

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE FUNDO MARINHO ENTRE RIO GRANDE E
TORRES E DE FUNDO LAGUNAR ENTRE RIO GRANDE E SÃO LOURENÇO DO SUL**

Por

Bruna Sá Britto Valério

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, Março de 2017.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE FUNDO MARINHO ENTRE RIO GRANDE E TORRES E DE FUNDO LAGUNAR ENTRE RIO GRANDE E SÃO LOURENÇO DO SUL

Por

Bruna Sá Britto Valério
Engenheira Civil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Scotti Fontoura

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

Prof. Ph.D. Lauro Júlio Calliari - FURG

Prof. Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos - FURG

Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro - UFSM

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, Março de 2017.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE FUNDO MARINHO ENTRE RIO GRANDE E TORRES E DE FUNDO LAGUNAR ENTRE RIO GRANDE E SÃO LOURENÇO DO SUL

Por

BRUNA SÁ BRITTO VALÉRIO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura
Orientador - FURG

Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves
Co-orientador - FURG

Prof. Ph.D. Lauro Júlio Calliari
FURG

Prof. Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos
FURG

Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
UFSM

Este trabalho é dedicado a minha família, em especial a minha mãe Nereida Madalena Sá Britto e ao meu pai Oscar Juvêncio Barbosa Valério (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por, simplesmente tudo.

Agradeço a minha família (irmãs, sobrinhos (as) e cunhados), em especial a minha mãe, Nereida Madalena Sá Britto, pelo apoio incondicional. Sem dúvida, vocês são as minhas doses diárias de ânimo e incentivo.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório de Geotecnia e Concreto - FURG e do Laboratório de Engenharia Costeira - LEC, destacando o Técnico administrativo Régis Maria, Samantha Dal Pozzo, Rubilaine Costa, Técnica administrativa Veridiana Herreira e Marine da Silva pela cooperação nos trabalhos realizados durante a pesquisa experimental e pela amizade.

Com enorme carinho agradeço ao co-orientador Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves, por ter me acompanhado desde o princípio desse trabalho com muita dedicação e paciência e ao Prof. Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos por disponibilizar o espaço físico e instrumentos necessários à realização dos ensaios. Certamente, parte da minha formação foi alcançada com o apoio e incentivo de vocês.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura pela amizade, orientações e análise de cada capítulo que compõem este trabalho.

Agradeço ao Prof. Ph.D. Lauro Júlio Calliari por ter emprestado parte do seu acervo bibliográfico para auxiliar na escrita do trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro.

RESUMO

O objetivo deste estudo é descrever e interpretar os resultados de duas campanhas de investigações geotécnicas, a primeira com base em amostras retiradas do leito marinho entre as cidades de Rio Grande e Torres, no litoral do estado do Rio Grande do Sul, e a segunda com amostras de fundo lagunar extraídas entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul. A coleta dos sedimentos marinhos ocorreu durante um cruzeiro do navio oceanográfico Atlântico Sul, da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), patrocinado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT), onde foram coletados 27 tubos amostrais de fundo marinho. As amostras foram obtidas entre as curvas isobatimétricas de 13,00 a 91,00 metros de lâmina d'água. Já as amostras de sedimentos lagunares foram obtidas por meio de uma parceria entre o Laboratório de Engenharia Costeira (FURG) e o Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (UFRJ), com o auxílio da lancha Larus, sendo que durante essa expedição foram coletadas 19 amostras de sedimentos superficiais lagunares. As amostras foram obtidas entre as curvas isobatimétricas de 2,50 e 14,40 metros de lâmina d'água. Os dois conjuntos de amostras foram submetidos a ensaios de caracterização geotécnica básica, a ensaios de palheta de laboratório, a ensaios de caracterização mais sofisticados, como difração de raios X, além de ensaios complementares, como determinação do teor de matéria orgânica. Com base nos resultados dos ensaios de caracterização, foi organizado um extenso banco de dados, contendo parâmetros descritivos e de comportamento geomecânico dos solos presentes nos pontos amostrados. Este banco de dados pode ser útil no apoio a projetos de engenharia costeira relacionados à dragagem e instalação de dutos submarinos, bem como no subsídio a estudos sobre o transporte de sedimentos e gerenciamento costeiro.

Palavras-chaves: Sedimentos marinhos, sedimentos lagunares, caracterização geotécnica, banco de dados.

ABSTRACT

The objective of this study is to describe and interpret the results of two geotechnical investigation campaigns, the first one based on samples taken from the seabed between the towns of Rio Grande and Torres, on the coast of the state of Rio Grande do Sul, and the second with Lagoon bottom samples collected between the towns of Rio Grande and São Lourenço do Sul. The collection of marine sediments occurred during a cruise of the Atlântico Sul oceanographic ship (Federal University of Rio Grande-FURG), sponsored by the National Institute of Science and Technology (INCT), where 27 samples of seabed were collected. The samples were obtained between the isobathymetric curves of 13.00 to 91.00 meters of depth. The samples of lagoon sediments were obtained through a partnership between the Laboratory of Coastal Engineering (FURG) and the Cohesive Sediment Dynamics Laboratory (Federal University of Rio de Janeiro), with the aid of the Larus research boat (FURG). During this expedition, 19 samples of surface sediments lagoon were collected. The samples were obtained between the isobathymetric curves of 2.50 and 14.40 meters of depth. Both sets of samples were subjected to basic geotechnical characterization tests and vane shear tests. Also, some other characterization tests, such as X-ray diffraction, as well as complementary tests, such as determination of the organic matter content. Based on the results of the characterization tests, an extensive database was organized, containing descriptive parameters and geomechanical behavior parameters, of the sediments present in the sampled points. This database can be useful in supporting coastal engineering projects related to dredging and installation of subsea pipelines, as well as to support studies on sediment transport and coastal management.

Keywords: Marine sediments, lagoon sediments, geotechnical characterization, database.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	20
LISTA DE EQUAÇÕES	22
LISTA DE SÍMBOLOS	23
LISTA DE ABREVIATURAS	25
1. INTRODUÇÃO	26
1.1. Justificativa da pesquisa.....	26
1.2. Objetivos da pesquisa.....	27
1.2.1. Objetivo geral.....	27
1.2.2. Objetivos específicos	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1. Caracterização geotécnica de sedimentos marinhos e lagunares	28
2.2. Caracterização de sedimentos superficiais na Bacia de Pelotas e Lagoa dos Patos	33
2.3. Métodos de investigação geotécnica sob lâmina d'água	39
2.3.1. Métodos diretos de investigação	39
2.3.2. Métodos indiretos de investigação	53
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1. Áreas de estudo	55
3.1.1. Área marinha entre Rio Grande e Torres (RS).....	55
3.1.2. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS)	57

3.2. Amostragem	59
3.3. Ensaio de laboratório	61
3.3.1. Ordem de realização dos ensaios	61
3.3.2. Descrição dos procedimentos de laboratório para caracterização básica.....	63
3.3.3. Descrição dos procedimentos de laboratório para caracterização complementar.....	75
4. RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA – ÁREA MARINHA ENTRE RIO GRANDE E TORRES E ÁREA LAGUNAR ENTRE RIO GRANDE E SÃO LOURENÇO DO SUL	81
4.1. Granulometria	81
4.2. Matéria orgânica.....	97
4.3. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e teor de umidade	99
4.4. Índices físicos.....	105
4.5. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su)	107
4.6. Difractometria de raios X (DRX)	113
4.7. Ensaio de Adensamento	118
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	122
5.1. Conclusões	122
5.2. Sugestões para Pesquisas Futuras	123
REFERÊNCIAS.....	124
APÊNDICE A - Curvas granulométricas - área marinha entre Rio Grande e Torres	130
APÊNDICE B - Curvas granulométricas - área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço Do Sul	142
APÊNDICE C - Difractogramas de raios X - área marinha entre Rio Grande e Torres.....	151

APÊNDICE D - Difrátogramas de raios X - área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul	
.....	157
APÊNDICE E - Curvas tensão versus índice de vazios - área marinha entre Rio Grande e Torres	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. (a) Relação entre o limite de liquidez, limite de plasticidade e área superficial específica para sedimentos marinhos de grão fino (31 amostras), (b) Relação entre a porosidade e o limite de liquidez dos sedimentos superficiais marinhos de grão fino (intervalo de amostra 0 - 2 cm) e (c) Relação entre índice de compressão (CC) e razão de vazios (e'_0) com $\sigma'_0 = 0,01$ MPa. (Fonte: modificado de Wetzel, 1990).	30
Figura 2.2. Perfil de coeficiente de reflexão de fundo calibrado e perfis de propriedades físicas de sedimentos obtidos acústicamente, linha no sul do Mar Báltico. (Fonte: modificado de Davis et al., 2002).	31
Figura 2.3. Propriedades geotécnicas dos depósitos marinhos versus lâmina d'água. (Fonte: modificado de Yan e Ma, 2010).	32
Figura 2.4. Localização da argila marinha Lianyungang no gráfico de plasticidade. (Fonte: modificado de Liu et al., 2011).	33
Figura 2.5. Mapa faciológico da Bacia de Pelotas. (Fonte: Modificado de Paixão, 2012).	37
Figura 2.6. Mapa faciológico da Lagoa dos Patos. (Fonte: Marroig, 2015).	38
Figura 2.7. Tipos de dragas para amostragem sob lâmina d'água (Fonte: Modificado de Thompson e Beasley, 2012).	40
Figura 2.8. Amostrador de fundo box corer tipo (a) Ekman (b) Reineck (Fonte: www.kc-denmark.dk/products/sediment-samplers.aspx).	41
Figura 2.9. Procedimento de ensaio do amostrador de gravidade (Fonte: Modificado de Thompson e Beasley, 2012).	41
Figura 2.10. Amostrador do tipo vibrocorer (Fonte: Thompson e Beasley, 2012).	42
Figura 2.11. Ensaio in situ intrusivos sob coluna d'água.	43
Figura 2.12. Plataforma fixa para ensaios SPT sob lâmina d'água.	44
Figura 2.13. Flutuante para ensaios SPT sob lâmina d'água (Fonte: Bogossian, 2012).	45
Figura 2.14. Sino de sondagem (Fonte: Mello e Bogossian, 1998).	45

Figura 2.15. Principais elementos do equipamento para realização do ensaio de CPTu e ponteira instrumentada (Fonte: Modificado de ISSMGE, 2005).	46
Figura 2.16. Ensaio de piezocone (a) em fundo marinho (b) com auxílio de coluna de perfuração (Fonte: Modificado de Harris et al., 2008).	47
Figura 2.17. Ensaio de piezocone em plataforma apoiada sobre monotubos (Fonte: Rabassa, 2010).	47
Figura 2.18. Ponteiras adotadas em ensaios penetrométricos (Fonte: Modificado de Randolph et al., 2005).	48
Figura 2.19. Ensaio com o dilatômetro de Marchetti (Fonte: Modificado de Marchetti, 2014).	49
Figura 2.20. Ensaio de dilatômetro submarino, (a) realização do ensaio em fundo marinho a partir de navio de sondagem, (b) equipamento submarino para realização do ensaio e (c) equipamento submarino sendo colocado no local de realização do ensaio. (Fonte: Modificado de Marchetti, 2014).	49
Figura 2.21. Ensaio pressiométrico realizado em pré-furo (Fonte: Modificado de Dayal, 1978).	50
Figura 2.22. (a) Dimensões da palheta (b) Ensaio de palheta (Fonte: Modificado de Harris et al., 2008).	51
Figura 2.23. Ensaio com o equipamento STING (Fonte: Baldez, 2010).	52
Figura 2.24. (a) Equipamento Densitune desenvolvido pela STEMA Systems (Fonte: www.stema-systems.nl) e (b) Calibração do Densitune e coleta de sub-amostras para determinação de densidade (Fonte: Leão, 2013).	53
Figura 2.25. Navio de levantamentos geofísicos (Fonte: Mello e Bogossian, 1998).	54
Figura 3.1. Fisiografia e principais estruturas da Bacia de Pelotas e área continental adjacente (Fonte: Modificado de Urien e Martins, 1978, apud Barbosa et al., 2008).	55
Figura 3.2. Localização dos pontos offshore de amostragem entre as cidades de Rio Grande e Torres (Fonte: Google Earth).	56
Figura 3.3. Localização dos pontos lagunares de amostragem entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (Fonte: Google Earth).	58

Figura 3.4. (a) Recolhimento de amostras entre Rio Grande e Torres (Fonte: Passos e Fontoura, 2015) (b) Lancha Larus utilizada para a coleta de sedimentos entre Rio Grande e São Lourenço do Sul (c) Amostrador de fundo tipo box corer com cubo amostral (Fonte: Marroig, 2015).	60
Figura 3.5. Subamostra do ponto Pal9 (Rio Grande - Torres).	60
Figura 3.6. Preparo do tubo com a subamostra do ponto Pal4 (Rio Grande - Torres) para o ensaio de palheta de laboratório.	61
Figura 3.7. (a) Extrator desenvolvido especificamente para os tubos amostrais da pesquisa (b) Extração da amostra Novo 5# (Rio Grande - Torres) do tubo amostral.	62
Figura 3.8. Conchas presentes na amostra Pal8.	62
Figura 3.9. Ensaio de palheta de laboratório na subamostra Pal9.	64
Figura 3.10. Moldagem de anel para índices físicos e adensamento na subamostra TRN1.	65
Figura 3.12. Procedimento adotado para a retirada das conchas.	66
Figura 3.13. Ensaio de sedimentação pelo método do densímetro.	67
Figura 3.14. Peneiramento fino da amostra Pal7.	67
Figura 3.16. Representação gráfica da escala granulométrica segundo a norma NBR 6502 (ABNT, 1995).	68
Figura 3.17. Diagrama de Shepard (1954) (Fonte: Dias, 2004).	69
Figura 3.18. Diagrama de Pejrurp (1988) (Fonte: Antikeira e Calliari, 2005).	70
Figura 3.19. Picnômetro na bomba de vácuo - subamostra Pal1.	71
Figura 3.20. (a) Aparelho de Casagrande (b) Concha com a ranhura fechada - Subamostra Pal8.	72
Figura 3.21. Ensaio de limite de plasticidade - subamostra Novo2#Lobos.	73
Figura 3.22. Estados limites do solo (Fonte: Pinto, 2006).	74

Figura 3.23. (a) Difrátômetro de raios X (Fonte: Universidade Federal de Viçosa - UFV) (b) Gráfico gerado com dados obtidos através de ensaio de DRX para uma amostra localizada na região de Singapura a 14 metros de profundidade (Fonte: Modificado de Tanaka, 2001).....	76
Figura 4.1. Curvas granulométricas amostras de Rio Grande - Torres.....	82
Figura 4.2. Curva granulométrica amostra Pal1.	83
Figura 4.3. Curva granulométrica amostra Pal10.	83
Figura 4.4. Classificação de Shepard (1954).	84
Figura 4.5. Pontos amostrais do presente trabalho sobre o mapa faciológico de Paixão (2012).....	85
Figura 4.6. Classificação de Pejrurp (1988).....	86
Figura 4.7. Diâmetro médio (M_z) versus desvio padrão (σ_I).	88
Figura 4.8. Diâmetro médio (M_z) versus assimetria (S_{KI}).	88
Figura 4.9. Diâmetro médio (M_z) versus curtose (K_G).	89
Figura 4.10. Curvas granulométricas amostras de Rio Grande - São Lourenço do Sul.	90
Figura 4.11. Curva granulométrica da amostra #2A.....	91
Figura 4.12. Curva granulométrica da amostra #10A.....	91
Figura 4.13. Classificação de Shepard (1954).	92
Figura 4.14. Pontos amostrais do presente trabalho sobre o mapa faciológico de Marroig (2015). .	93
Figura 4.15. Classificação de Pejrurp (1988).....	94
Figura 4.16. Diâmetro médio (M_z) versus desvio padrão (σ_I).	96
Figura 4.17. Diâmetro médio (M_z) versus assimetria (S_{KI}).	96
Figura 4.18. Diâmetro médio (M_z) versus curtose (K_G).	97
Figura 4.19. Plasticidade das amostras apresentadas na Carta de plasticidade de Casagrande.	101
Figura 4.20. Índice de plasticidade versus % de argila.....	102

Figura 4.21. Carta de plasticidade de Casagrande.....	104
Figura 4.22. Índice de plasticidade versus % de argila.....	104
Figura 4.23. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus % de teor de umidade no ponto abaixo do ensaio de palheta.	108
Figura 4.24. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus % de argila.	108
Figura 4.25. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus índice de plasticidade.....	109
Figura 4.26. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus índice de atividade coloidal (Ia).	109
Figura 4.27. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus % de teor de umidade no ponto abaixo do ensaio de palheta.	111
Figura 4.28. Resistência ao cisalhamento (Su) versus % de argila.....	111
Figura 4.29. Resistência ao cisalhamento (Su) versus índice de plasticidade.	112
Figura 4.30. Resistência ao cisalhamento (Su) versus % índice de atividade coloidal (Ia).	112
Figura 4.31. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - fração areia (sem tratamentos).	113
Figura 4.32. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - fração silte (sem tratamentos).	114
Figura 4.33. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - fração argila (sem tratamentos).	114
Figura 4.34. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	115
Figura 4.35. Difratoograma de raios X para amostra #2A - fração areia (sem tratamentos).	116
Figura 4.36. Difratoograma de raios X para amostra #2A - fração silte (sem tratamentos).	116
Figura 4.37. Difratoograma de raios X para amostra #2A - fração argila (sem tratamentos).	117
Figura 4.38. Difratoograma de raios X para amostra #2A - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	117
Figura 4.39. Gráficos de log tensão versus índice de vazios amostra Pal 7.	118

Figura 4.40. Gráficos de log tensão versus índice de vazios amostra TRN1.	119
Figura 4.41. Gráficos de tensão versus Cv amostra Pal 7.	121
Figura 4.42. Gráficos de tensão versus Cv amostra TRN1.....	121
Figura A.1. Curva granulométrica amostra Novo 1 Mampitubas.....	130
Figura A.2. Curva granulométrica amostra Novo2#Lobos.....	130
Figura A.3. Curva granulométrica amostra Novo 3#.....	131
Figura A.4. Curva granulométrica amostra Novo5.....	131
Figura A.5. Curva granulométrica amostra Pal 2.	132
Figura A.6. Curva granulométrica amostra Pal3.	132
Figura A.7. Curva granulométrica amostra Pal 4.	133
Figura A.8. Curva granulométrica amostra Pal6.	133
Figura A.9. Curva granulométrica amostra Pal 7.	134
Figura A.10. Curva granulométrica amostra Pal8.	134
Figura A.11. Curva granulométrica amostra Pal9.	135
Figura A.12. Curva granulométrica amostra TRC1.....	135
Figura A.13. Curva granulométrica amostra TRC2.....	136
Figura A.14. Curva granulométrica amostra TRC3.....	136
Figura A.15. Curva granulométrica amostra TRC4.....	137
Figura A.16. Curva granulométrica amostra TRC5.....	137
Figura A.17. Curva granulométrica amostra TRN1.	138
Figura A.18. Curva granulométrica amostra TRN2.	138
Figura A.19. Curva granulométrica amostra TRN3.	139

Figura A.20. Curva granulométrica amostra TRN4.	139
Figura A.21. Curva granulométrica amostra TRP33.	140
Figura A.22. Curva granulométrica amostra TRP3II.	140
Figura A.23. Curva granulométrica amostra TRS1.	141
Figura B.1. Curva granulométrica amostra #2B.	142
Figura B.2. Curva granulométrica amostra #3.	142
Figura B.3. Curva granulométrica amostra #4.	143
Figura B.4. Curva granulométrica amostra #5.	143
Figura B.5. Curva granulométrica amostra #6A.	144
Figura B.6. Curva granulométrica amostra #6B.	144
Figura B.7. Curva granulométrica amostra #6C.	145
Figura B.8. Curva granulométrica amostra #7A.	145
Figura B.9. Curva granulométrica amostra #7B.	146
Figura B.10. Curva granulométrica amostra #7C.	146
Figura B.11. Curva granulométrica amostra #9.	147
Figura B.12. Curva granulométrica amostra #10B.	147
Figura B.13. Curva granulométrica amostra #10C.	148
Figura B.14. Curva granulométrica amostra #11.	148
Figura B.15. Curva granulométrica amostra #12A.	149
Figura B.16. Curva granulométrica amostra #12B.	149
Figura B.17. Curva granulométrica amostra #12C.	150

Figura C.1. Difratoograma de raios X para amostra Pal 3 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	151
Figura C.2. Difratoograma de raios X para amostra Pal 3 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	151
Figura C.3. Difratoograma de raios X para amostra Pal 7 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	152
Figura C.4. Difratoograma de raios X para amostra Pal 7 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	152
Figura C.5. Difratoograma de raios X para amostra TRC4 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	153
Figura C.6. Difratoograma de raios X para amostra TRC4 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	153
Figura C.7. Difratoograma de raios X para amostra TRN1 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	154
Figura C.8. Difratoograma de raios X para amostra TRN1 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	154
Figura C.9. Difratoograma de raios X para amostra TRN2 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	155
Figura C.10. Difratoograma de raios X para amostra TRN2 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	155
Figura C.11. Difratoograma de raios X para amostra TRN4 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	156
Figura C.12. Difratoograma de raios X para amostra TRN4 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	156
Figura D.1. Difratoograma de raios X para amostra #6C (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	157

Figura D.2. Difratoograma de raios X para amostra #6C - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	157
Figura D.3.Difratoograma de raios X para amostra #12C (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.	158
Figura D.4. Difratoograma de raios X para amostra #12C - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).	158
Figura E.1. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRC4.	159
Figura E.2. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRC5.	160
Figura E.3. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRN2.	161
Figura E.4. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRN4.	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Distribuição do tamanho de partícula de amostras em estudo (%). (Fonte: modificado de Dusinger et al., 1981).	29
Tabela 2.2. Caracterização de argilas de Ariake, Cingapura e Bangkok. (Fonte: modificado de Tanaka et al., 2001).	30
Tabela 2.3. Tipos de amostradores (Fonte: modificado de Thompson e Beasley, 2012).	39
Tabela 3.1. Coordenadas geográficas e profundidade da lâmina d'água nos pontos de amostragem (Rio Grande - Torres).	57
Tabela 3.2. Coordenadas geográficas e profundidades de lâmina d'água nos pontos de amostragem (Rio Grande - São Lourenço do Sul).	59
Tabela 3.3 - Constante de calibração das molas (Fonte: www.viatest.com.br/manual).	63
Tabela 3.4. Quantificação da plasticidade dos solos (Fonte: Burmister, 1949 apud Das, 2010).	74
Tabela 3.5. Índice de atividade coloidal dos solos. (Fonte: Pinto, 2006).	75
Tabela 3.6 - Distância máxima inter-reticular de minerais de solo saturados com Mg^{2+} e K^{+} ou solvatados por tratamento com glicerol. (Fonte: modificado de Pansu e Gautheyrou, 2006).	78
Tabela 3.7 - Influência dos tratamentos sobre a distância inter-reticular entre as principais camadas de argilas. (Fonte: modificado de Pansu e Gautheyrou, 2006).	79
Tabela 4.1. Composição granulométrica.	81
Tabela 4.2. Comparação entre os sistemas granulométricos de classificação.	87
Tabela 4.3. Composição granulométrica.	90
Tabela 4.4. Comparação entre os sistemas granulométricos de classificação.	95
Tabela 4.5. Teor de matéria orgânica.	98
Tabela 4.6. Teor de carbono orgânico e porcentagem de areia.	98
Tabela 4.7. Teor de matéria orgânica.	98

