default/files/page-files/BoomerPlates.pdf>> Acesso em 21 dez. 2012.
- AYRES NETO, A. **Uso da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina**. Rev. Bras. Geof., v.18, p.241-255, 2000.
- BIANCO, R; SOUZA LAP; CUNHA AGN. **Sísmica rasa e sonar de varredura lateral aplicados a projetos de dragagem e derrocagem submarina**. 8º CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, Rio de Janeiro-RJ, 2003. 1CD-ROM.
- BIANCO, R; SOUZA LAP; CUNHA AGN. **Sísmica rasa e sonar de varredura lateral aplicados a projetos de dragagem e derrocagem submarina**. 8º CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, Rio de Janeiro-RJ, 2003. 1CD-ROM.

- BRASIL. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. Departamento de Recursos Hídricos. **Levantamentos hidrográficos**. Palestra 5 out. 2012. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/chm/levhidrograficos/levanta.html>> Acesso em: 18 dez. 2012.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações – Fundamentos**. 6ª Edição, Vol.1, p.160, 1988
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações – Mecânica da Rochas – Fundações – Obras de Terra**. 6ª Edição, Vol.2, p.18-19, 1987
- CANUTO, José Roberto. **Petróleo**. Escola de Geociências da USP. São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.igc.usp.br/index.php?id=309>> Acesso em: 21 dez. 2012.
- CARMO, D. A. **Mapeamento faciológico do fundo marinho como ferramenta ao entendimento da dinâmica sedimentar da Baía do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Geofísica marinha) – Universidade Federal Fluminense. 2009.
- CARMO, Danilo Alves do. **Mapeamento Faciológico do Fundo Marinho como Ferramenta ao Entendimento da Dinâmica Sedimentar da Baía do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha). Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2009.
- COUTINHO, J. M. V.; COIMBRA, A. M. Os **minerais pesados do Barreiras na costa oriental brasileira: estudo de áreas-fonte**. Anais SBG, Porto Alegre, v. 5, p. 27-41, 1974.
- DEME. 2011. **Refração Sísmica. Relatório Técnico 11_025/MA/GP/RE001**. 39 p.
- DIAS, G. T. M.; Gorini, M. A.; Gallea, C. G.; Espindola, C. R. S.; Mello, S. M.; Dellapiazza, H. & Castro, J. R. J. C. 1982. **Bancos de arenito de praia (beachrocks) submersos na plataforma continental SE brasileira**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32. Salvador, BA, setembro de 1982. Anais, 4:1540-1546.

DOURADO, J. C.. A. **Utilização da Sísmica na Determinação de Parâmetros Elásticos Dinâmicos de Maciços Rochosos e Terrosos *In Situ***. Publicações de Artigos Técnicos da ABGE No. 8, 1984.

FEDERAÇÃO PORTUGUESA DE COLUMBOFILIA. **Escala de Sir Francis Beaufort**. <<http://www.fpcolumbofilia.pt/meteo/main0619.htm>> Acesso em: 20 dez. 2012.

FOLK RL. 1954. **The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature**. *Journal of Geology*, 62(4): 344–359.

IPT. **Levantamento Geofísico (Sonar de Varredura Lateral e Perfilagem Sísmica Contínua) do Canal de Santos**. 118066-205, 2010. 185 p.

KOWSMANN, R. O. & COSTA, M. P. A. 1979. **Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das águas oceânicas adjacentes**. *In*: PROJETO REMAC, Reconhecimento global da margem continental brasileira. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/SINTEP. v. 8, p.1-55.

LNEC. Refracção Sísmica. Publicado em 2008. Disponível em: <http://www.lnec.pt/organizacao/dg/ngea/refraccao_sismica> Acesso em: 20 dez. 2012.

MARQUEZ, A. L.; **Estudo de Agitação, Correntes Induzidas por Ondas e Balanço Sedimentar da Região do Porto de Tubarão e Praia de Camburi, Vitória/ES**. Dissertação de Mestrado – Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo-SP, 2009.

MARTIN, L. *et al.* **Coastal Quaternary Formations of The Southern Part of The State of Espírito Santo (Brazil)**. *Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, p. 389-404, 1996.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M. 1993. **As flutuações de nível do mar durante o Quaternário superior e a evolução geológica de “deltas brasileiros”**. *Boletim IG- USP*. Publicação especial 15. São Paulo. USP. 186p.