Tabela 4.8. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e teor de umidade.	100
Tabela 4.9. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e teor de umidade.	103
Tabela 4.10. Índices físicos.....	105
Tabela 4.11. Índices físicos.....	106
Tabela 4.12. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su).	107
Tabela 4.13. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su).	110
Tabela 4.14. Resultados dos parâmetros do ensaio de adensamento.	120

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 - Resistência ao cisalhamento não drenado (S_u).....	63
Equação 3.2 - Teor de umidade (w).....	64
Equação 3.3 - Peso específico aparente natural (γ_{nat}).....	65
Equação 3.4 - Escala ϕ	70
Equação 3.5 - Mediana (ϕ_{50}).....	70
Equação 3.6 - Média aritmética (M_z).....	70
Equação 3.7 - Desvio padrão inclusivo (σ_I).....	70
Equação 3.8 - Assimetria (Sk_I).....	70
Equação 3.9 - Curtose (K_G).....	70
Equação 3.10 - Peso específico real dos grãos (γ_s).....	71
Equação 3.11 - Índice de plasticidade (IP).....	73
Equação 3.12 - Índice de atividade coloidal (I_a).....	74
Equação 3.13 - Relação entre as unidades Å, nm e m.....	79
Equação 4.1 - Matéria orgânica (M.O.).....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

C_v	Coeficiente de adensamento
d	Diâmetro equivalente das partículas
d_p	Distância entre os planos do cristal
e	Índice de vazios
E_D	Módulo dilatométrico
E_p	Módulo pressiométrico
f_s	Atrito lateral
I_a	Índice de plasticidade
I_D	Índice de material
IP	Índice de plasticidade
K_0	Coeficiente de empuxo no repouso
K	Constante de calibração da mola de torção
K_D	Tensão horizontal
K_G	Curtose
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
M_z	Média aritmética
N	Normalidade
n	Porosidade
$NaClO$	Hipoclorito de sódio
$NaOH$	Hidróxido de sódio
N_{SPT}	Soma do número de golpes dos dois últimos trechos
OCR	Razão de pré-adensamento ou sobre-adensamento
P_0	Pressão para deslocar 0,05 mm da membrana
P_1	Pressão para deslocar 1,10 mm da membrana
P_2	Pressão interna durante a despressurização
P_0	Pressão de repouso
P_1	Pressão limite
P_f	Pressão de fluência
q_t	Resistência de ponta
S_{KI}	Assimetria

S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado
u	Poropressão
V	Volume total da amostra
V_s	Volume dos sólidos
W	Peso total da amostra
w	Teor de umidade
W_s	Peso dos sólidos
W_s	Peso de sólidos
W_w	Peso de água
ϕ	Escala ϕ
ϕ_5	Diâmetro correspondente a 5% na curva granulométrica
ϕ_{16}	Diâmetro correspondente a 16% na curva granulométrica
ϕ_{25}	Diâmetro correspondente a 25% na curva granulométrica
ϕ_{50}	Mediana
ϕ_{75}	Diâmetro correspondente a 75% na curva granulométrica
ϕ_{84}	Diâmetro correspondente a 84% na curva granulométrica
ϕ_{95}	Diâmetro correspondente a 95% na curva granulométrica
γ_d	Peso específico natural seco
γ_{nat}	Peso específico natural dos grãos
γ_s	Peso específico real dos grãos
λ	Comprimento de onda
σ_1	Desvio padrão
θ	Ângulo de incidência e difração de um feixe de raios x
θ_f	Máximo ângulo de torção da mola

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Capes	Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior
C.O.	Carbono orgânico
CPMT	Ensaio pressiométrico cravado
CPTU	Ensaio de piezocone
DMT	Ensaio de dilatômetro de Marchetti
DRX	Difratometria de raios X
ERG 1	Estaleiro Rio Grande (Unidade 1)
FFCPT	Free fall cone penetrometer
FFPT	Ensaio de penetração por queda livre
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
LEC	Laboratório de Engenharia Costeira
M.O.	Matéria orgânica
NP	Não plástico
PA	Falta de material
PMT	Ensaio pressiométrico
PPGEO	Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica
SAR	Sistema acústico deep-towed de alta resolução
SBP	Ensaio pressiométrico auto perfurante
SPT	Sondagem de simples reconhecimento
STING	Seabed terminal impact Newton gradiometer
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFV	Universidade Federal de Viçosa
VST	Ensaio de palheta ou vane test
XBP	Expendable bottom penetrometer
XDP	Expendable doppler penetrometer

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa da pesquisa

A caracterização das superfícies e subsuperfícies rasas de áreas submersas (rios, reservatórios, lagos, zonas costeiras e plataforma continental interna) é de suma importância para diversas aplicações em engenharia e em gerenciamento de recursos naturais (Souza, 2006). Algumas destas aplicações são: estudos relacionados ao transporte de sedimentos e à interação entre ondas e o leito imerso, projetos de engenharia costeira relacionados à dragagem e à instalação de dutos submarinos, assim como para avaliação de segurança da navegação, e aplicações militares (enterramento de objetos).

Em geral, a caracterização de sedimentos (superficiais ou profundos) presentes em leitos imersos é especialmente desafiadora, dadas as complexas condições ambientais que podem reinar (ondas, ventos, marés, lâmina d'água), e a pequena compacidade ou consistência dos sedimentos superficiais nestas regiões.

A escolha dos processos de amostragem a serem adotados e dos tipos de ensaio a serem realizados depende do ambiente em que os sedimentos se encontram, e dos parâmetros de comportamento que se deseja medir. Além disso, os métodos de amostragem e ensaio utilizados em zonas emersas muitas vezes têm de ser adaptados (ou mesmo descartados) para a investigação de áreas imersas.

Em relação à caracterização geotécnica de sedimentos imersos, dispõe-se de métodos diretos de investigação, como amostragem e ensaios *in situ* (Weaver e Schultheiss, 1990, Randolph, 2012) e métodos indiretos, como os métodos geofísicos (Souza, 2006). Em face do alto custo e da frequente baixa representatividade dos métodos diretos de investigação, os ensaios geofísicos têm bastante aplicabilidade nos ambientes costeiros e oceânicos (Preston et al., 1999, Davis et al., 2002). Porém, a aplicação confiável dos ensaios geofísicos depende, em geral, da calibração dos procedimentos de interpretação com resultados obtidos através dos sedimentos (Bulla e Hartmann, 2009).

Em se tratando de ensaios de laboratório, Randolph et al. (2005) indicam os ensaios de caracterização básica a serem realizados, visando aplicações em geotecnia marinha: teor de umidade, peso específico seco, peso específico real dos grãos, granulometria, limites de Atterberg e

teor de carbonatos. Ensaio de caracterização mais sofisticados, como difração de raios X e microscopia eletrônica, também podem ser empregados.

Este trabalho vem suprir uma lacuna no estudo de sedimentos superficiais marinhos e lagunares da região de Rio Grande (RS), qual seja, a caracterização geotécnica destes materiais, que apresenta escassos dados oriundos de trabalhos anteriores.

1.2. Objetivos da pesquisa

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é realizar a caracterização geotécnica dos sedimentos da superfície de fundo de ambientes marinhos e lagunares adjacentes a cidade do Rio Grande. A primeira região localiza-se em ambiente marinho, entre as cidades de Rio Grande e Torres, no litoral do estado do Rio Grande do Sul (Bacia de Pelotas). A segunda região localiza-se em ambiente lagunar, entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul, na Lagoa dos Patos.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, diretamente interligados ao objetivo geral, pode-se mencionar:

- Organizar e analisar parâmetros descritivos e de comportamento geomecânico de sedimentos marinhos e lagunares de duas regiões em estudo, marinha (Rio Grande - Torres / RS) e lagunar (Rio Grande - São Lourenço do Sul / RS);
- Buscar confirmações acerca das características do solo, através da comparação cruzada entre diferentes parâmetros geotécnicos.
- Comparar os resultados do presente trabalho com outros trabalhos de caracterização granulométrica já realizados nas duas áreas em estudo, buscando similaridades e diferenças.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterização geotécnica de sedimentos marinhos e lagunares

A caracterização geotécnica de sedimentos marinhos e lagunares é de fundamental importância, pois através desse estudo é possível ter conhecimento dos sedimentos que compõem o leito marinho ou lagunar, gerar mapas de fundo, ter ciência das variações físicas presentes, permitindo assim a estimativa ou previsão de futuras mudanças.

O processo de caracterização de superfícies imersas tem uma bibliografia bastante extensa, com aplicações de diversas metodologias e correlações, com o intuito de descrever os sedimentos presentes em leitos submersos. A seguir são descritos resumidamente alguns trabalhos sobre o assunto.

Sahu (1964) propôs a caracterização de sedimentos marinhos através da relação existente entre a granulometria (cascalho, areia, silte e argila) e o ambiente de deposição (turbiditos, fluvial, praial, marinho e eólico). O estudo foi desenvolvido a partir de um conjunto de 203 amostras coletadas em ambientes conhecidos. Por intermédio dessa pesquisa, Sahu (1964) pôde concluir que o método de caracterização que utiliza a velocidade de sedimentação é o mais útil e rápido, pois a sedimentação está diretamente ligada ao tamanho da partícula e a energia presente no ambiente onde ela se deposita.

Dusinger et al. (1981) correlacionaram dados geofísicos, geotécnicos e acústicos obtidos através de ensaios *in situ* com o penetrômetro de queda livre e ensaios em amostras coletados com amostrador tipo draga e *piston corer*, na Baía de Placentia. Com base nesses dados foi possível gerar um mapa preliminar da geologia do fundo em questão e tabelas de distribuição granulométrica das amostras, conforme Tab. 2.1.

Tabela 2.1. Distribuição do tamanho de partícula de amostras em estudo (%). (Fonte: modificado de Dusinger et al., 1981).

Profundidade abaixo da linha de lama (m)	Distribuição granulométrica das amostras(%).											
	Estação 1 (G - 141)			Estação 2 (G - 243)			Estação 3 (G - 332)			Estação 4 (G - 441 A)		
	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
0 - 0,5	12	57	31	3	89	8	11	70	19	7	93	0
0,5 - 1,0	18	70	12	4	72	24	4	78	18	6	94	0
1,0 - 1,5	3	49	48	5	50	45	15	70	15	14	82	4
1,5 - 2,0	3	46	51	4	59	37	12	70	18	4	94	2
2,0 - 2,5	11	62	27	8	92	0	8	82	10	6	94	0
2,5 - 3,0	10	58	32	2	98	0	9	79	12	8	92	0
3,0 - 3,5	-	-	-				5	69	26	8	78	14
3,5 - 4,0	16	71	13				6	60	34	8	76	16
4,0 - 4,5	9	55	36							7	81	12
4,5 - 5,0	8	58	34							12	75	13

Bennett e Nelsen (1983) observaram que as características marinhas mais relevantes para a engenharia offshore e estudos científicos estão relacionadas à morfologia, às rápidas mudanças em processos físicos oceanográficos, às variações na textura, às variações nas taxas de erosão, à sedimentação e ao transporte de sedimentos. Logo, foi proposto, por meio de um estudo, a comparação e correlação das propriedades geotécnicas mencionadas com modelos texturais, a fim de estudar os processos de liquefação, consolidação, erosão, resistência e variações físicas e biológicas.

Wetzel (1990) relacionou a porosidade inicial presente em depósitos superficiais marinhos com limites de liquidez, plasticidade e índice de compressão (Fig. 2.1). A relação foi explicada através de equações que ressaltam a interdependência existente entre a porosidade média na superfície do sedimento e o limite de liquidez, entre o limite de liquidez e a área superficial específica e entre o índice de compressão e o índice de vazios.

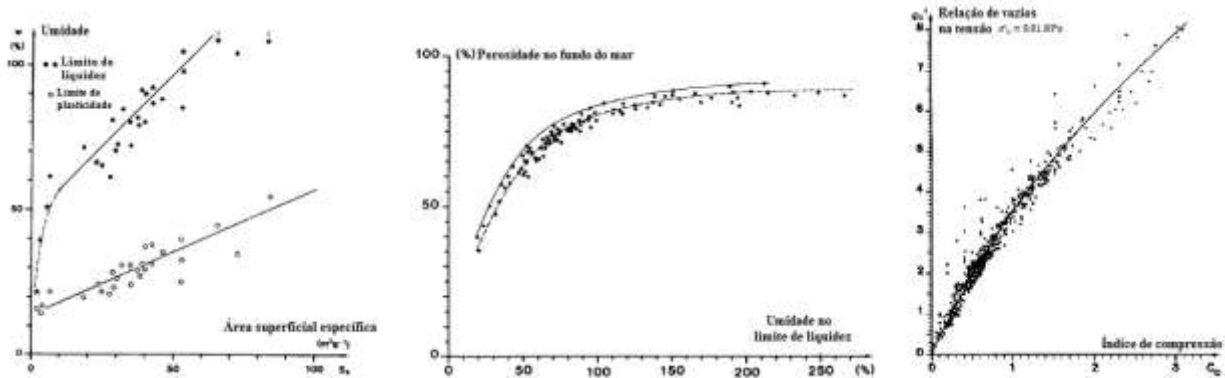


Figura 2.1. (a) Relação entre o limite de liquidez, limite de plasticidade e área superficial específica para sedimentos marinhos de grão fino (31 amostras), (b) Relação entre a porosidade e o limite de liquidez dos sedimentos superficiais marinhos de grão fino (intervalo de amostra 0 - 2 cm) e (c) Relação entre índice de compressão (C_c) e razão de vazios (e'_0) com $\sigma'_0 = 0,01$ MPa. (Fonte: modificado de Wetzel, 1990).

Tanaka et al. (2001) estudaram três depósitos de sedimentos argilosos, localizados em Cingapura, Bangkok e Ariake. A pesquisa foi desenvolvida através de ensaios de campo, tais como: palheta, piezocone, ensaio dilatométrico, ensaio de cone sísmico e extração de amostras com o auxílio do amostrador japonês, e posteriormente ensaios de laboratório, como: análise granulométrica, limites de Atterberg, peso específico real dos grãos, ensaio triaxial, ensaio de compressão simples, ensaios de difração de raios X e de microscopia eletrônica de varredura (Tab. 2.2). Após a realização dos ensaios, foram comparados os dados obtidos para cada depósito e observadas as diferenças presentes nas propriedades físicas e mecânicas, que foram correlacionadas à composição mineralógica e variações de ambientes de deposição.

Tabela 2.2. Caracterização de argilas de Ariake, Cingapura e Bangkok. (Fonte: modificado de Tanaka et al., 2001).

	Ariake		Cingapura	Bangkok	
	3 - 12 m	12 - 16 m	14 - 28 m	5 - 12 m	12 - 14 m
Idade geológica	Holoceno	Holoceno	Pleistoceno	Holoceno	Holoceno
Mineral de argila (principal)	Esmectita	Esmectita	Caulinita	Esmectita	Esmectita
ρ_s (g/cm ³)	2,60 - 2,63	2,60 - 2,63	2,76 - 2,78	2,72 - 2,75	2,72 - 2,75
Fração de argila (%)	50	50	65	50	50
LP	120 - 150	90 - 100	50 - 60	55 - 80	60
LL	105 - 130	65 - 95	65 - 80	45 - 85	80 - 85
I_P	60 - 100	40 - 50	40 - 60	30 - 70	60
I_L	1,2 - 1,5	1,1 - 1,7	0,6 - 0,8	0,6 - 1,1	0,6
C_v	100	100	30	10	10

Davis et al. (2002) abordam o uso de métodos geofísicos para a rápida avaliação das propriedades físicas dos sedimentos marinhos. O estudo teve caráter experimental e a intenção de buscar metodologias para classificação de sedimentos siliciclásticos na Baía de Irvine, no mar Clyde e no transepto Sul do mar Báltico. Após a calibração dos equipamentos para a geologia local e de posse dos dados gerados foi possível a elaboração de mapas de distribuição espacial das propriedades físicas dos sedimentos (porosidade, densidade e distribuição granulométrica), conforme Fig. 2.2.

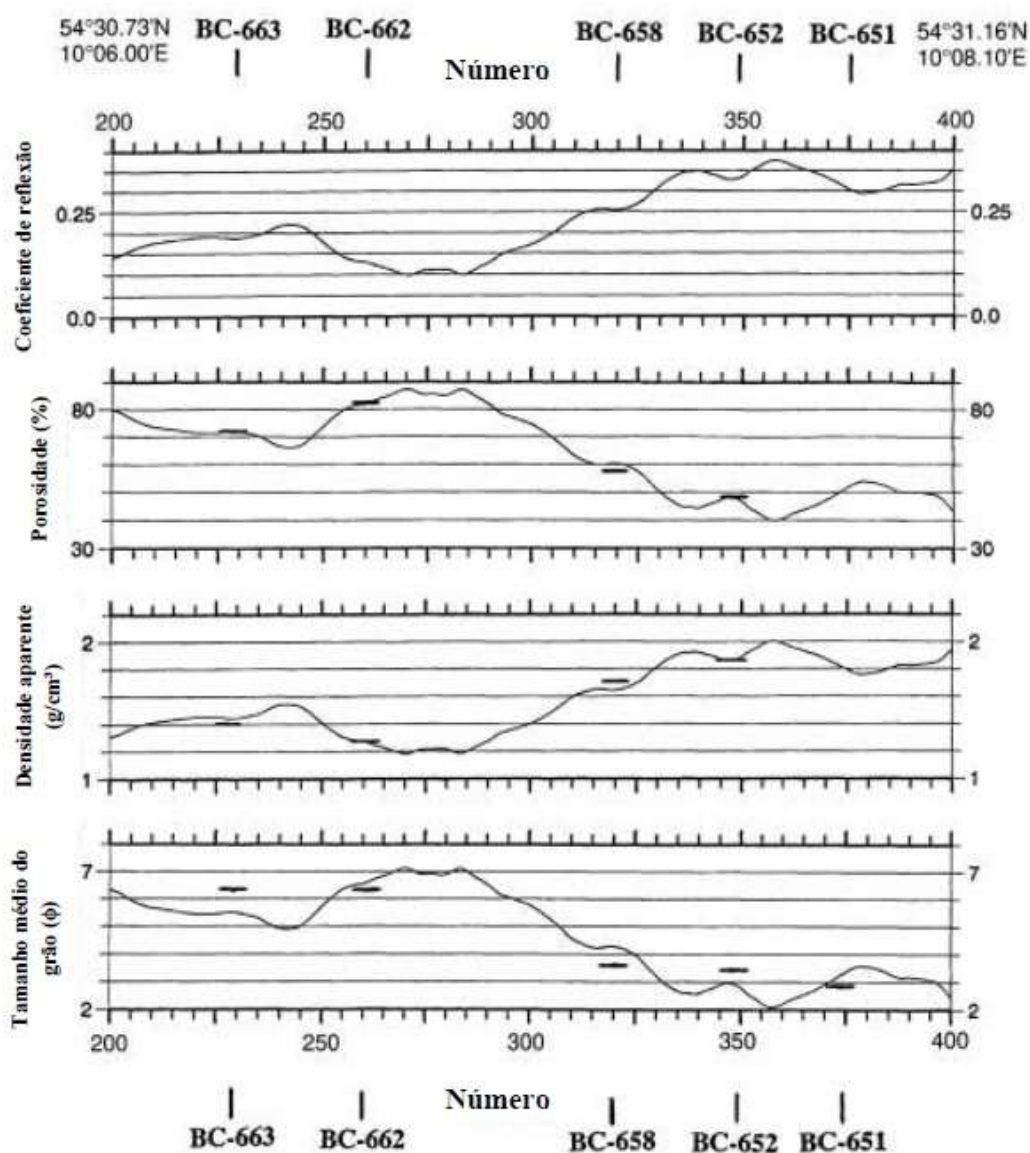


Figura 2.2. Perfil de coeficiente de reflexão de fundo calibrado e perfis de propriedades físicas de sedimentos obtidos acústicamente, linha no sul do Mar Báltico. (Fonte: modificado de Davis et al., 2002).

Ohtsubo et al. (2007) apresentam dados de configuração geológica, mineralógica, geoquímica de deposição, pós-deposição e propriedades geotécnicas dos sedimentos da Baía de Ariake, Japão. Os dados de caracterização apresentados foram obtidos através da extração de amostras em diferentes pontos na baía e realização de ensaios de caracterização.

Yan e Ma (2010) caracterizaram amostras localizadas entre 6 e 17 metros de cota batimétrica na costa norte de Taipa, Macau. O estudo englobou ensaios de resistência ao cisalhamento (ensaio de palheta), ensaios de caracterização básica (Fig. 2.3), ensaio oedométrico, ensaio de compressão triaxial e análise mineralógica através de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

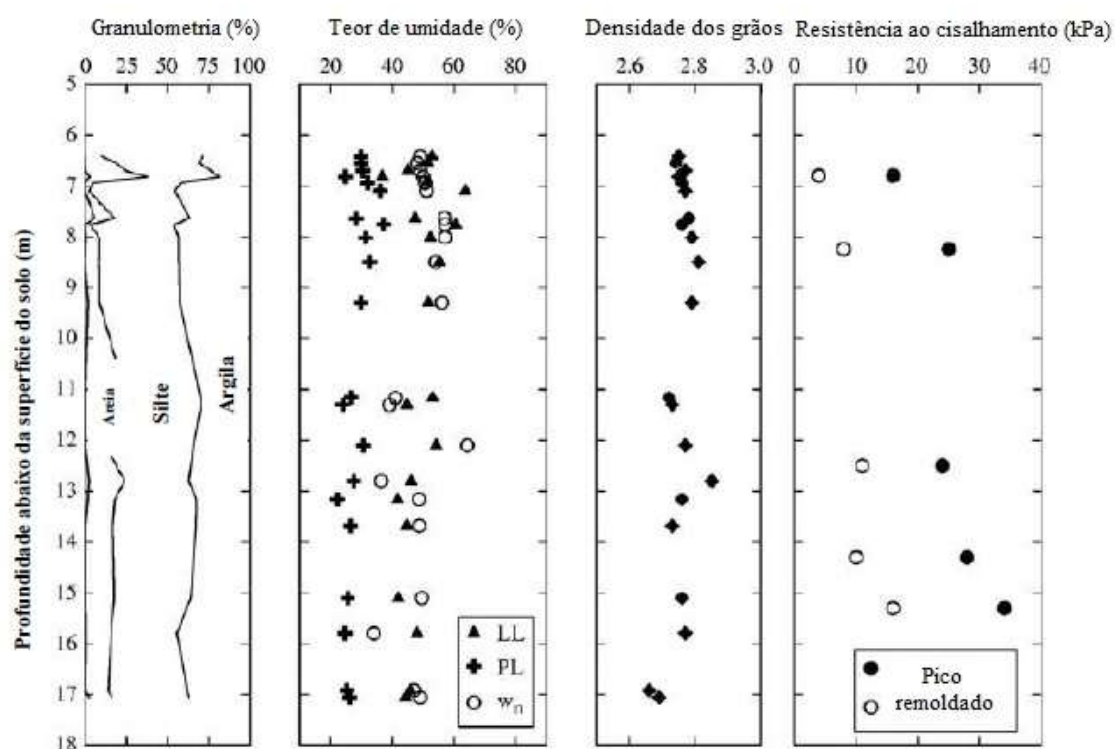


Figura 2.3. Propriedades geotécnicas dos depósitos marinhos versus lâmina d'água. (Fonte: modificado de Yan e Ma, 2010).

Liu et al. (2011) apresentam dados de mineralogia, geoquímica e geotecnia de argilas marinhas da região de Lianyungang (Fig. 2.4), na China, e promoveram uma discussão acerca da história de deposição, propriedades ambientais e geotécnicas, além de correlacionar propriedades geoquímicas e geotécnicas por meio de análise estatística.

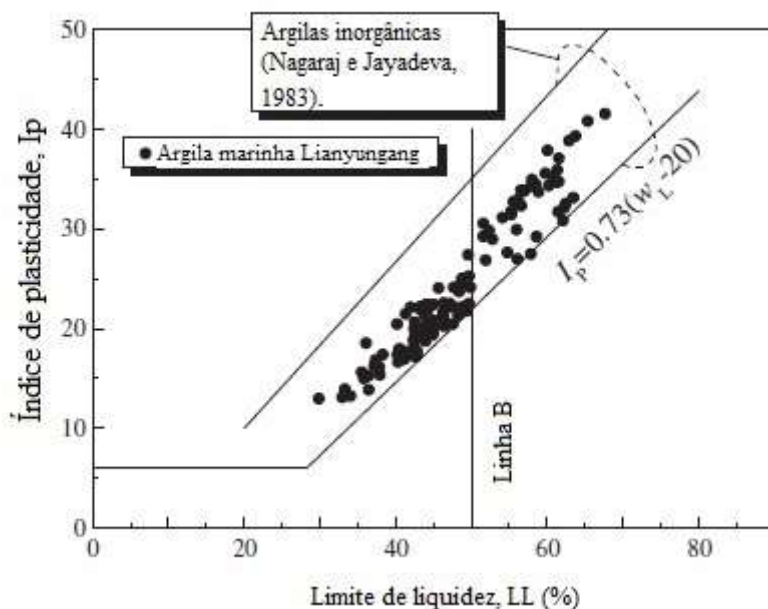


Figura 2.4. Localização da argila marinha Lianyungang no gráfico de plasticidade. (Fonte: modificado de Liu et al., 2011).

2.2. Caracterização de sedimentos superficiais na Bacia de Pelotas e Lagoa dos Patos

Diversos trabalhos anteriores tiveram como objetivo a caracterização de propriedades físicas, químicas e biológicas dos sedimentos superficiais presentes nas áreas da Lagoa dos Patos e Bacia de Pelotas. A seguir será feito um breve relato de alguns destes trabalhos.

Calliari et al. (1977) realizaram análise granulométrica, estatística e morfooscópica em 17 amostras de fundo coletadas com amostrador do tipo draga, na parte Sul da Lagoa dos Patos. Através do estudo foi possível identificar três tipos de fundo: arenoso, areno-lamoso e lama-arenosa, sendo que o primeiro encontra-se nas margens da lagoa (identificando assim um ambiente altamente energético), a segunda cobertura foi detectada em ambientes de cota batimétrica e energia intermediária, e o terceiro identificado em lâminas d'água mais espessas e de baixo valor energético, onde a deposição de sedimentos com fração fina é favorecida.

Calliari et al. (1980) analisaram 310 amostras de fundo coletadas na Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. As amostras foram submetidas a ensaios de peneiramento e pipetagem, e após análise sedimentar pelo diagrama triangular modificado (Shepard, 1954) foi proposto um mapa

granulométrico para o fundo da região estudada, onde identificaram que o assoalho lagunar é segmentado em seis fácies: arenosa, areno-siltica, areno-argilosa, mista, siltico-argilosa e argilo-siltica, sendo que a fração grosseira tende a diminuir e a argilosa a aumentar de acordo com a elevação da lâmina d'água.

Corrêa (1983) estudou a delimitação e localização dos bancos arenosos e o potencial econômico dos depósitos de calcário biodetríticos presentes na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul, no entorno das regiões do Albardão e Mostardas. A análise foi desenvolvida através de perfilagem com o equipamento *Side Scan Sonar*, obtenção de amostras por meio de amostrador do tipo Shippeek e Van Veen e extração de um testemunho (testemunhador do tipo Driscoll). Por intermédio dos dados adquiridos foram elaboradas cartas para a distribuição de sedimentos na região e estimado o volume de calcário biodetrítico.

Corrêa e Abreu (1984) realizaram um estudo estratigráfico em 22 testemunhos extraídos da plataforma continental do Rio Grande do Sul, com intuito de melhor exemplificar a distribuição e comportamento das fácies sedimentares. A pesquisa possibilitou caracterizar que os sedimentos presentes na plataforma continental são oriundos das Terras Altas do Rio Grande do Sul e da região Pampeana Argentina. Além disso, também foi possível identificar a idade geológica dos sedimentos através da análise dos testemunhos, identificando que a plataforma interna tem sua composição caracterizada por sedimentos exclusivamente holocênicos, já a plataforma externa e o talude continental são compostos por sedimentos holocênicos com veios de material pleistocênico.

Calliari e Abreu (1984) exploraram dados adquiridos com o auxílio do sonar de varredura, com a caracterização de 117 amostras (extraídas com a draga Gibbs) e a compilação de informações existentes de 122 amostras, para a plataforma continental interna entre o Farol Sarita e o Farol da Conceição. De posse dos resultados, foi confeccionado um mapa batimétrico e um textural, e por intermédio do mapa textural verificou-se a descontinuidade das fácies biodetrítica interna, Patos e Transicional, e a predominância da fácies arenosa.

Corrêa et al. (1996) analisaram a morfo-sedimentologia e a evolução paleográfica da plataforma continental entre Cabo Frio (RJ) e Chuí (RS). Com base no estudo granulométrico foram propostos mapas texturais para a região em questão, e identificado oito fácies sedimentares que atuam no recobrimento da plataforma continental, que são: arenosa, areno-siltica, areno-argilosa, siltica, siltico-arenosa, siltico-argilosa, argilo-siltica e areno-siltica-argilosa. Através do estudo, também foi possível concluir que a evolução paleográfica, pode ser dividida em três fases:

- 1ª fase (17500 anos BP - 16000 anos BP): período de transgressão holocênica, nível do mar passa de -120/ -130 metros para -100/ -110 metros; os sedimentos arenosos grosseiros eram depositados junto à costa, enquanto que as areias finas e areias lamosas/ lamas sedimentavam na plataforma interna e plataforma externa/ talude continental, respectivamente.
- 2ª fase (16000 anos BP - 11000 anos BP): nível do mar entre -60 metros e -70 metros; os sedimentos correspondem a areias lamosas.
- 3ª fase (11000 anos BP - 6500 anos BP): nível do mar apresentou dois estágios de estabilização, -32/ -45 metros e -20/ -25 metros; a costa foi moldada pela remobilização de areias transgressivas, enquanto que os sedimentos finos eram sedimentados em lâminas d'água mais profundas.

Antiqueira e Calliari (2005) identificaram, tomando como base as informações obtidas através do estudo de 179 amostras de fundo, seis tipos de fácies sedimentares presentes no entorno da desembocadura da Lagoa dos Patos, sendo elas: areia siltica, areia, silte argiloso, areia argilosa, areia-silte-argila e argila siltica. A pesquisa apresentou, como produto, um mapa textural, que foi construído por meio da metodologia de Pejrup (1988), que considera as condições hidrodinâmicas do local nos processos de sedimentação.

Abreu e Calliari (2005) analisaram dados logrados através do método sísmico raso Sparker®, para a plataforma continental interna do Rio Grande do Sul (localidade de Mostardas até a desembocadura da Lagoa dos Patos). Após a interpretação dos registros sísmicos, pode-se concluir que tanto a cobertura sedimentar quanto a geomorfologia da plataforma foram influenciadas por regressões e transgressões marinhas, sendo que as exposições possibilitaram a formação de redes de drenagem fluvial e de sistemas laguna-barreira, enquanto que o período de transgressão causou o afogamento das desembocaduras fluviais, e resultou no modelo costeiro conservado até a atualidade.

Bulla e Hartmann (2009) analisam as classes granulométricas dos sedimentos presentes no Canal São Gonçalo, localizado entre os municípios de Rio Grande e Pelotas, Rio Grande do Sul. O estudo se desenvolveu através da comparação entre dados obtidos com o sonar de varredura lateral, onde foi mapeado o leito do canal em um trecho de aproximadamente 30 km, e o método convencional de extração de amostras, por meio de um amostrador do tipo Van Veen, execução de ensaios de peneiramento e pipetagem e classificação de acordo com o diagrama de Shepard (1954).

As informações logradas por intermédio da análise granulométrica apresentaram uma boa correlação com a análise sedimentar proposta pelo programa de análise de dados do sonar.

Paixão (2012) propôs um mapa faciológico (Fig. 2.5), baseado na interpolação de 1695 amostras superficiais, para a Bacia de Pelotas, contemplando a plataforma continental e talude. A partir do mapa elaborado, foi constatado que o fundo da região estudada é composto por onze fácies sedimentares: areia, silte, argila, cascalho, sedimento cascalho, lama, lama arenosa, areia siltosa, silte arenoso, argila arenosa e areia argilosa.

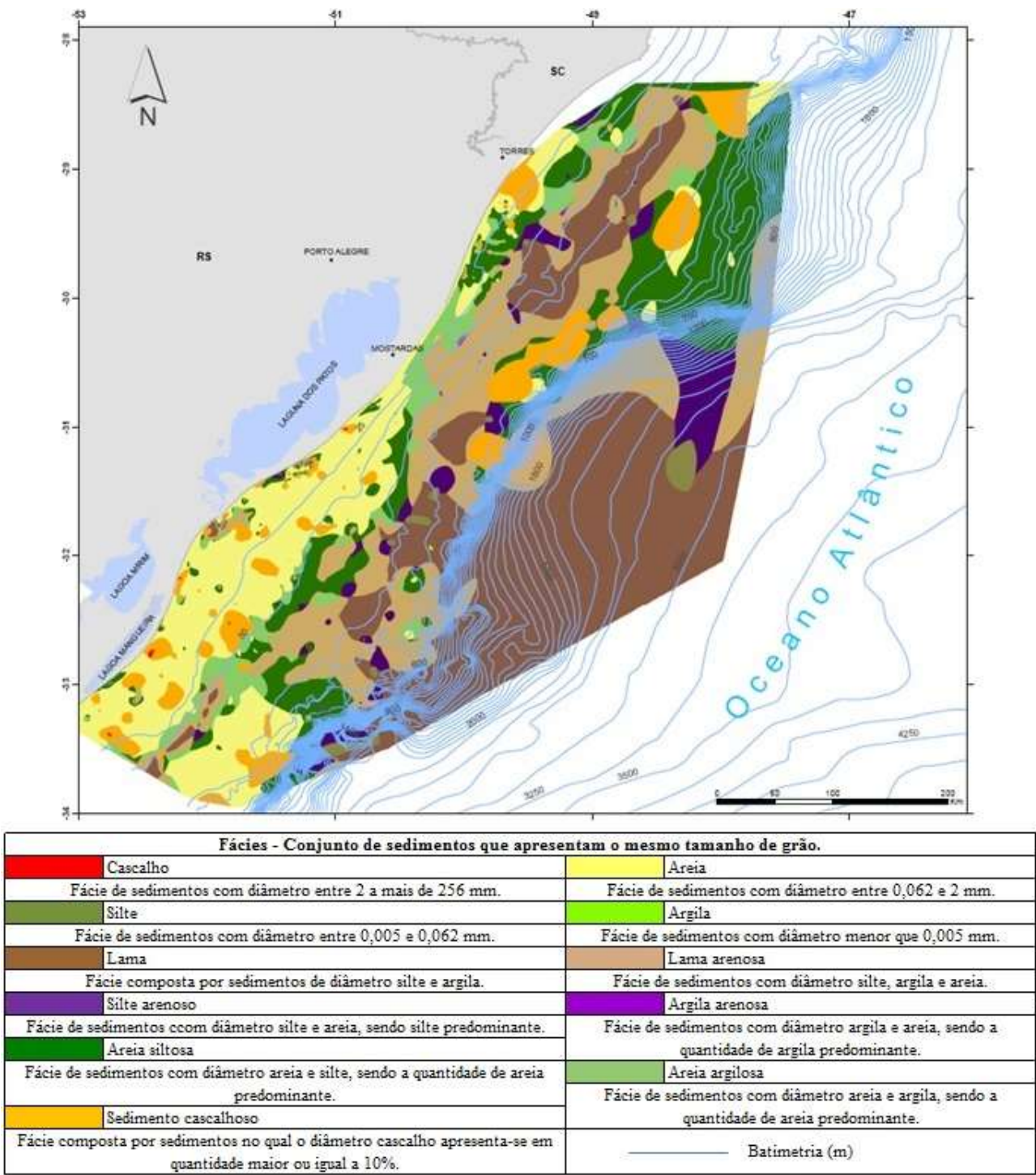


Figura 2.5. Mapa faciológico da Bacia de Pelotas. (Fonte: Modificado de Paixão, 2012).

Marroig (2015) estudou o transporte de lama fluida na Lagoa dos Patos e sua relação com o acúmulo de sedimentos no Canal do Porto de Rio Grande. Foram analisados dados de caracterização geotécnica básica, densidade, velocidade de corrente, turbidez da água. Com base na

interpretação dos resultados conclui-se que o modelo apresentou boa representatividade em relação aos processos analisados. Ainda, foi proposto um mapa faciológico para o fundo lagunar (Fig. 2.6), confeccionado com base em informações de granulometria compilados de diversos mapas de distribuição granulométrica do fundo da Lagoa dos Patos, existentes na literatura. A cobertura sedimentar foi caracterizada pela presença de onze fácies, sendo elas: argila, argilo-siltica, siltica argilosa, siltosa, areno-argilosa, areno-siltica, areia muito fina, areia fina, misto, areia média, areia muito grossa, ressaltando que o tamanho do sedimento está diretamente interligado a energia inferida durante o processo de sedimentação e a cota batimétrica, ou seja, quanto maior a cota batimétrica e menor a energia, maior será a presença de finos.

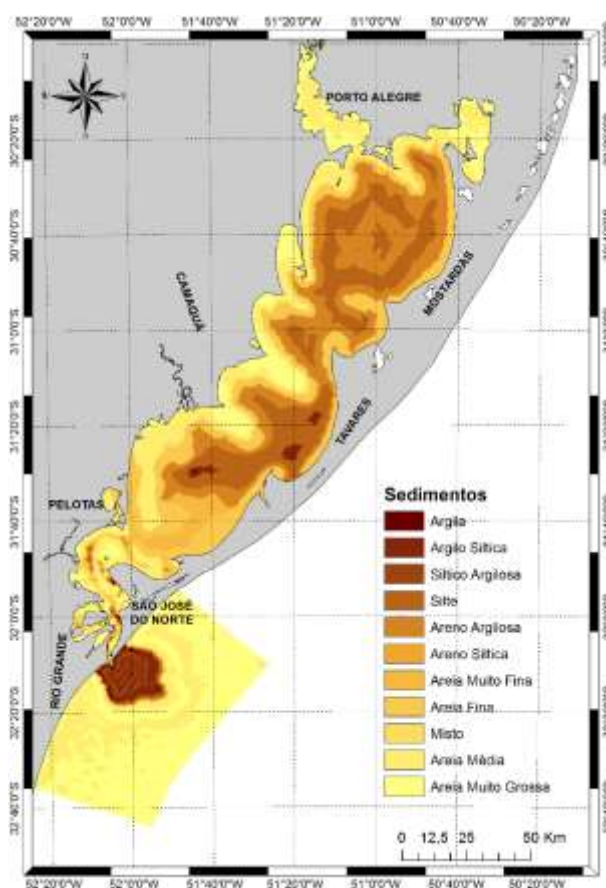


Figura 2.6. Mapa faciológico da Lagoa dos Patos. (Fonte: Marroig, 2015).

2.3. Métodos de investigação geotécnica sob lâmina d'água

2.3.1. Métodos diretos de investigação

a. Amostradores

O processo de escolha do tipo de amostrador a ser empregado em uma campanha para coleta de sedimentos envolve uma série de considerações, tais como: a qualidade desejada da amostra, parâmetros que se deseja alcançar através de ensaios de laboratório, tipo de solo presente no local onde vai se extrair a amostra, limitações de lâmina d'água e tamanho de amostra que se deseja obter.

De acordo com Tanaka et al. (2001), apesar da qualidade de uma amostra ser de extrema importância para a confiança das propriedades do solo e para futuras comparações de solos analisados em diferentes regiões, não existe um procedimento padrão ou normativo referente ao método de amostragem mais adequado.

Cabe ressaltar que a escolha do tipo de amostrador a ser empregado em uma campanha de coleta de amostras é de suma importância, pois ele vai determinar o tipo de amostra (deformada ou indeformada), a quantidade de sedimento, bem como os futuros estudos que poderão ser aplicados a cada amostra extraída.

Para a extração de amostras superficiais sob lâmina d'água, os equipamentos de coleta mais disseminados incluem dragas, *box corer*, amostrador de gravidade e *vibrocorer*. A fim de auxiliar na técnica de escolha, a Tab. 2.3 apresenta um resumo com os amostradores frequentemente empregados em águas rasas, qualidade da amostra coletada, altura da amostra e suas aplicações.

Tabela 2.3. Tipos de amostradores (Fonte: modificado de Thompson e Beasley, 2012).

Tipo de amostrador	Qualidade da amostra	Comprimento máximo da amostra (m)	Aplicação	Comentários
Draga	Baixa	0,61	Classificação dos solos (SUCS) e testes de índice físicos.	Barato e sem limitação de profundidade de água.
Box corer	Muito alta	0,61	Classificação dos solos (SUCS) e amostras para testes de resistência e de índices físicos.	Sem limitação de profundidade da água; pré disparo provoca atrasos em águas profundas.
Amostrador de gravidade	Alta	1,22 3,05 9,14	Classificação dos solos (SUCS) e amostras para testes de resistência e de índices físicos.	Sem limitação de profundidade da água.
Vibrocorer	Moderada	6,10 - 12,20	Classificação dos solos (SUCS) e amostras para testes de índices físicos.	Usado principalmente nas areias; profundidade da água limitada por cabos de energia.

A seguir tem-se uma breve descrição dos principais tipos de amostradores utilizados sob lâmina d'água são:

- **Draga**

A coleta de sedimentos realizada através de amostradores do tipo draga (Fig. 2.7) permite a obtenção de amostras deformadas, o que resulta na impossibilidade da determinação de características representativas de resistência e deformabilidade do solo.

De acordo com Thompson e Beasley (2012), esse é o método mais simples utilizado para a extração de sedimentos de amostras superficiais sob lâmina d'água, e em certos fundos, como os compostos por cascalhos ou seixos, é o único método capaz de obter amostras superficiais.

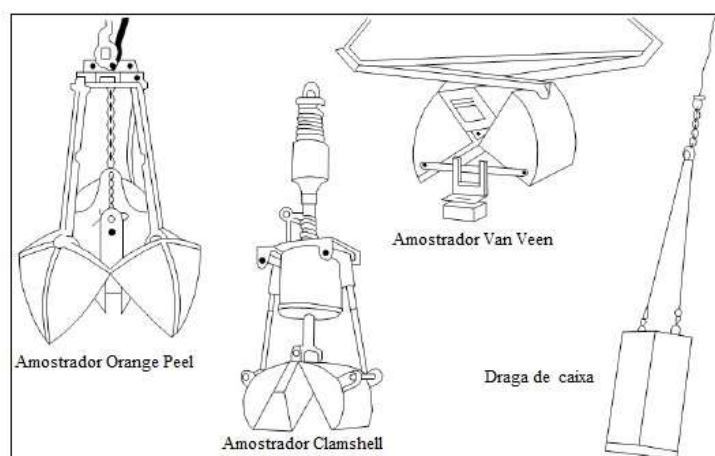


Figura 2.7. Tipos de dragas para amostragem sob lâmina d'água (Fonte: Modificado de Thompson e Beasley, 2012).

- **Box corer**

O amostrador de fundo tipo *box corer* tem a capacidade de extrair amostras relativamente indeformadas, uma vez que o equipamento penetra no solo apenas por peso próprio ou com o auxílio de lastro adicional de peso. Após penetrar no solo, a lâmina acoplada ao conjunto corta a porção de sedimento e promove o fechamento da caixa, a mesma passa a armazenar no seu interior um cubo amostral com propriedades integras, desde que o processo provoque o mínimo possível de perturbação. Na sequência o *box corer* é recolhido, e a partir da amostra principal pode-se originar diversas subamostras.

Basicamente, existem duas derivações desse equipamento, tipo Ekman e tipo Reineck (Fig. 2.8), que se diferem pelo procedimento de corte e fechamento da caixa.

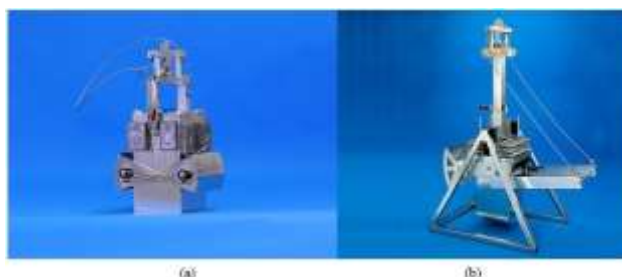


Figura 2.8. Amostrador de fundo box corer tipo (a) Ekman (b) Reineck (Fonte: www.kc-denmark.dk/products/sediment-samplers.aspx).

- **Amostrador de gravidade**

O amostrador de gravidade (Fig. 2.9) permite a visualização e estudo de camadas sedimentares, o seu manuseio consiste em içar e introduzir o equipamento em lâmina d'água, através de cabos de aço e guincho, lançando-o em queda livre somente nos últimos metros de coluna d'água. A massa acoplada ao topo do tubo provê a energia apropriada para a sua cravação em leito marinho ou lagunar. Os amostradores de gravidade podem ou não contar com pistão, para melhor retenção da amostra no tubo.