McClelland, 1970. **Report of Field Investigation**. Report nº 70-044. 78 p.

- MELO, E.; GONZALEZ, J. A. **Coastal Erosion at Camburi Beach (Vitória, Brazil) and its Possible Relation to Port Works**. Proc. of COPEDEC IV, p. 397-411, Rio de Janeiro, 1995.
- MUEHE, D. 1994. **Geomorfologia Costeira**. In: Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. Geomorfologia. Uma atualização de bases e conceitos. São Paulo, Editora Afiliada. 253-297.
- MUEHE, D. **O Litoral Brasileiro E Sua Compartimentação**. In: Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. Da (Org.). Geomorfologia Do Brasil. Rio De Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.
- NICHOLS, G. **Sedimentology & Stratigraphy**. London: Blackwell Publishing, 1999.
- NITTROUER, C. A.; WRIGHT, L. D. **Transport of Particles Across Continental Shelves**. Reviews of Geophysics, v.32, nº1, p.85-113, 1994.
- PATCHINEELAM, S. M. 2004. **Sedimentação Marinha** In: BAPTISTA NETO, J.A., PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. Introdução à Geologia Marinha. Rio de Janeiro. Interciência, 2004, p.153-173.
- PONZI, V. R. A. **Sedimentação Marinha** In: BAPTISTA NETO, J. A., PONZI, V. R. A., SICHEL, S. E. Introdução à Geologia Marinha. Rio de Janeiro: Interciência, 2004, p. 219-241.
- ROSSETI, D.F.; Goés, A.M.; Truckenbrodt, W. **A Influência Marinha nos Sedimentos Barreiras**. 1990. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Série. Ciências da Terra 2, p. 17-29.
- SEAMA, 2008. **Relatório da qualidade do ar na região da grande Vitória**. Relatório técnico. Cariacica.
- SOUZA, Francisco José Mota de. **Identificação de reflexões múltiplas, utilizando os parâmetros das frentes de onda PIN e NORMAL**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2005.

- SOUZA, L. A. P. **A investigação sísmica de áreas submersas rasas: Parte 1 – Fundamentos e Demandas.** Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica, v.2, 2008, p. 11-19.
- SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas.** Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2006 311 p.
- SOUZA, L. A. P. . **A importância da geofísica em obras de infraestruturas em ambientes submersos.** Revista Fundações & Obras Geotécnicas, v. 2, p. 66-72, 2011.
- SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.
- UMISAN. 2008. **Levantamento Sísmico no Porto de Tubarão – ES.** Relatório Técnico nº 52 -2008. 28 p.
- UMISAN. 2011. **Levantamento Sísmico de Reflexão. Relatório Técnico nº 41 - 2011.** 29 p.
- UMISAN. 2011. **Projeto de Dragagem e Derrocamento no Porto de Tubarão.** Relatório Técnico nº 77 - 2011. 39 p.
- VERONEZ, P.; **Identificação dos processos sedimentares associados ao recife artificial marinho VICTORY 8B, Guarapari – ES.** Monografia de graduação. Programa de graduação em oceanografia – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, UFES. Vitória-ES, 2005
- VERONEZ, P.J.; BASTOS, A.C.; QUARESMA, V.S. **Morfologia e Distribuição Sedimentar em um sistema estuarino tropical: baía de Vitória, ES.** Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 27(4), p. 609-624, 2009.
- NBR 7181 (1984). Solo – **Análise Granulométrica.** ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ. 13p;
- NBR 6457 (1986). **Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.** ABNT – Associação Brasileira de normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ. 9p;

NBR 6459 (1984). **Determinação do Limite de Liquidez**. ABNT – Associação Brasileira de normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ. 6p;

NBR 7180 (1984). **Determinação do Limite de Plasticidade**. ABNT – Associação Brasileira de normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ. 3p;

NBR 7181 (1984). **Solo – Análise Granulométrica**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ. 13p;

MineSight. www.minesigth.com

ASTM D3082 (1979). **Standard Test Method for Boron in Water**. ASTM - American Society for Testing and Materials. USA.

ASTM D2850 (2007). **Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils**. ASTM - American Society for Testing and Materials. USA.

ANEXOS

Devido seu grande volume de informações, os anexos citados nesta dissertação, estão em meio digital, inseridos em disco compacto que acompanha este trabalho.