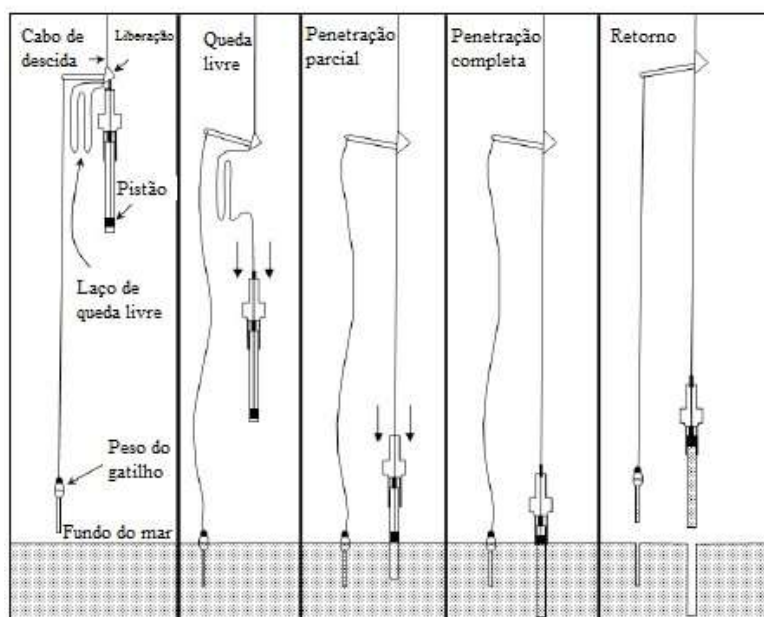


Figura 2.9. Procedimento de ensaio do amostrador de gravidade (Fonte: Modificado de Thompson e Beasley, 2012).

- ***Vibrocorer***

O amostrador tipo *vibrocorer* (Fig. 2.10) é capaz de obter amostras de camadas sedimentares superiores ao amostrador de gravidade. A sua limitação de operação somente é fruto da viabilidade de oferecer energia ao vibrador que fica vinculado ao suporte e junto com o tubo amostral integra o equipamento.



Figura 2.10. Amostrador do tipo vibrocorer (Fonte: Thompson e Beasley, 2012).

b. Ensaios *in situ* intrusivos

Frente aos desafios pertinentes a amostragem de solo sob lâmina d'água, tais como dificuldades de amostrar o sedimento devido a sua baixa compacidade ou consistência, o emprego de ensaios *in situ* têm se difundido e revela-se como uma solução na obtenção de parâmetros geotécnicos no local onde a amostra encontra-se disposta.

Existe uma considerável variedade de ensaios com o propósito de determinar, de forma direta ou indireta, as propriedades típicas de um dado solo, como resistência, deformabilidade, permeabilidade, densidade relativa e estado de tensões. Dentre os ensaios *in situ* intrusivos sob coluna d'água, os normalmente empregados no meio geotécnico e marinho são: Ensaio de penetração (SPT), Ensaio de piezocone (CPTU), Ensaio de dilatômetro de Marchetti (DMT), Ensaio

Pressiométrico (PMT), Ensaio de palheta ou *vane test* (VST), Ensaaios de penetração por queda livre (FFPT) (Fig. 2.11) e Ensaaios de densimetria (DensiTune).

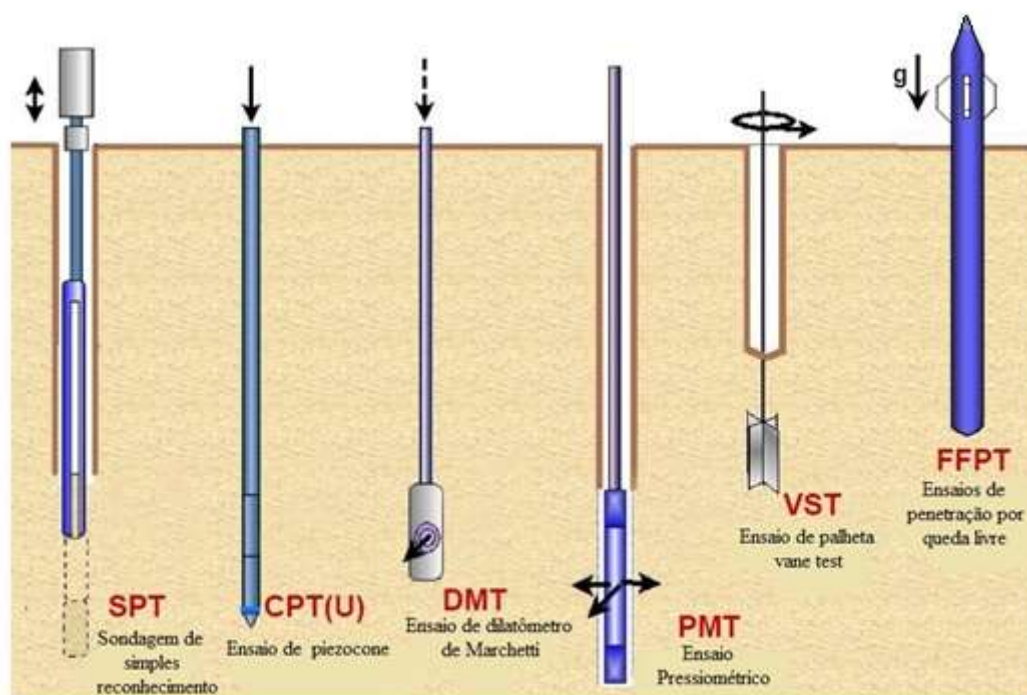


Figura 2.11. Ensaaios in situ intrusivos sob coluna d'água.

- **Sondagem de simples reconhecimento com SPT (*Standard Penetration Test*)**

A sondagem de simples reconhecimento com SPT tem como características um baixo custo e facilidade de execução. O processo de perfuração, que utiliza circulação de água e trépano de lavagem, permite o exame tátil-visual dos materiais trazidos à superfície. A cada metro de perfuração, devem ser colhidas amostras dos solos por meio de um amostrador padrão, e execução do ensaio SPT.

O ensaio SPT fundamenta-se na penetração do amostrador por meio do impacto de um martelo com massa de 65 kg, dotado de haste guia e coxim de madeira, caindo de uma altura de queda de 75 cm. É contado o número de golpes necessário para produzir uma penetração de 45 cm do amostrador. Esta contagem é feita ao longo de três trechos de 15 cm. A soma do número de golpes dos dois últimos trechos é chamada de NSPT, que é um índice correlacionável com a consistência de solos argilosos e com a compacidade de solos arenosos. Posteriormente ocorre o avanço do trépano por circulação de água até o próximo metro inteiro de profundidade. O

detalhamento do procedimento de ensaio e dos equipamentos utilizados encontram-se na norma brasileira ABNT NBR 6484/2001.

A sondagem de simples reconhecimento com SPT pode ser realizada sob lâmina d'água, como indicado por Bogossian (2012). Podem se utilizar para tal plataformas fixas (Fig. 2.12), flutuantes (Fig. 2.13) ou o sino de sondagem (Fig. 2.14), invenção brasileira para realização do ensaio no leito marinho.



Figura 2.12. Plataforma fixa para ensaios SPT sob lâmina d'água.



Figura 2.13. Flutuante para ensaios SPT sob lâmina d'água (Fonte: Bogossian, 2012).

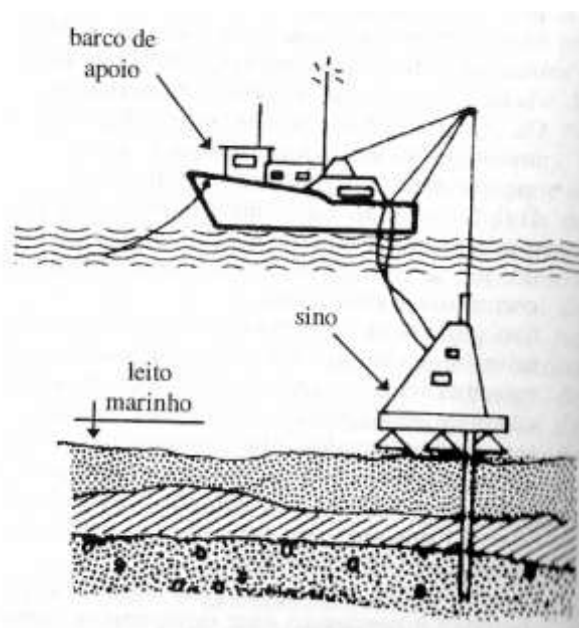


Figura 2.14. Sino de sondagem (Fonte: Mello e Bogossian, 1998).

- **Ensaio de piezocone (CPTU)**

O ensaio de piezocone (CPTU) permite a caracterização contínua do perfil do subsolo e apresenta maior sensibilidade na medida de resistência de solos moles. Contudo, o ensaio apresenta algumas desvantagens como um custo relativamente alto e a necessidade de um sistema de reação adequado.

O ensaio de CPTU baseia-se em cravar um penetrômetro no solo, com velocidade constante. A medida em que ele é inserido no solo os valores de resistência de ponta (q_t), atrito lateral (f_s) e

poropressão (u) na ponteira instrumentada são obtidas. Os resultados do ensaio permitem estimar a resistência e avaliar a dissipação de poropressão em argilas moles. Na Figura 2.15 mostra-se os principais elementos do equipamento submarino e da ponteira instrumentada.

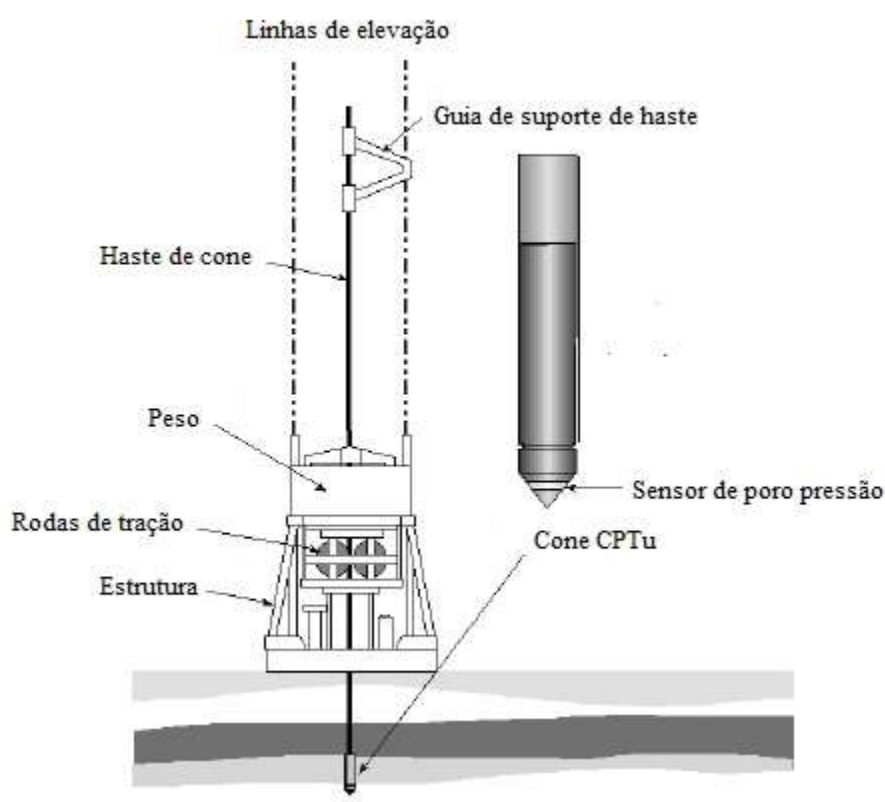


Figura 2.15. Principais elementos do equipamento para realização do ensaio de CPTu e ponteira instrumentada (Fonte: Modificado de ISSMGE, 2005).

Segundo Bogossian (2012), os ensaios de piezocone sob lâmina d'água podem ser realizados com auxílio de equipamento submarino (Fig. 2.16 a), com o auxílio de colunas de perfuração a partir de navios de sondagem (Fig. 2.16 b). Também é possível a realização do ensaio a partir de plataformas apoiadas sobre monotubos, como os ensaios realizados para o projeto de prolongamento dos molhes de Rio Grande (Fig. 2.17).

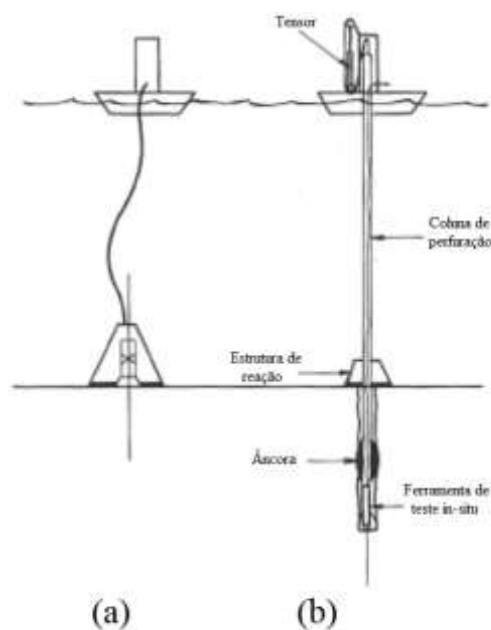


Figura 2.16. Ensaio de piezocone (a) em fundo marinho (b) com auxílio de coluna de perfuração (Fonte: Modificado de Harris et al., 2008).



Figura 2.17. Ensaio de piezocone em plataforma apoiada sobre monotubos (Fonte: Rabassa, 2010).

Em ambientes *offshore*, têm-se adotado também ponteiras com diferentes geometrias, como por exemplo: ponteiras cônicas com diferentes ângulos de ápice, bola, placa ou T-Bar (Fig. 2.18). Estas ponteiras com geometrias diferenciadas apresentam algumas vantagens quanto à modelagem analítica e numérica.



Figura 2.18. Ponteiras adotadas em ensaios penetrométricos (Fonte: Modificado de Randolph et al., 2005).

- **Ensaio de dilatômetro de Marchetti (DMT)**

O ensaio de dilatômetro de Marchetti (Fig. 2.19) é de rápida execução e de baixo custo, no entanto o equipamento precisa ser calibrado para a geologia local e apresenta dificuldades para penetrar em solos muito compactos ou rijos.

O procedimento fundamenta-se em inserir a lâmina dilatométrica no solo a velocidade constante, e a cada 20 cm interromper a penetração e expandir a membrana circular de aço, a cada expansão registra-se a pressão P_0 , que é a pressão necessária para deslocar 0,05 mm da membrana, a pressão P_1 , que é a pressão necessária para deslocar 1,10 mm a membrana e a pressão P_2 , que corresponde à pressão interna durante a despressurização (Schnaid, 2000).

De posse desses dados do ensaio, já corrigidos, tem-se a possibilidade de determinar o módulo dilatométrico (E_D) - módulo drenado para areias e não drenado para argilas, o índice de material (I_D) - o indicador do tipo de solo, e o índice de tensão horizontal (K_D) - que permite a estimativa de K_0 e OCR do solo.

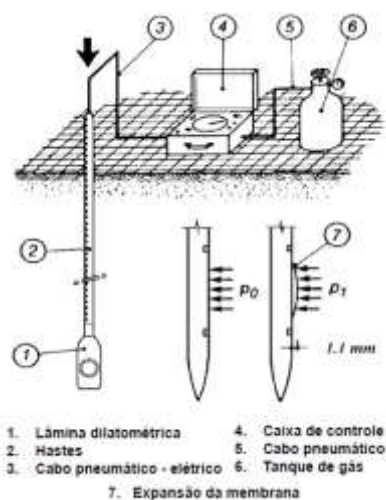


Figura 2.19. Ensaio com o dilatômetro de Marchetti (Fonte: Modificado de Marchetti, 2014).

O ensaio dilatométrico pode ser realizado sob lâmina d'água, a partir de plataformas, navios de sondagem ou utilizando equipamentos submarinos, como o mostrado nas Figs. 2.20 (a, b e c).



Figura 2.20. Ensaio de dilatômetro submarino, (a) realização do ensaio em fundo marinho a partir de navio de sondagem, (b) equipamento submarino para realização do ensaio e (c) equipamento submarino sendo colocado no local de realização do ensaio. (Fonte: Modificado de Marchetti, 2014).

• Ensaio Pressiométrico (PMT)

Para a execução do ensaio pressiométrico existem três tipos de pressiômetro, o inserido em um pré-furo (tipo Ménard), o auto perfurante (SBP) e o cravado (CPMT). O ensaio consiste em expandir a sonda pressiométrica no fundo do furo e, à medida que a sonda sofre a expansão uma prova de carga horizontal é imposta na massa de solo (Schnaid, 2000).

Com os parâmetros logrados no decorrer do ensaio consegue-se construir uma curva de pressão versus variação de volume, e através da curva estimar os pontos de pressão de repouso (P_0), pressão limite (P_1), pressão de fluência (P_f) e módulo pressiométrico (E_p). De posse desses parâmetros e com correlações chega-se a resistência não drenada e a capacidade de carga. É possível a realização do ensaio sob lâmina d'água, como demonstrado esquematicamente na Fig. 2.21.

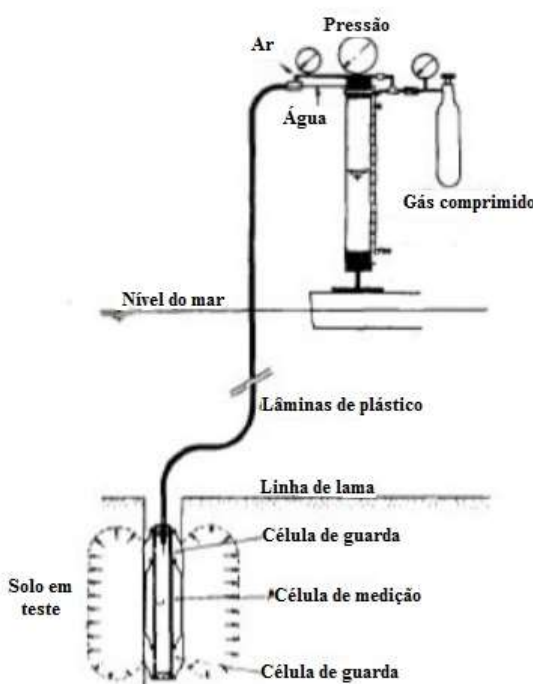


Figura 2.21. Ensaio pressiométrico realizado em pré-furo (Fonte: Modificado de Dayal, 1978).

- **Ensaio de palheta ou *Vane test* (VST)**

O ensaio de palheta (Fig. 2.22 a) consiste em cravar uma palheta em forma de cruz, na cota estabelecida, vagarosamente com o intuito de evitar maiores perturbações na massa de sedimento. Em seguida, impõem-se rotações à cruzeta com velocidade constante até a ruptura do solo. O ensaio mede o torque necessário para provocar a ruptura do solo, e, por intermédio de um cálculo analítico, obtêm-se a resistência ao cisalhamento não drenado (S_u). Após a determinação do S_u , ainda pode-se obter a medida de sensibilidade do solo, através da resistência residual.

Dentre as desvantagens do ensaio, as mais pertinentes são os custos relativamente elevados e a aplicação exclusiva a solos coesivos e com resistência menor do que 200 kPa.

O ensaio de palheta pode ser realizado sob lâmina d'água a partir de plataformas, navios de sondagem ou utilizando equipamentos submarinos, como o mostrado na Fig. 2.22 b.

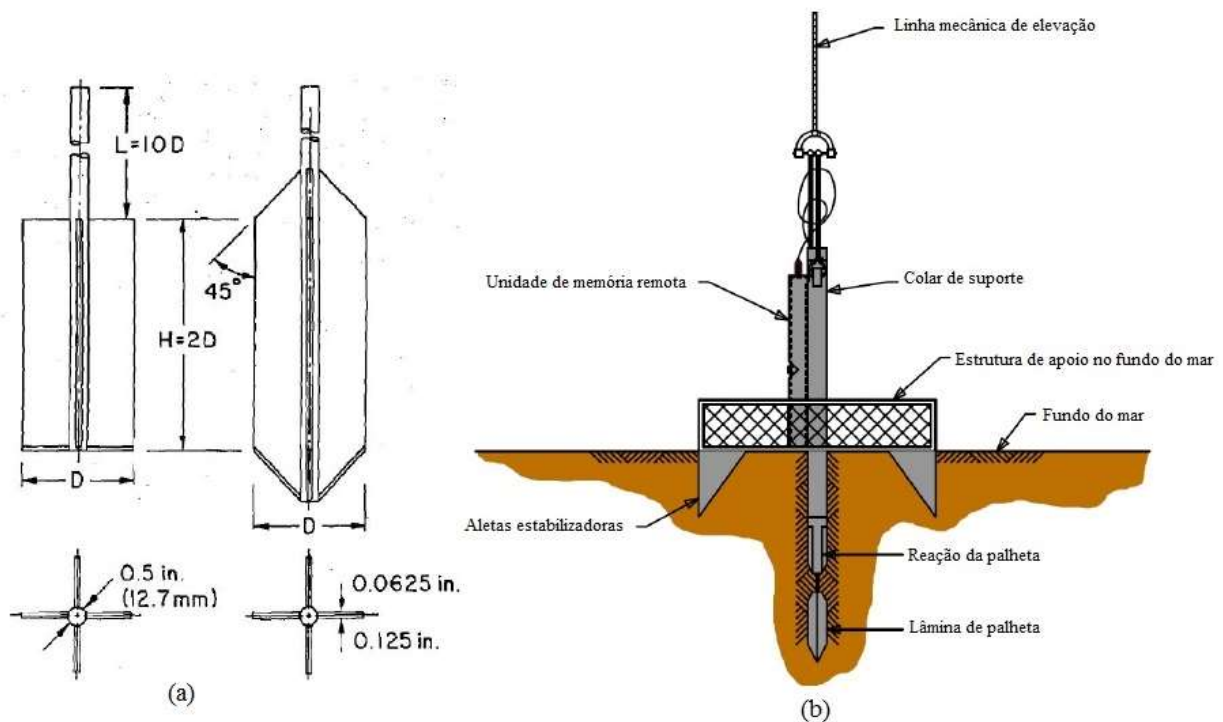


Figura 2.22. (a) Dimensões da palheta (b) Ensaio de palheta (Fonte: Modificado de Harris et al., 2008).

- **Ensaio de penetração por queda livre (FFPT)**

Existem diversos tipos (comerciais e acadêmicos) de penetrômetros de queda livre. Baldez (2010) descreve alguns deles, como o Expendable Bottom Penetrometer (XBP), o Expandable Doppler Penetrometer (XDP), o Free Fall Cone Penetrometer (FFCPT) e o Seabed Terminal Impact Newton Gradiometer (STING), mostrado na Fig. 2.23.



Figura 2.23. Ensaio com o equipamento STING (Fonte: Baldez, 2010).

Basicamente, todas as derivações do penetrômetro de queda livre medem a desaceleração do equipamento durante a penetração dele no solo, sendo que cada modelo apresenta singularidades em relação à forma, metodologia do ensaio e medições adicionais como sistema de aquisição de dados, sensor óptico e transdutor de pressão. Os dados adquiridos durante o ensaio, convenientemente interpretados, permitem a obtenção de um perfil de resistência ao cisalhamento do solo, ao longo do trecho penetrado.

- **Ensaio de densimetria - DensiTune**

O DensiTune (Fig. 2.24 a) possibilita a criação de perfis verticais de densidade/ viscosidade em relação a cota batimétrica, a medida que o equipamento penetra na lâmina d'água e em camadas de fundo fluida e semi-fluida (STEMA SURVEY SERVICES, 2006).

Segundo Allwright (2002), o ensaio tem sua fundamentação na relação de dependência entre a frequência ressonante do transdutor e a densidade do meio no qual está imerso. A frequência de ressonância decresce com o aumento da viscosidade do fluido, pois a viscosidade do ambiente provoca o amortecimento do sistema.

De acordo com o manual do equipamento (STEMA SURVEY SERVICES, 2006), o DensiTune necessita de prévia calibração para a reologia local, para assim gerar relações de frequência/ densidade representativas (Fig. 2.24 b).

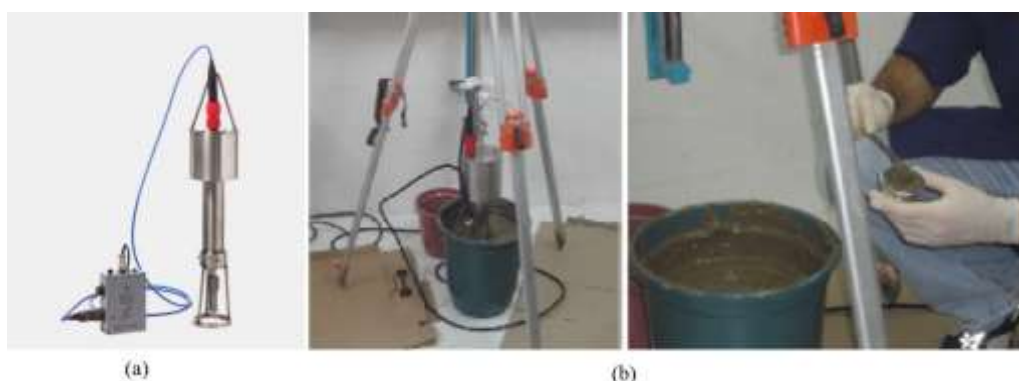


Figura 2.24. (a) Equipamento Densitune desenvolvido pela STEMA Systems (Fonte: www.stema-systems.nl) e (b) Calibração do Densitune e coleta de sub-amostras para determinação de densidade (Fonte: Leão, 2013).

2.3.2. Métodos indiretos de investigação

Na investigação de áreas submersas rasas, quatro métodos geofísicos são normalmente empregados (Souza, 2006):

- a. Método sísmico:** são métodos que utilizam como fonte a emissão de sinais acústicos, basicamente o diferencial entre os métodos existentes é a frequência e a amplitude de sinais emitidos;
- b. Método geoeletrico:** fundamenta-se no princípio de detectar a resistividade elétrica dos meios geológicos;
- c. Magnetometria:** método capaz de medir as alternâncias de campo magnético terrestre que surgem por intermédio da influência dos materiais com vulnerabilidades magnéticas distintas.
- d. Método eletromagnético:** é apto para mensurar o comportamento de ondas eletromagnéticas no interior da terra.

Apesar das particularidades de cada método, todos os métodos de ensaios geofísicos citados são geralmente realizados sob lâmina d'água por meio de um navio, onde se armazenam e registram os dados obtidos através de uma fonte de sinais ligada a embarcação (Fig. 2.25).

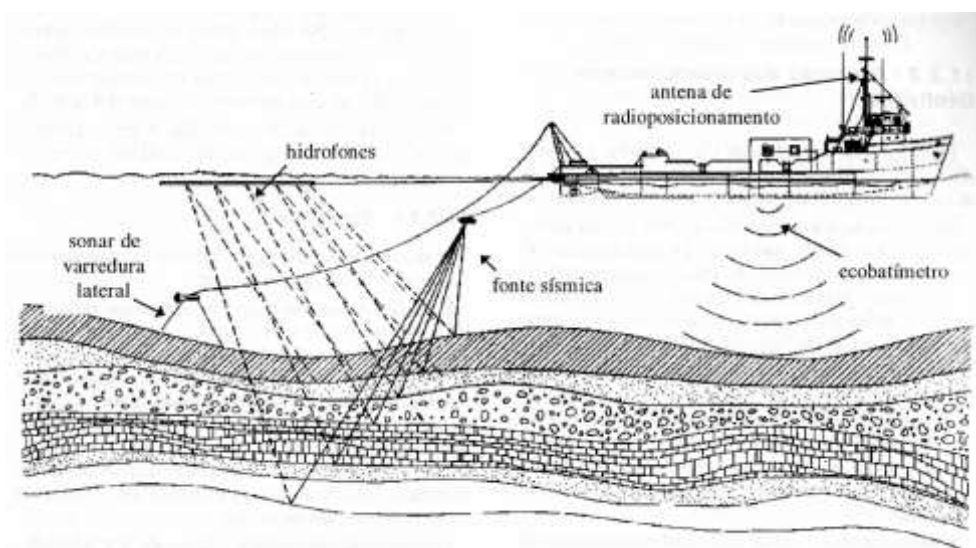


Figura 2.25. Navio de levantamentos geofísicos (Fonte: Mello e Bogossian, 1998).

Embora o uso dos ensaios geofísicos tenha se difundido nos últimos anos, devido aos desafios e dificuldades que a caracterização por métodos diretos apresenta, ainda se faz necessária a coleta de sedimentos, pois equipamentos utilizados em ensaios geofísicos (geralmente acústicos, como o sonar de varredura lateral e ecobatímetro), necessitam de calibração prévia com dados reais do leito marinho em estudo, para estabelecer um padrão de sinais acústicos e ser confiável (Bulla e Hartmann, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Áreas de estudo

Duas áreas imersas foram objeto do presente estudo. A primeira área localiza-se em ambiente marinho, entre as cidades de Rio Grande e Torres, no litoral do estado do Rio Grande do Sul (Bacia de Pelotas). A segunda área localiza-se em ambiente lagunar, entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul, na Lagoa dos Patos (Fig. 3.1).

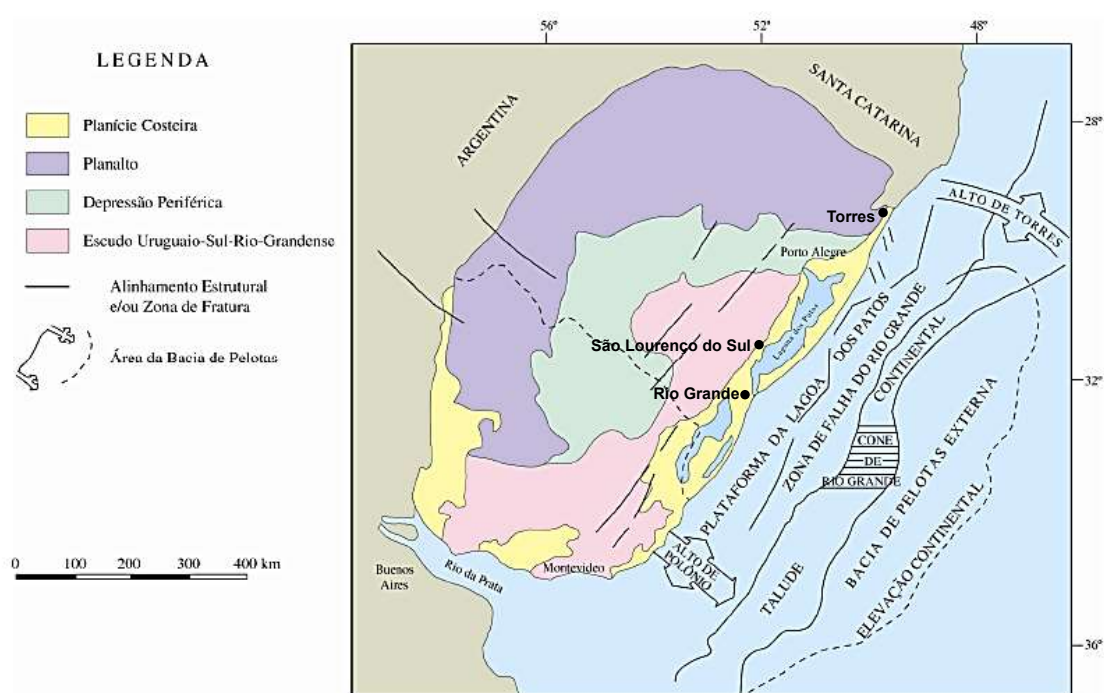


Figura 3.1. Fisiografia e principais estruturas da Bacia de Pelotas e área continental adjacente (Fonte: Modificado de Urien e Martins, 1978, apud Barbosa et al., 2008).

3.1.1. Área marinha entre Rio Grande e Torres (RS)

A área de estudo da primeira coleta de amostras, está compreendida entre as cidades de Rio Grande e Torres, no litoral do estado do Rio Grande do Sul, entre a barra do Rio Grande e a desembocadura do Rio Mampituba. As amostras foram extraídas entre as curvas isobatimétricas de 13,00 e 91,00 metros de lâmina d'água. Na Figura 3.2 encontram-se marcados os locais de extração das diversas amostras.

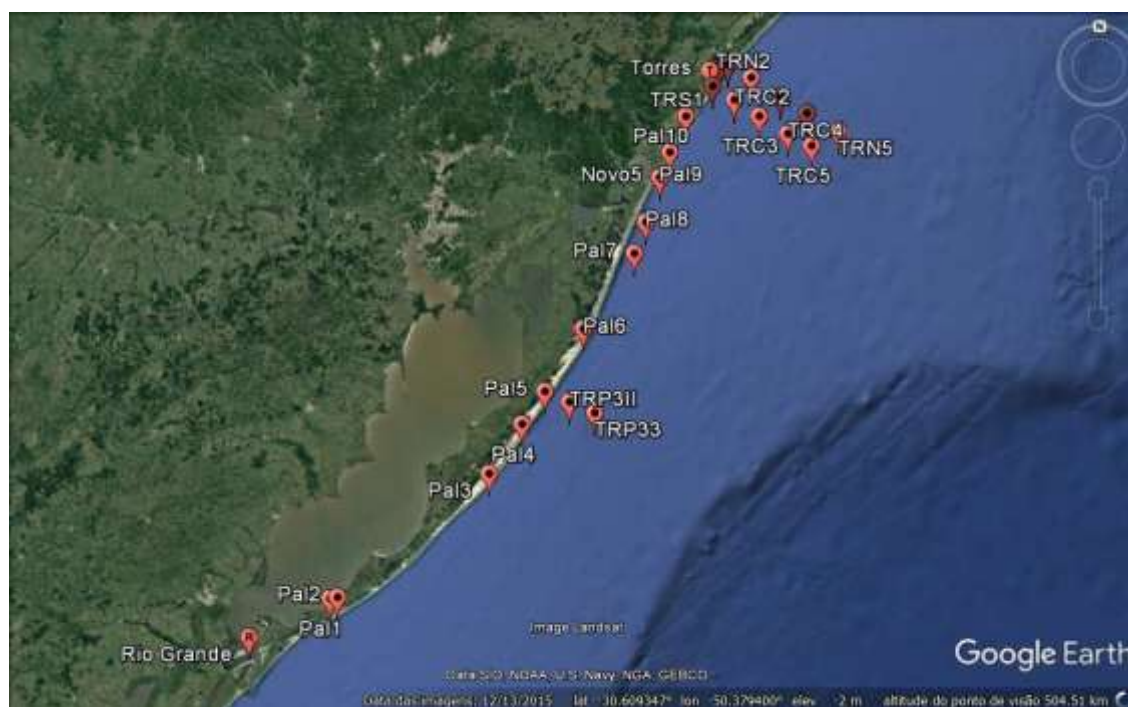


Figura 3.2. Localização dos pontos offshore de amostragem entre as cidades de Rio Grande e Torres (Fonte: Google Earth).

A coleta das amostras ocorreu em janeiro de 2013, durante um cruzeiro do navio oceanográfico Atlântico Sul, da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), patrocinado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT), quando foi obtido um conjunto de 27 amostras do fundo marinho. As coordenadas geográficas e a profundidade da lâmina d'água de cada ponto de amostragem encontram-se na Tab. 3.1.

Tabela 3.1. Coordenadas geográficas e profundidade da lâmina d'água nos pontos de amostragem (Rio Grande - Torres).

Amostra	Lâmina d'água (metros)	Coordenadas geográficas	
		Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)
Pal 1	13	31°50'37"	51°40'13"
Pal 2	14	31°50'09"	51°37'44"
Pal 3	18	31°14'36"	50°49'37"
Pal 4	17	31°00'37"	50°39'32"
Pal 5	18	30°51'20"	50°32'30"
Pal 6	18	30°33'39"	50°20'55"
Pal 7	24	30°12'13"	50°05'29"
TRP3II	42	30°54'01"	50°24'31"
TRP33	71	30°56'46"	50°16'15"
Pal 8	26	30°03'24"	50°02'15"
Pal 9	23	29°50'46"	49°58'26"
Pal 10	24	29°43'39"	49°55'24"
TRS 1	21	29°33'24"	49°50'44"
Novo 1	15	29°19'45"	49°41'46"
Novo 2	21	29°20'39"	49°41'50"
Novo 3	21	29°20'39"	49°41'50"
Novo 5	23	29°50'47"	49°58'22"
TRN 1	22	29°18'21"	49°37'56"
TRN 2	31,8	29°21'40"	49°30'20"
TRN 3	46	29°26'43"	49°20'45"
TRN 4	60	29°30'53"	49°12'02"
TRN 5	91	29°35'36"	49°01'44"
TRC 1	23	29°24'34"	49°42'33"
TRC 2	33	29°28'09"	49°35'29"
TRC 3	44	29°32'24"	49°27'17"
TRC 4	59	29°36'53"	49°17'55"
TRC 5	91	29°39'55"	49°10'08"

3.1.2. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS)

A segunda área de estudo está compreendida entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS), na Lagoa dos Patos. As amostras foram extraídas entre 2,50 e 14,40 metros de lâmina d'água. Na Figura 3.3, encontra-se o local onde foram obtidos os tubos amostrais.

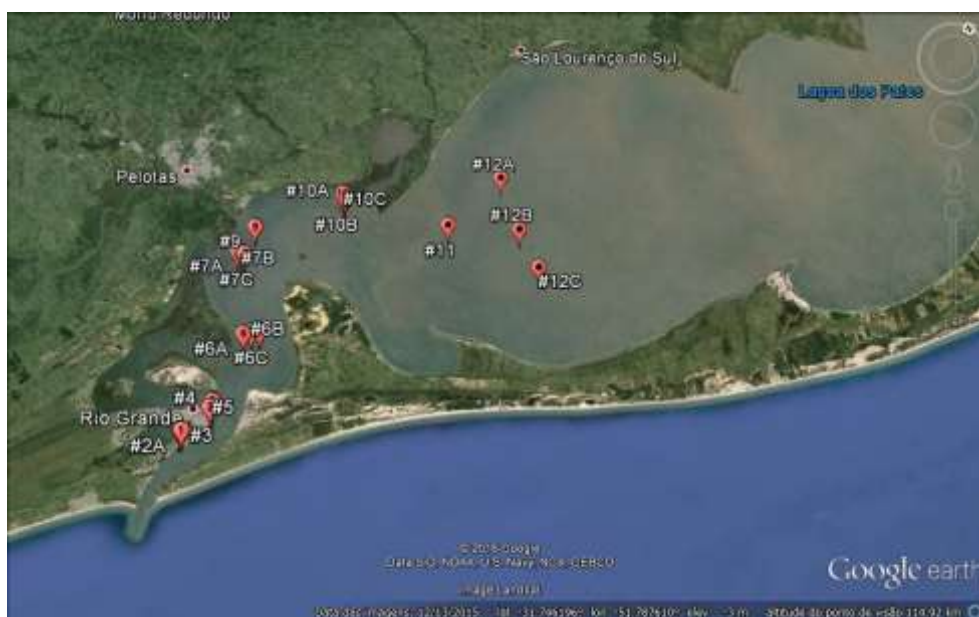


Figura 3.3. Localização dos pontos lagunares de amostragem entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (Fonte: Google Earth).

Essa segunda coleta aconteceu através de uma parceria entre o Laboratório de Engenharia Costeira - FURG e o Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (UFRJ), em fevereiro de 2014, e foi realizada com o auxílio da lancha Larus (FURG) para a coleta de sedimentos lagunares superficiais em 19 pontos amostrais. As coordenadas geográficas de cada ponto onde foram extraídas as amostras lagunares encontram-se expostos na Tab. 3.2.

Tabela 3.2. Coordenadas geográficas e profundidades de lâmina d'água nos pontos de amostragem (Rio Grande - São Lourenço do Sul).

Amostra	Lâmina d'água (metros)	Coordenadas geográficas	
		Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)
#2A	7,70	32°04'55"	52°05'20"
#2B	14,40	32°04'59"	52°05'31"
#6A	2,50	31°56'42"	52°05'35"
#6B	5,40	31°56'17"	52°05'06"
#6C	4,00	31°55'55"	52°04'30"
#7A	2,70	31°51'14"	52°10'26"
#7B	5,80	31°51'07"	52°10'05"
#7C	2,80	31°51'07"	52°09'47"
#9	5,00	31°48'47"	52°10'26"
#10A	3,90	31°42'54"	52°05'13"
#10B	8,50	31°43'19"	52°04'48"
#10C	3,40	31°43'30"	52°04'41"
#11	5,70	31°41'17"	51°54'58"
#12A	5,70	31°35'24"	51°52'59"
#12B	6,00	31°38'49"	51°48'54"
#12C	6,10	31°41'02"	51°45'32"
Bacia Porto Novo #03	10,20	32°02'35"	52°04'23"
Bacia Porto Novo #04	9,50	32°02'06"	52°04'34"
Bacia Porto Novo T#05	8,80	32°02'06"	52°04'30"

3.2. Amostragem

Nas duas campanhas de investigação, todas as amostras foram coletadas com amostrador de fundo tipo *box corer*, modelo Ekman. As dimensões da caixa eram 250 mm x 250 mm x 250 mm. O peso do equipamento vazio era de 76 kg, com possibilidade de usar lastro adicional de até 120 kg (Fig. 3.4).

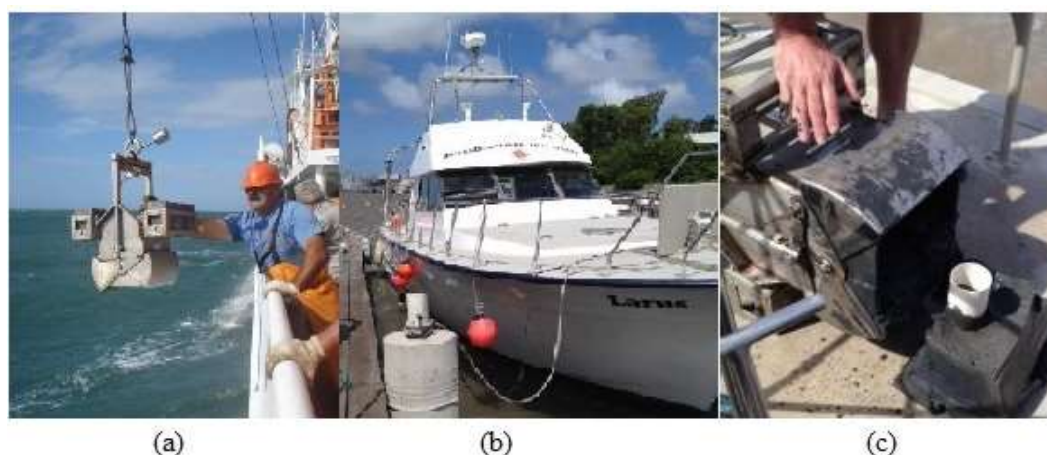


Figura 3.4. (a) Recolhimento de amostras entre Rio Grande e Torres (Fonte: Passos e Fontoura, 2015) (b) Lancha Larus utilizada para a coleta de sedimentos entre Rio Grande e São Lourenço do Sul (c) Amostrador de fundo tipo box corer com cubo amostral (Fonte: Marroig, 2015).

A operação para extração das amostras foi feita com auxílio de guincho e cabo de aço. A lâmina d'água operacional somente foi limitada pela velocidade de corrente, uma vez que correntes de grande magnitude podem vir a tombar o amostrador, impedindo assim seu fechamento.

Após o recolhimento do amostrador, o procedimento (repetido para as duas campanhas) consistia em introduzir vagarosamente no centro da amostra um tubo de PVC, com 75 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento. O tubo com a subamostra em seguida era fechado com tampa de PVC e lacrado com fita adesiva (para evitar a perda de umidade). Era feita uma marca em forma de seta no tubo, indicando o seu topo e a base da amostra (Fig. 3.5).



Figura 3.5. Subamostra do ponto Pal9 (Rio Grande - Torres).

Todos os tubos com sedimentos foram armazenados em câmara úmida no Laboratório de Geotecnia e Concreto - FURG, até o momento de abertura e realização dos ensaios.

3.3. Ensaios de laboratório

3.3.1. Ordem de realização dos ensaios

O primeiro ensaio realizado nas subamostras foi o ensaio de palheta de laboratório (*vane test*). Para tal, a subamostra era aberta, o tubo PVC era serrado em sua parte superior, se necessário, para possibilitar o alcance do equipamento de palheta na superfície da amostra (Fig. 3.6). O ensaio de palheta de laboratório seguiu o procedimento indicado por Head (1982), tendo por resultado a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) do sedimento, medida a 6,3 cm abaixo da superfície.

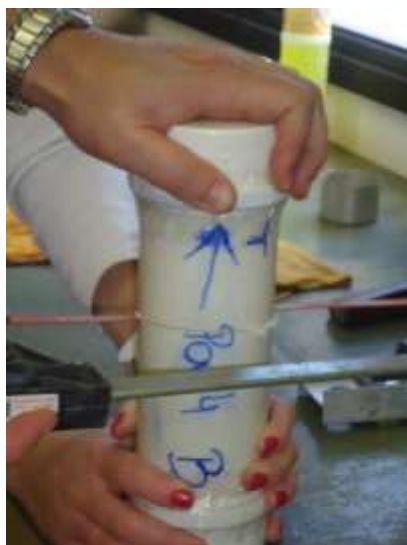


Figura 3.6. Preparo do tubo com a subamostra do ponto Pal4 (Rio Grande - Torres) para o ensaio de palheta de laboratório.

Após a realização do ensaio de palheta, as subamostras foram cuidadosamente extraídas dos tubos de PVC, com o auxílio de um extrator de amostras desenvolvido durante a pesquisa, para melhor se ajustar ao tubo amostrador, conforme Fig. 3.7.



Figura 3.7. (a) Extrator desenvolvido especificamente para os tubos amostrais da pesquisa (b) Extração da amostra Novo 5# (Rio Grande - Torres) do tubo amostral.

Na sequência, uma dada quantidade de material, localizado no ponto de realização do ensaio de palheta, era reservado para determinação do teor de umidade. Se a amostra apresentasse consistência adequada, um anel era moldado logo abaixo da profundidade do ensaio de palheta, para determinação do peso específico natural (admitindo que não ocorreu amolgamento da amostra) e ensaio de adensamento, quando possível.

Durante este processo, observou-se em algumas amostras a presença marcante de conchas marinhas, que poderiam interferir no resultado dos demais ensaios de caracterização. Na Figura 3.8 é mostrada a fotografia de uma amostra com presença de conchas.



Figura 3.8. Conchas presentes na amostra Pal8.

Após a moldagem do anel, as amostras foram submetidas aos seguintes ensaios de caracterização básica:

- Análise granulométrica, segundo os procedimentos da ABNT NBR 7181 (1988);
- Determinação da massa específica, através do ensaio de picnômetro, segundo os procedimentos da ABNT NBR 6508 (1984);
- Determinação do limite de liquidez, segundo os procedimentos da ABNT NBR 6459 (1984);
- Determinação do limite de plasticidade, segundo os procedimentos da ABNT NBR 7180 (1984).

3.3.2. Descrição dos procedimentos de laboratório para caracterização básica

a. Ensaio de palheta de laboratório (*vane test*)

Executado conforme os procedimentos indicados por Head (1982), que consiste em cravar a palheta no solo e submetê-la a rotação, à medida que a palheta sofre rotação mede-se um torque, a partir do torque medido é possível obter a resistência não drenada do solo (S_u), conforme Eq. 3.1, proporcional à resistência oferecida ao torque, medida a 6,3 cm abaixo da superfície (Fig. 3.9).

$$S_u = \frac{K \cdot \theta_f}{4,29} (kPa) \quad (3.1)$$

Onde:

S_u - Resistência ao cisalhamento não drenada;

K - Constante de calibração da mola de torção;

θ_f - Máximo ângulo de torção da mola (correspondente à ruptura do solo).

O valor de K é gerado a partir de curvas de calibração da mola, fornecidas pelo fabricante junto com o equipamento (Tab. 3.3).

Tabela 3.3 - Constante de calibração das molas (Fonte: www.viatest.com.br/manual).

Mola nº.	K (N mm/grau de torção)
1	3,4783
2	2,5259
3	1,7000
4	1,1830



Figura 3.9. Ensaio de palheta de laboratório na subamostra Pal9.

b. Determinação do teor de umidade da amostra - Método da estufa

O ensaio de determinação do teor de umidade (ABNT NBR 6457 (2016): Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Anexo A - Determinação do teor de umidade de solos), consistiu em separar duas cápsulas com solo em um ponto logo abaixo da profundidade onde foi realizado o ensaio de palheta e secar em estufa a 60 °C, para evitar a queima de matéria orgânica, por dois dias para determinar o teor de umidade, de acordo com a Eq. 3.2.

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (3.2)$$

Onde:

w - Teor de umidade;

W_w - Peso de água;

W_s - Peso de sólidos.

c. Anel para índices físicos e adensamento

Fundamenta-se em moldar um anel de dimensões conhecidas na amostra extraída do tubo amostral (Fig. 3.10), a partir do qual é possível obter o peso específico natural do solo (γ_{nat}), a partir da Eq. 3.3.

$$\gamma_{nat} = \frac{W}{V} \quad (3.3)$$

Onde:

γ_{nat} – Peso específico aparente natural;

W – Peso total da amostra;

V – Volume total da amostra.



Figura 3.10. Moldagem de anel para índices físicos e adensamento na subamostra TRN1.

O anel com solo pode ser utilizado para o ensaio de adensamento que é executado conforme ABNT NBR 12007 (1990). Compreende em ajustar o anel com o solo em uma célula oedométrica, e aplicar incrementos de carga. Para cada carga aplicada são esperadas 24 horas para cessar as deformações, durante esse período são feitas leituras de recalque que no final do ensaio geram curvas recalque x tempo.

d. Preparação da amostra para ensaios de caracterização

Por se tratar de amostras de fundo marinho e lagunar, com presença importante de matéria orgânica, é recomendado secar a amostra ao sol ou em estufa a 60 °C, a fim de evitar a queima da matéria orgânica.

A fim de evitar a influência da presença de conchas nos ensaios subsequentes, as mesmas foram retiradas manualmente das amostras após a secagem da amostra e antes da realização dos ensaios de granulometria, picnômetro e limites de Atterberg, conforme apresentado na Fig. 3.12.



Figura 3.12. Procedimento adotado para a retirada das conchas.

e. Granulometria por sedimentação (método do densímetro) e peneiramento

Segundo Nogueira (2001), o objetivo do ensaio de granulometria é a obtenção dos pares de valores, tamanho da partícula e sua porcentagem de ocorrência acumulada, necessários ao traçado da curva granulométrica.

No ensaio de granulometria pela ABNT NBR 7181 (1988) separa-se 120 gramas do material seco passante na peneira de abertura 2 mm e deixa-o imerso por 24 horas na solução defloculante de hexametáfosfato de sódio para desagregar as partículas. Passadas as 24 horas, a mistura é levada ao dispersor mecânico de amostras por 15 minutos, após é transferida para uma proveta e completada até a marca de 1 litro com água destilada. A proveta é então agitada por 1 minuto para homogeneizar a solução e colocada sobre uma bancada para assim iniciar as leituras de densidade da solução, que são feitas ao longo de 24 horas (Fig. 3.13).

Posteriormente, a solução é lavada em água corrente na peneira de abertura 0,075 mm e levada para a estufa a 60 °C por dois dias para secar. Com a amostra seca é possível realizar o peneiramento fino da amostra no conjunto de peneiras 1,2 mm; 0,60 mm; 0,42 mm; 0,30 mm; 0,15 mm e 0,075 mm (Fig. 3.14). Com os dados obtidos na sedimentação e no peneiramento fino é possível gerar a curva granulométrica do sedimento em análise.



Figura 3.13. Ensaio de sedimentação pelo método do densímetro.



Figura 3.14. Peneiramento fino da amostra Pal7.

Os resultados combinados dos ensaios de sedimentação e peneiramento permitem a construção de curvas granulométricas, relacionando o diâmetro equivalente dos grãos e a porcentagem acumulada de grãos menores do que aquele diâmetro (porcentagem “passante” acumulada), conforme exemplificado na Fig. 3.15.

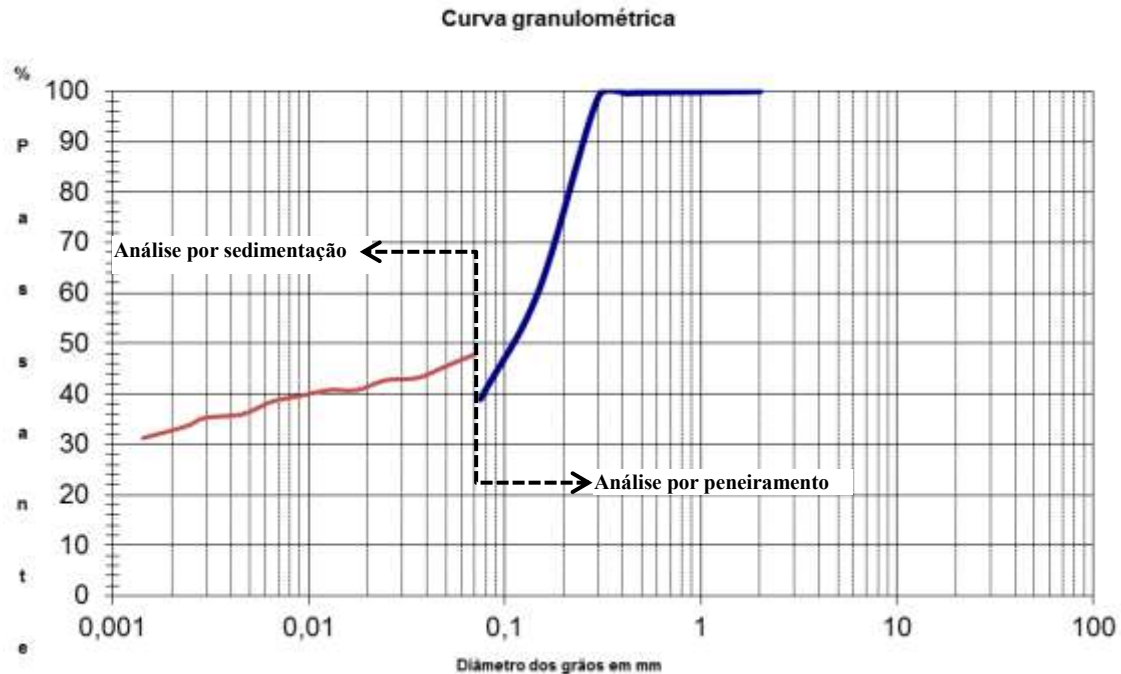


Figura 3.15. Resultados combinados das análises granulométricas por peneiramento e sedimentação (Fonte: Modificado de Briaud, 2013).

A partir das curvas granulométricas, é possível definir o percentual de cada fração granulométrica presente na amostra. Foi utilizada neste trabalho a escala granulométrica definida pela norma NBR 6502 (ABNT, 1995), representada graficamente na Fig. 3.16.

ARGILA	SILTE			AREIA			PEDREGULHO			BLOCOS	
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	Pedra-de-mão	Matacão
	2	6	20	60	200	600	2	6	20	60	200
	μm						mm				

Figura 3.16. Representação gráfica da escala granulométrica segundo a norma NBR 6502 (ABNT, 1995).

A classificação dos solos a partir das porcentagens das suas frações granulométricas pode ser realizada a partir dos chamados diagramas triangulares (ou trilineares) de classificação. Um dos

diagramas mais utilizados para tal é o diagrama de Shepard (1954), que separa os solos em 10 classes, segundo a sua granulometria. O diagrama de Shepard pode ser visualizado na Fig. 3.17.

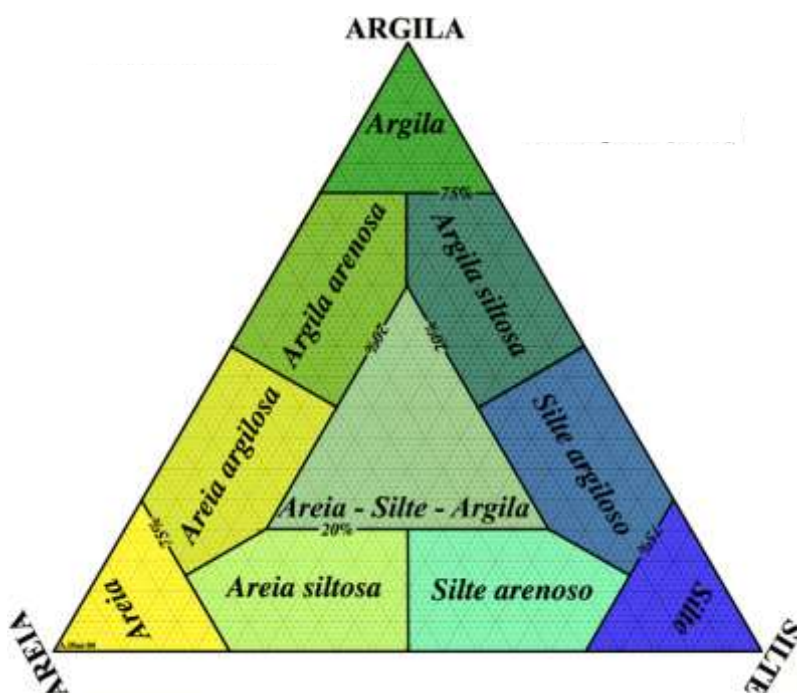


Figura 3.17. Diagrama de Shepard (1954) (Fonte: Dias, 2004).

Outra proposta de classificação é a de Pejrup (1988), que classifica os sedimentos (estuarinos) quanto à sua granulometria (A, B, C e D, dos sedimentos mais grossos aos sedimentos mais finos) e quanto à energia hidrodinâmica do ambiente de deposição (I, II, III e IV, da hidrodinâmica mais baixa à hidrodinâmica mais alta), gerando assim 16 classes de sedimentos (AI, AII, AIII, AIV, BI, BII, BIII, BIV, CI, CII, CIII, CIV, DI, DII, DIII e DIV). O diagrama de Pejrup pode ser visualizado na Fig. 3.18.

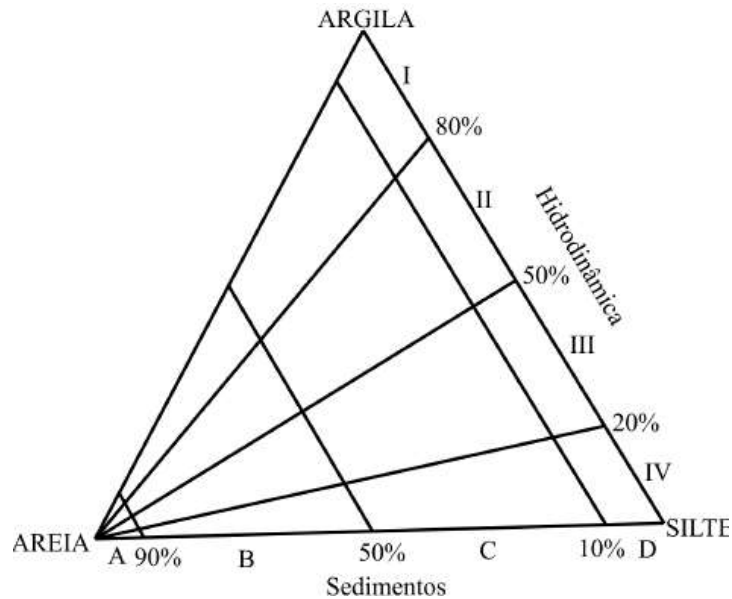


Figura 3.18. Diagrama de Pejrup (1988) (Fonte: Antiqueira e Calliari, 2005).

Na construção das curvas granulométricas, costuma-se adotar a escala logarítmica no eixo das abscissas, que representa o diâmetro equivalente dos grãos. Outra forma equivalente de representação é através da chamada escala ϕ , onde, ao invés do diâmetro equivalente d das partículas, adota-se a relação:

$$\phi = \frac{-\log_2 d(mm)}{1mm} \quad (3.4)$$

O principal objetivo desta transformação, proposta por Krumbein (1934) e McManus (1963), foi facilitar a aplicação dos métodos estatísticos convencionais à sedimentologia. A análise estatística de distribuições granulométricas, em geral, adota as fórmulas recomendadas por Folk e Ward (1957):

$$\text{Mediana: } \phi_{50} \quad (3.5)$$

$$\text{Média aritmética: } M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (3.6)$$

$$\text{Desvio padrão inclusivo: } \sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6} \quad (3.7)$$

$$\text{Assimetria: } S_{kl} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{85} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (3.8)$$

$$\text{Curtose: } K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (3.9)$$

Nas expressões anteriores, o número subscrito a ϕ representa a porcentagem de grãos mais finos do que aquele diâmetro correspondente a ϕ .

f. Peso específico real dos grãos (γ_s)

O ensaio de picnômetro é descrito pela ABNT NBR 6508 (1984). Para a execução do ensaio é necessário separar cerca de 250 g de solo, desta porção tomar, para um picnômetro de 500 ml, cerca de 50 g de amostra para solos argilosos e siltosos e 60 g para solos arenosos e com o restante da amostra determinar a umidade. Colocar a amostra em um becker com água destilada e deixar descansar por 12 horas. Passadas as 12 horas, colocar a amostra no dispersor por 15 minutos, após transferir a mistura para o picnômetro com o auxílio de um funil de vidro, submeter o picnômetro a bomba de vácuo para a remoção das bolhas de ar por 30 minutos (Fig. 3.19). Após completar o utensílio com água destilada de modo que fique cheio quando inserir a tampa, secar o picnômetro, pesar e medir a temperatura, com isso obtém-se o peso do conjunto picnômetro, água e solo. Depois encher o picnômetro com água destilada, pesar e medir temperatura, com isso tem o peso do picnômetro com água. Através desses dados e utilizando a formulação (Eq. 3.10), obtém-se o γ_s da amostra.



Figura 3.19. Picnômetro na bomba de vácuo - subamostra Pal1.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \cdot \gamma_w \quad (3.10)$$

Onde:

γ_s - Peso específico real dos grãos;

M_s - Massa de sólidos determinada no final do ensaio;

M_l - Massa de (água+ picnômetro+ sólidos) para uma temperatura T°C;

M_2 - Massa de (água+ picnômetro) obtida através da curva de calibração do picnômetro.

g. Limite de liquidez

O ensaio é baseado na ABNT NBR 6459 (1984), com a utilização do aparelho de Casagrande, e permite a obtenção do teor de umidade limite entre o estado líquido e plástico. O ensaio consiste em separar cerca de 100g de material passante na peneira 0,42 mm de uma dada amostra, colocá-la em uma tigela de porcelana, ir adicionando água destilada em pequenas quantidades e com o auxílio de uma espátula ir misturando o material até obter uma pasta homogênea. Após transferir parte da amostra para a concha do aparelho de Casagrande a fim de moldá-la, observando para não ficar espaços vazios entre a amostra e a concha (Fig. 3.20 a). Com o cinzel fazer uma ranhura no centro do material moldado na concha, colocando-a na base do aparelho. Girar a manivela na razão de 2 voltas por segundo, anotar o número de golpes, que deve ter o seu ponto mais seco em torno de 35 golpes e o mais úmido em torno de 15, da concha contra a base para que as bordas da parte inferior que ficaram divididas após a ranhura se juntem novamente por aproximadamente 13 mm de comprimento (Fig. 3.20 b). Transferir uma quantidade de cada lado da borda para cápsulas a fim de determinar a umidade, passar o material restante para a porcelana e adicionar água destilada e repetir o processo até dispor de no mínimo de 5 pontos. Com os dados é plotado um gráfico log nº de golpes versus teor de umidade, e ajustada uma reta com os pontos experimentais. A partir da reta de ajuste, o teor de umidade correspondente a 25 golpes equivale ao limite de liquidez da amostra, teor de umidade limite entre o estado líquido e plástico.

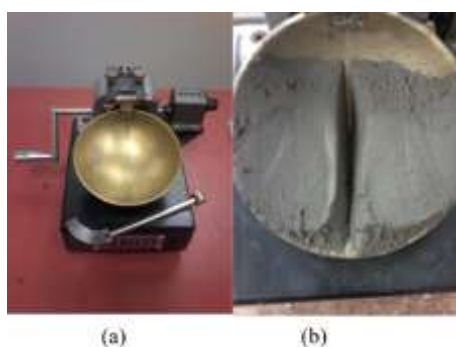


Figura 3.20. (a) Aparelho de Casagrande (b) Concha com a ranhura fechada - Subamostra Pal8.

h. Limite de plasticidade

Este ensaio é realizado de acordo com a ABNT NBR 7180 (1984), e tem por objetivo obter o teor de umidade limite entre o estado plástico e semi-sólido de uma dada amostra. Consiste em separar cerca de 100 g de amostra passante na peneira 0,42 mm, dispor a amostra em uma tigela de porcelana, adicionar água destilada e misturar até ficar homogênea, com consistência plástica. Tomar uma pequena parte da amostra e sobre uma placa de vidro fosco começar a moldar um cilindro de aproximadamente 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, conforme o gabarito (Fig. 3.21). Quando a amostra atingir as dimensões descritas verificar se o fracionamento iniciou, caso isso não ocorra, ou tenha ocorrido antes, deve-se colocar a amostra novamente na porcelana e secar a amostra ou adicionar água, respectivamente. Se a amostra se fragmentar ao atingir as dimensões citadas, separar o cilindro em duas partes e colocar em cápsulas a fim de determinar o teor de umidade, repetir o procedimento por quatro vezes, tomando o teor de umidade médio como o limite de plasticidade.



Figura 3.21. Ensaio de limite de plasticidade - subamostra Novo2#Lobos.

De acordo com Pinto (2006), através dos resultados dos Limites de liquidez - LL e Limites de plasticidade - LP é possível determinar o Índice de plasticidade do solo (IP) através da Eq. 3.11. O índice de plasticidade é o quantitativo de plasticidade dos solos (Fig. 3.22 e Tab. 3.4).

$$IP = LL - LP \quad (3.11)$$

Onde:

IP - Índice de plasticidade;

LL - Limite de liquidez;

LP - Limite de plasticidade.

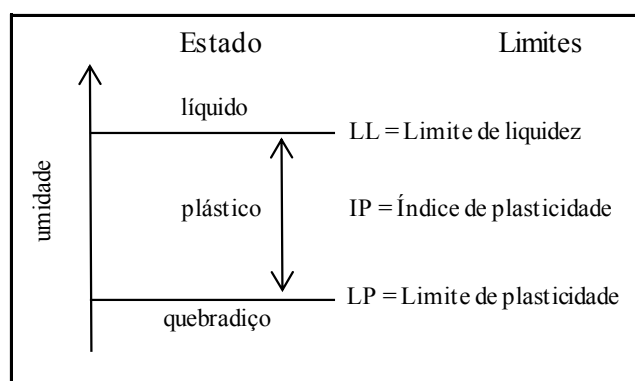


Figura 3.22. Estados limites do solo (Fonte: Pinto, 2006).

Tabela 3.4. Quantificação da plasticidade dos solos (Fonte: Burmister, 1949 apud Das, 2010).

Índice de plasticidade - IP	Plasticidade
0	Não-plástico
1-5	Ligeiramente plástico
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Com os dados de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) é possível determinar o índice de atividade coloidal dos solos (*Ia*), através da Eq. 3.12.

$$Ia = \frac{IP}{\% < 2\mu m} \quad (3.12)$$

Onde:

Ia - Índice de atividade coloidal;

IP - Índice de plasticidade;

$\% < 2 \mu m$ - percentual da fração argilosa.

Conforme o índice de atividade coloidal, a atividade do solo é descrita conforme a Tab. 3.5.

Tabela 3.5. índice de atividade coloidal dos solos. (Fonte: Pinto, 2006).

Índice de atividade coloidal - Ia	Atividade
$Ia \leq 0,75$	Solo inativo (indicativo de argila 1:1)
$0,75 < Ia \leq 1,25$	Solo de atividade normal
$Ia > 1,25$	Solo ativo (indicativo de argila 2:1)

3.3.3. Descrição dos procedimentos de laboratório para caracterização complementar

a. Descrição do ensaio de difratometria de raios X (DRX)

O ensaio de difratometria de raios X (DRX) consiste em tomar uma pequena quantidade de sedimento em pó, após prévia separação das frações areia, silte e argila de acordo com Embrapa (2011), e acondicionar o sedimento em uma reentrância que fica posicionada no centro da câmara de DRX (Fig. 3.23), onde a amostra vai receber os feixes de raios X. Algumas ondas geradas pela fonte de raios X incidem sob a superfície cristalina e outras penetram em diferentes camadas da rede cristalina. As ondas de raios X que penetram nas camadas somadas a inúmeras difrações, interagem com as ondas difratadas anteriormente e causam interferências, previstas pela Lei de Bragg (Resende et al., 2005).

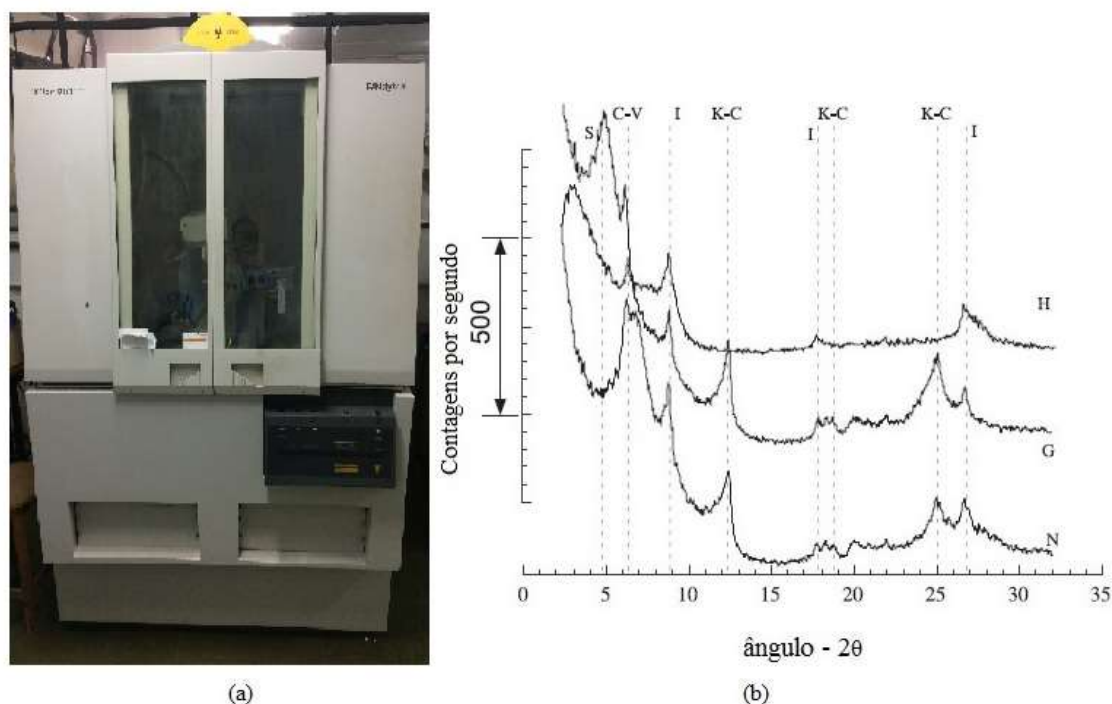


Figura 3.23. (a) Difratorômetro de raios X (Fonte: Universidade Federal de Viçosa - UFV) (b) Gráfico gerado com dados obtidos através de ensaio de DRX para uma amostra localizada na região de Singapura a 14 metros de profundidade (Fonte: Modificado de Tanaka, 2001).

Como resposta o ensaio fornece alguns parâmetros, tais como:

d_p - distância entre os planos do cristal

λ - comprimento de onda

θ - ângulo de incidência e difração de um feixe de raios X

De posse desses dados é possível gerar gráficos de difratometria (2θ versus intensidade dos picos difratados). Os picos de intensidade são gerados para um dado θ que possui distância entre os planos do cristal que satisfaça a Lei de Bragg. Como cada mineral tem um ângulo de difração particular, a identificação mineralógica ocorre através da interpretação dos máximos de difração (Whittig e Allardice, 1986).

Durante a realização do ensaio de difratometria de raios X em sedimentos, é aconselhável realizar o ensaio para com a fração argilosa submetida a diferentes tipos de tratamento, conforme descrito por Whittig e Allardice (1986), a fim de identificar os argilominerais 2:1 presentes no solo.

Para possibilitar a identificação dos argilominerais a fração argila deve ser segmentada em duas partes, onde uma porção será saturada com potássio ($KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$) e a outra com magnésio

(MgCl_2 1 mol L^{-1}). A parcela saturada com MgCl_2 ainda receberá um outro tratamento, a solvatação com glicerol. Já a porção saturada com KCl, será submetida ao ensaio em temperatura ambiente e aquecida a 350°C e 550°C.

De acordo com Whittig e Allardice (1986), a saturação com magnésio (Mg) e com potássio (K) são regularmente aplicadas devido ao fato do magnésio possibilitar a adsorção de água por filosilicatos expansíveis e o potássio por limitar a adsorção de água pela vermiculita. Após a saturação com magnésio a amostra ainda é solvatada com glicerol, com intuito de diferenciar os filosilicatos expansíveis identificados durante o tratamento com Mg. Enquanto que a amostra saturada com potássio é aquecida à 350°C e 550°C, a fim de colapsar a vermiculita e destruir os minerais de caulim.

Através dos tratamentos e da comparação com o difratograma gerado para o estado natural, é possível observar o deslocamento ou o cancelamento das reflexões (picos no difratograma). E, de posse dos máximos presentes nos picos difratados e com o auxílio de tabelas existentes na literatura, que relacionam a distância entre os planos do cristal, argilominerais e influência dos tratamentos, é possível identificar os minerais presentes na amostra.

A Tabela 3.6 confronta a intensidade do pico gerado com a presença de dado mineral, após a realização dos tratamentos.

Tabela 3.6 - Distância máxima inter-reticular de minerais de solo saturados com Mg^{2+} e K^+ ou solvatados por tratamento com glicerol. (Fonte: modificado de Pansu e Gautheyrou, 2006).

Distância máxima inter-reticular de minerais do solo saturados com Mg^{2+} e ou solvatados por tratamento com glicerol.					
Mineral	dp (Å)	Plano hkl	Mineral	dp (Å)	Plano hkl
(a) Amostras saturadas com Mg^{2+}			(b) Amostras saturadas com Mg^{2+} e solvatadas com glicerol		
Clorita	13,6 - 14,7	001	Montmorilonita	17,7	001
Vermiculita	14,0 - 15,0	002	Vermiculita	14,4	002
Montmorilonita	14,0 - 15,0	001	Clorita	13,6 - 14,7	001
Mica (ilita)	9,9 - 10,1	001	Haloisita	10,1 - 10,7	001
Talco	9,2 - 9,4	002	Montmorilonita (2ª ordem)	9,5	001
Haloisita	10,1	001	Clorita - Vermiculita (2ª ordem)	7,15	002
Metahaloisita	7,2 - 7,5	001	Minerais com espaços inter-camadas similar a "a".		
Caulinita	7,1 - 7,2	001	(c) Amostras saturadas com e secas ao ar		
Lepidocrocita	6,27	020	Clorita	13,6 - 14,7	001
Boemita	6,11	020	Montmorilonita	11,0 - 13,0	001
Gibbsita	4,85	002	Vermiculita	10,0 - 11,0	002
Silicatos	4,4 - 4,6	110	Metahaloisita	7,2 - 7,5	001
Gipsita (gesso)	4,27	121	Clorita (2ª ordem)	7,15	002
Goetita	4,18	110	Minerais com espaços inter-camadas similar a "a".		
Cristobalita	4,04	101	(d) Amostras saturadas com e aquecidas a 550°C por 2 - 3 horas		
Ilmenita	3,73	102	Clorita	13,6 - 14,7	001
Quartzo	3,34	101	Montmorilonita	9,9 - 10,1	001
Feldspato	3,1 - 3,25		Vermiculita	9,9 - 10,1	002
Calcita	3,03	100	Mica (ilita)	9,9 - 10,1	001
Hematita	2,69	104	Clorita (2ª ordem)	7,15	002
Magnetita	2,53	311			
Silicatos trioctaédricos	1,54	060			
Silicatos dioctaédricos	1,49				

Já a Tab. 3.7 expõe a influência que cada tratamento exerce sobre o mineral.

Tabela 3.7 - Influência dos tratamentos sobre a distância inter-reticular entre as principais camadas de argilas. (Fonte: modificado de Pansu e Gautheyrou, 2006).

Influência dos tratamentos sobre a distância inter-reticular entre as principais camadas de argilas: amostras secas ao ar, saturadas com Mg^{2+} (M = metahalosita ou haloisita, $2H_2O$ (7 Å), H: haloisita hidratada, $4 H_2O$ (10 Å). Classes integradas de clorita-vermiculita e clorita-esmectita também são separadas por estes tratamentos.									
Grupo	1:1 (Te - Oc)		2:1 (Te - Oc - Te)				2:1:1 (Te - Oc - Te - Oc)		
d_p (Å)	7		7 - 10	9,4	10	10 - 12	14 - 15		
Estabilidade (Inter-camada)	-		H_2O	-	Cátion	Fibroso	Cátion de água		Octaédrico
Família	Caulinita	Serpentina	M Haloisita	Talco Pirofilita	Micas (Ilita)	Sepiolita Paligorsquita	Esmectita	Vermiculitas	Cloritas
Cargas X	0			0	1 - 2		0,2 - 0,6	0,6 - 0,9	Variável
Solvatação com glicerol	nada 7,1 Å	nada 7,3 Å	nada M 7,2 Å H 10,8 Å	nada	nada 10,1 Å	nada S 12,1 Å P 10,48 Å	expansão 17,7 Å	nada 14 - 15 Å	nada, exceto dilatação de cloritas.
Saturação com	nada 7,1 Å	nada 7,3 Å	nada M 7,2 Å H 10 Å	nada	nada 10,1 Å	nada S 12,1 Å P 10,48 Å	contração 12,4 Å 12,8 Å	contração 10 Å (com 14Å)	nada 14 Å
Aquecimento 550°C	colapsa	nada 7,3 Å	M colapsa H colapsa	nada	nada 10Å	10,4 - 8,2 Å 9,2 Å 4,7 Å	contração 10 Å	contração	nada 14 Å
Intercalação de formamida	nada 7,1 Å < 4 h	nada 7,3 Å	expansão M 10,48 Å						
DMSO	expansão 11,18 Å	nada 7,3Å	M expansão						
Teste de Green-Kelly, 250°C glicerol							Montmorilonita 9,5 Å beidelite 17,7Å		

A distância entre os planos do cristal (d_p) pode ser expressa na unidade de angström (Å), nanômetro (nm) ou metro (m), sendo que a relação entre as unidades é expressa na Eq. 3.13:

$$1nm = 10^{-9}m = 10\text{\AA} \quad (3.13)$$

Os ensaios, análise e interpretação dos difratogramas para algumas amostras do presente trabalho foram realizados na Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Laboratório de Mineralogia. O aparelho utilizado era da marca PAN Alytical, modelo X'Pert Pro, com radiação de cobalto ($Co \alpha$), com faixas de varredura entre 4 a $50^\circ 2\theta$ com intervalo de $0,0167^\circ 2\theta$ por passo a cada segundo operado com a tensão de aceleração de 40 kV e corrente de 40 mA. Segundo a interpretação oferecida pelo Laboratório de Mineralogia a quantificação dos minerais presentes na amostra de solo só seria possível com operações adicionais e refinamento dos dados adquiridos pelo método de Rietveld.

b. Descrição do ensaio de teor de matéria orgânica

Os procedimentos para a realização dos ensaios seguiram a rotina de laboratório proposta por Fontes (2016). Toma-se uma porção de amostra de modo que contenha cerca de 10 g de argila total. A amostra é colocada em tubo de centrifuga de 50 mL. Após são adicionados 20 mL de água, a amostra é dispersada, em seguida são adicionados 20 mL de NaOH (hidróxido de sódio) à 0,1 N (normalidade). A amostra é agitada manualmente e deixada em repouso por 1 hora. Passado o tempo, submete-se a alta rotação por 30 minutos e a centrifugação por 5 minutos, e então remove-se o líquido sobrenadante. Posteriormente adiciona-se 25 mL de NaClO (hipoclorito de sódio) à 10% (peso/volume) com pH 9,5/vidro, mistura-se e submete-se ao banho maria (75-80°C) por 15 minutos. Após é realizada nova centrifugação e descarta-se o sobrenadante. Este procedimento é repetido por três vezes. Em seguida, são adicionados 25 ml NaCl a 0,5 mol/L e dispersa-se, centrifuga-se e descarta-se o sobrenadante, repetindo-se novamente o processo. A seguir, centrifuga-se novamente e despeja o sobrenadante em um recipiente tipo becker. Se a solução estiver limpa, descarta-se, caso não, coloca-se novamente no tubo e centrifuga-se. Essa técnica é capaz de remover a matéria orgânica do solo, e assim determinar o seu teor.

Os ensaios para obtenção do teor de matéria orgânica, análise e interpretação para algumas amostras do presente trabalho foram realizados na Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Laboratório de Mineralogia.

4. RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA – ÁREA MARINHA ENTRE RIO GRANDE E TORRES E ÁREA LAGUNAR ENTRE RIO GRANDE E SÃO LOURENÇO DO SUL

4.1. Granulometria

a. Área marinha entre Rio Grande e Torres

A distribuição granulométrica dos sedimentos, composta pelos resultados dos ensaios de peneiramento e sedimentação, permitiram definir as frações percentuais de argila ($d \leq 0,002$ mm), silte ($0,002 < d \leq 0,06$ mm) e areia ($0,06 < d \leq 2,0$ mm) de uma determinada amostra (sendo d o diâmetro do grão). A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para o conjunto de amostras em estudo e a figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas das amostras em questão.

Tabela 4.1. Composição granulométrica.

Amostra	Profundidade (metros)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Novo 1 Mampitubas	15	9	6	85
Novo 2# Lobos	21	30	28	42
Novo 3#	21	11	2	87
Novo 5	23	18	11	71
Pal 1	13	50	23	27
Pal 2	14	47	30	23
Pal 3	18	38	18	44
Pal 4	17	10	10	80
Pal 5	18	x	x	x
Pal 6	18	10	4	86
Pal 7	24	29	13	58
Pal 8	26	30	12	58
Pal 9	23	24	12	64
Pal 10	24	23	7	70
TRC 1	23	17	8	75
TRC 2	33	8	2	90
TRC 3	44	24	13	63
TRC 4	59	40	17	43
TRC 5	91	50	35	15
TRN 1	22	24	12	64
TRN 2	31,8	23	11	66
TRN 3	46	27	23	50
TRN 4	60	38	20	42
TRN 5	91	PA	PA	PA
TRP 33	71	41	27	32
TRP3II	42	36	18	46
TRS 1	21	16	9	75

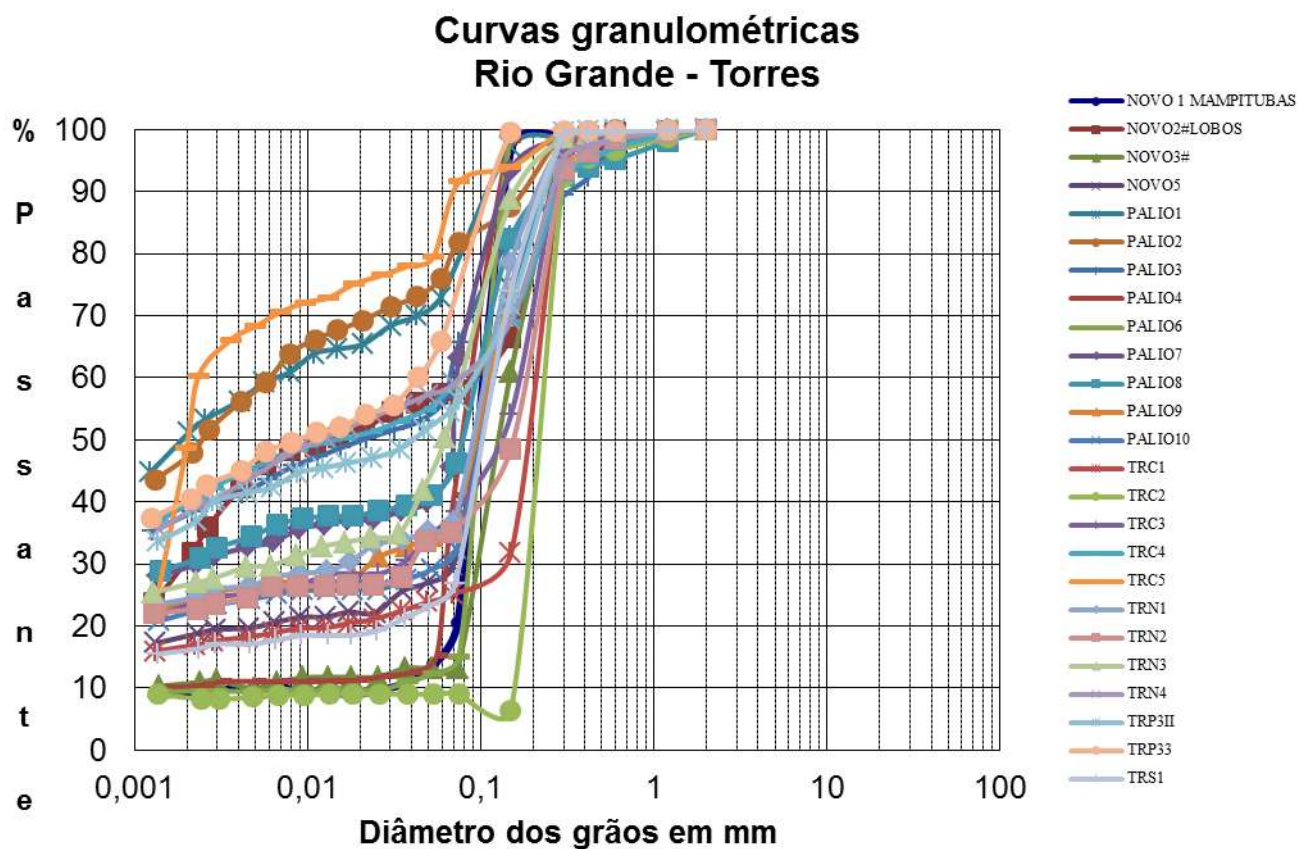


Figura 4.1. Curvas granulométricas amostras de Rio Grande - Torres.

Não foi possível a realização do ensaio em duas amostras: TRN5, por falta de material (PA) e Pal5, por apresentar somente conchas na composição do sedimento que estava presente no amostrador. Nas Figuras 4.2 e 4.3 encontram-se as curvas granulométricas das amostras Pal1 (localizada mais ao sul) e Pal10 (localizada mais ao norte), respectivamente. As curvas granulométricas das demais amostras encontram-se no Apêndice A.

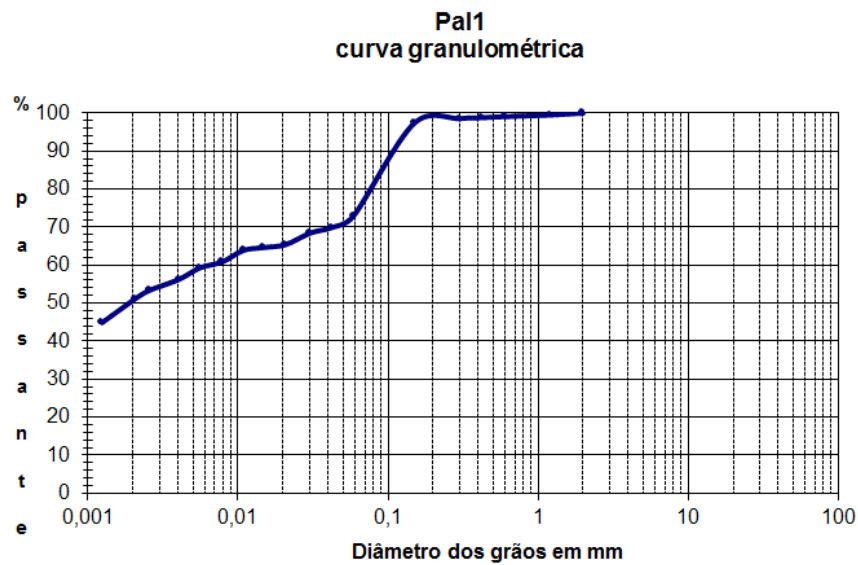


Figura 4.2. Curva granulométrica amostra Pal1.

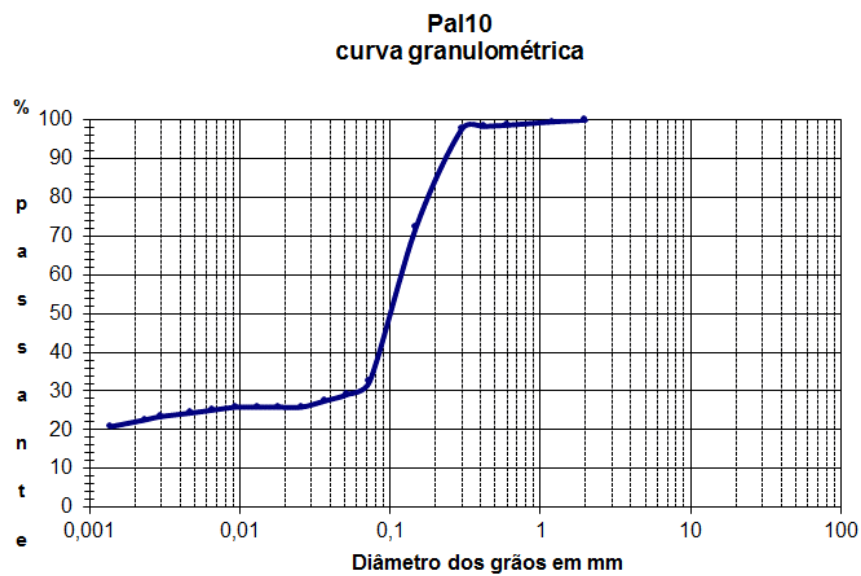


Figura 4.3. Curva granulométrica amostra Pal10.

Na Figura 4.4 encontra-se a classificação das amostras segundo o diagrama de Shepard (1954).

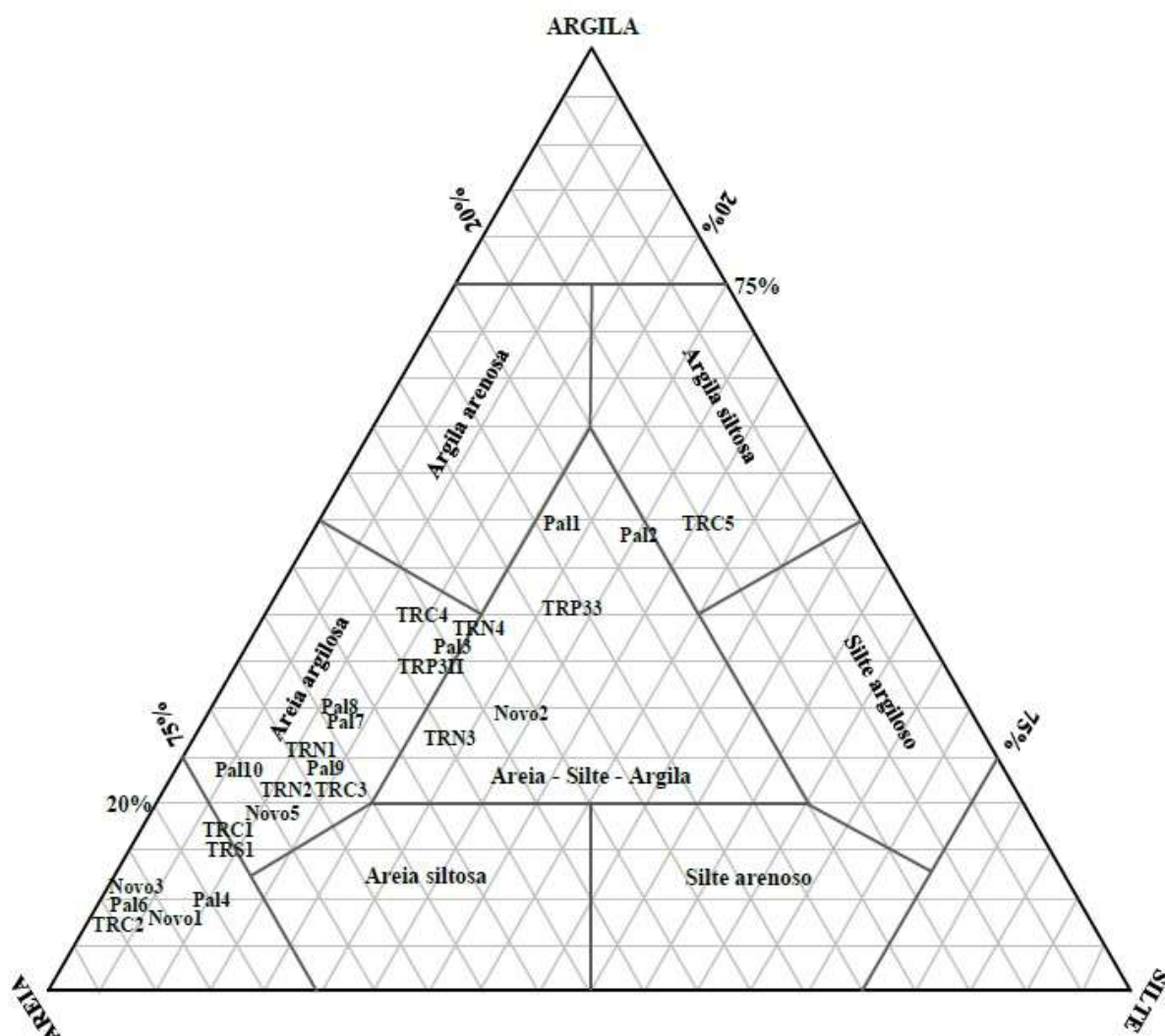


Figura 4.4. Classificação de Shepard (1954).

De uma forma geral, observa-se boa concordância entre a classificação obtida no presente trabalho e aquela exposta no mapa faciológico de Paixão (2012) (Fig. 4.5). A maioria das amostras situa-se nas classes Areia argilosa. Algumas amostras foram caracterizadas no campo correspondente a misturas de areia, silte e argila. A amostra TRC5, coletada na maior cota batimétrica, apresenta maior quantidade de argila que as demais. As amostras Pal1 e Pal2 situam-se em um bolsão de sedimento fino, também detectada por Paixão (2012), que pode estar associado à proximidade do estuário da Lagoa dos Patos. Algumas poucas amostras são francamente arenosas, como os casos das amostras Pal4 e Pal6.

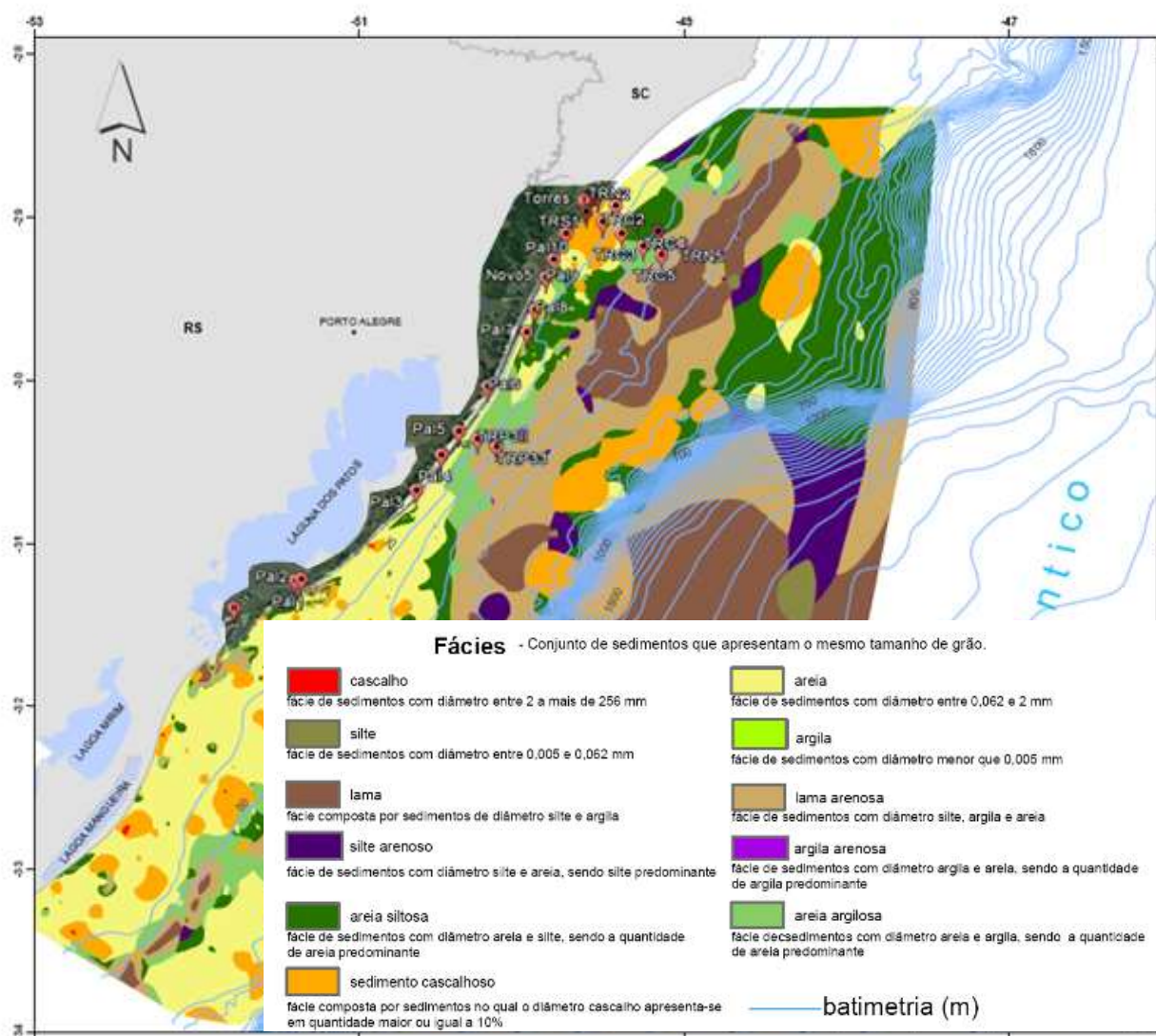


Figura 4.5. Pontos amostrais do presente trabalho sobre o mapa faciológico de Paixão (2012).

Na Figura 4.6 encontra-se a classificação das amostras segundo o diagrama de Pejrup (1988). Observa-se que, por este sistema de classificação, as amostras ficaram alocadas em apenas duas classes, BII (granulometria mais grossa) e CII (granulometria mais fina). Quanto à energia hidrodinâmica do ambiente de deposição, o sistema classificatório indica que todas as amostras teriam sido depositadas no sistema II, de moderada energia. Entretanto, cabe ressaltar que, em princípio, o sistema de Pejrup só se aplica a ambientes estuarinos.

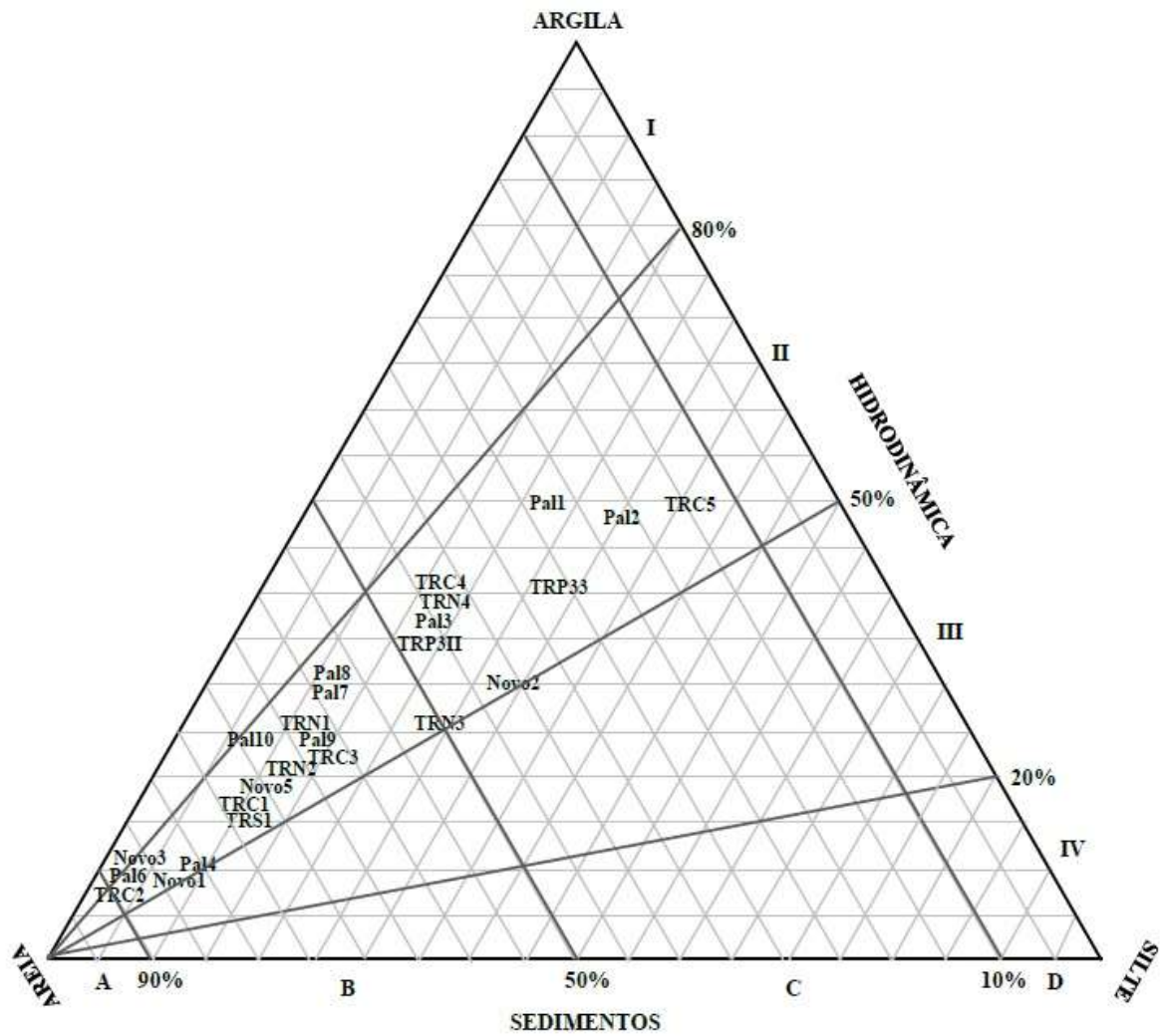


Figura 4.6. Classificação de Pejrup (1988).

Na Tabela 4.2 é apresentada uma comparação entre os sistemas granulométricos de classificação segundo Paixão (2012), Shepard (1954) e Pejrup (1988).

Tabela 4.2. Comparação entre os sistemas granulométricos de classificação.

Amostra	Fácies	Shepard	Pejrup
Novo 1 Mampitubas	Sedimento cascalho	Areia	BII
Novo 2# Lobos	Sedimento cascalho	Areia - Silte - Argila	CII
Novo 3#	Sedimento cascalho	Areia	BII
Novo 5	Areia	Areia argilosa	BII
Pal 1	Areia	Areia - Silte - Argila	CII
Pal 2	Areia	Areia - Silte - Argila	CII
Pal 3	Areia	Areia argilosa	CII
Pal 4	Areia	Areia	BII
Pal 5	Areia	-	-
Pal 6	Areia	Areia	BII
Pal 7	Areia siltosa	Areia argilosa	BII
Pal 8	Areia siltosa	Areia argilosa	BII
Pal 9	Areia siltosa	Areia argilosa	BII
Pal 10	Areia	Areia argilosa	BII
TRC 1	Sedimento cascalho	Areia	BII
TRC 2	Sedimento cascalho	Areia	BII
TRC 3	Areia argilosa	Areia argilosa	BII
TRC 4	Areia argilosa	Areia argilosa	CII
TRC 5	Lama arenosa	Argila siltosa	CII
TRN 1	Areia	Areia argilosa	BII
TRN 2	Areia	Areia argilosa	BII
TRN 3	Areia siltosa	Areia - Silte - Argila	BII
TRN 4	Lama arenosa	Areia argilosa	CII
TRN 5	Lama	-	-
TRP 33	Lama arenosa	Areia - Silte - Argila	CII
TRP3II	Lama arenosa	Areia argilosa	CII
TRS 1	Sedimento cascalho	Areia	BII

Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 encontram-se os resultados das análises estatísticas, considerando o método do densímetro, realizadas segundo o formulário de Folk e Ward (1957). Observam-se claramente as três classes principais de sedimentos encontrados neste estudo, circulos nos gráficos: Areias (conjunto mais à esquerda), Areias argilosas (conjunto central), e misturas de areia, argila e silte (conjunto mais à direita), com alguns poucos pontos anômalos. Os solos mais grossos (menores valores de M_z , na escala ϕ) tendem a ter menor desvio padrão (σ_I), maior assimetria (S_{kl}) e maior curtose (K_G) do que os solos mais finos.

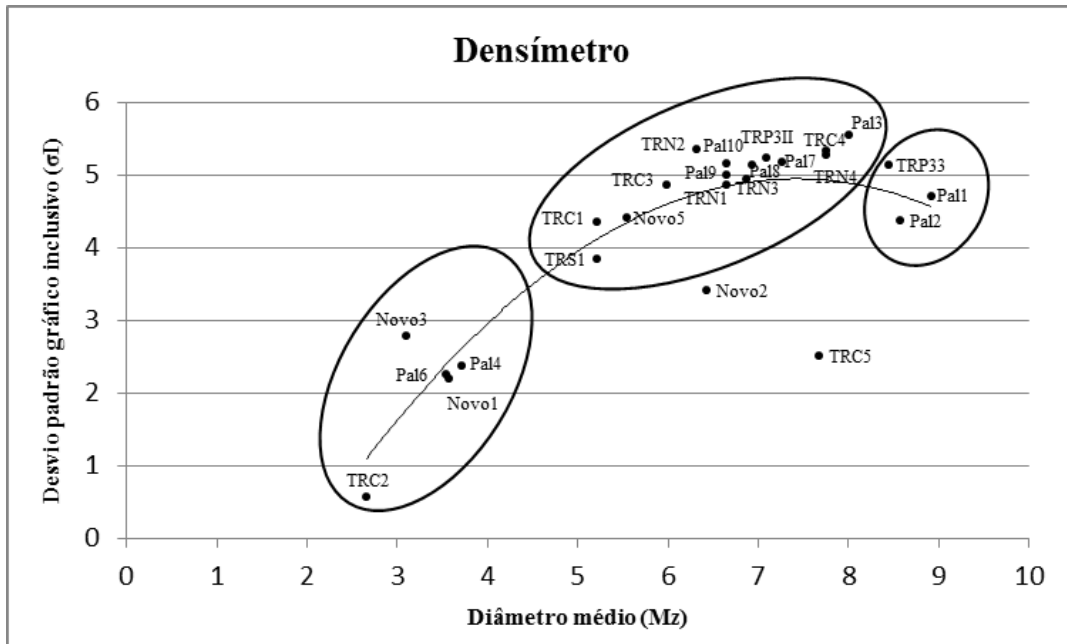


Figura 4.7. Diâmetro médio (M_z) versus desvio padrão (σI).

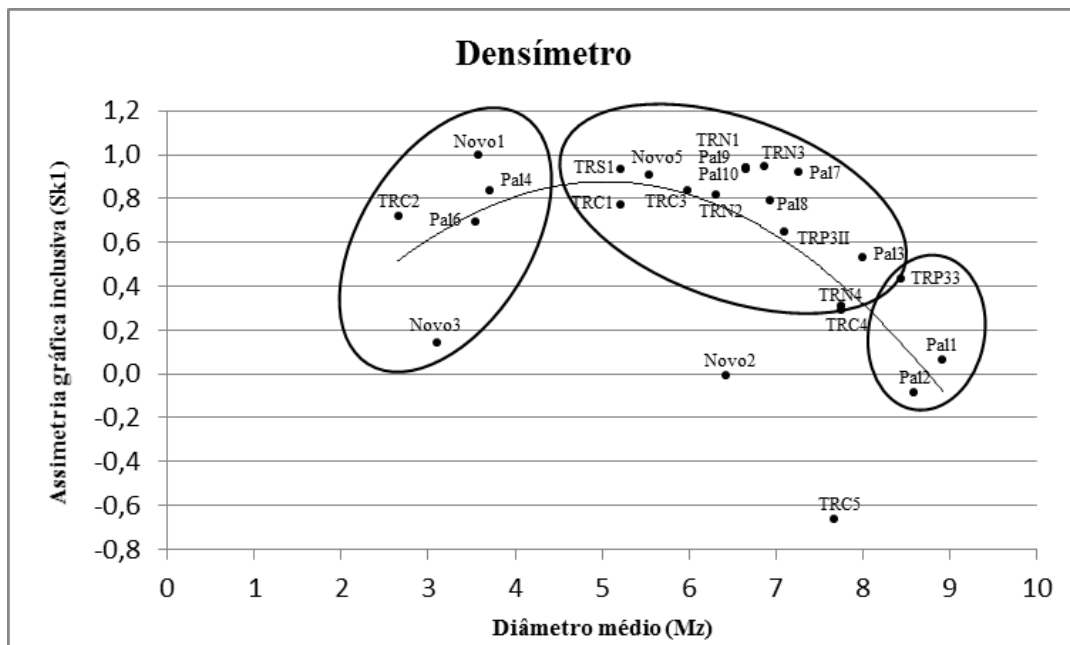


Figura 4.8. Diâmetro médio (M_z) versus assimetria (SkI).

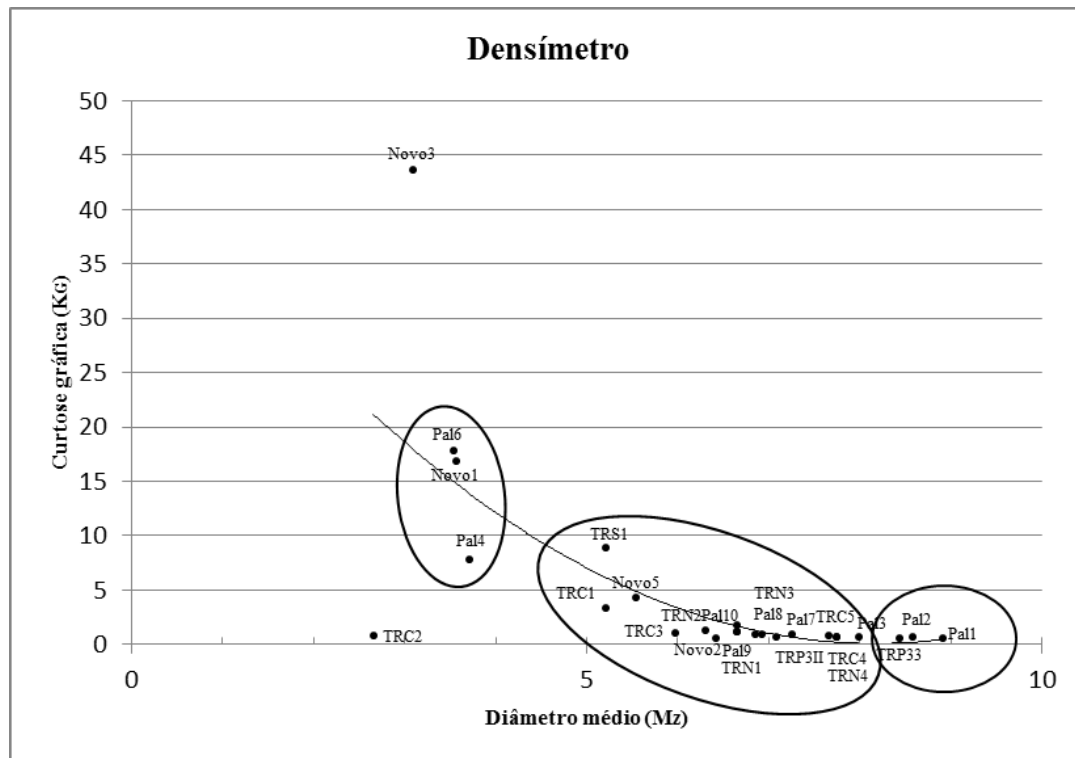


Figura 4.9. Diâmetro médio (M_z) versus curtose (K_G).

b. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul

Na Tabela 4.3 encontram-se os resultados obtidos para a granulometria do conjunto de amostras em estudo e a figura 4.10 apresenta as curvas granulométricas das amostras em questão.

Tabela 4.3. Composição granulométrica.

Amostra	Profundidade (metros)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
#2A	7,70	58	20	22
#2B	14,40	63	23	14
#6A	2,50	32	16	52
#6B	5,40	43	23	34
#6C	4,00	26	9	65
#7A	2,70	38	22	40
#7B	5,80	45	19	36
#7C	2,80	20	6	74
#9	5,00	42	18	40
#10A	3,90	20	4	76
#10B	8,50	26	10	64
#10C	3,40	20	6	74
#11	5,70	37	23	40
#12A	5,70	57	30	13
#12B	6,00	54	34	12
#12C	6,10	48	38	14
Bacia Porto Novo #3	10,20	62	26	12
Bacia Porto Novo #4	9,50	58	24	18
Bacia Porto Novo T#05	8,80	55	19	26

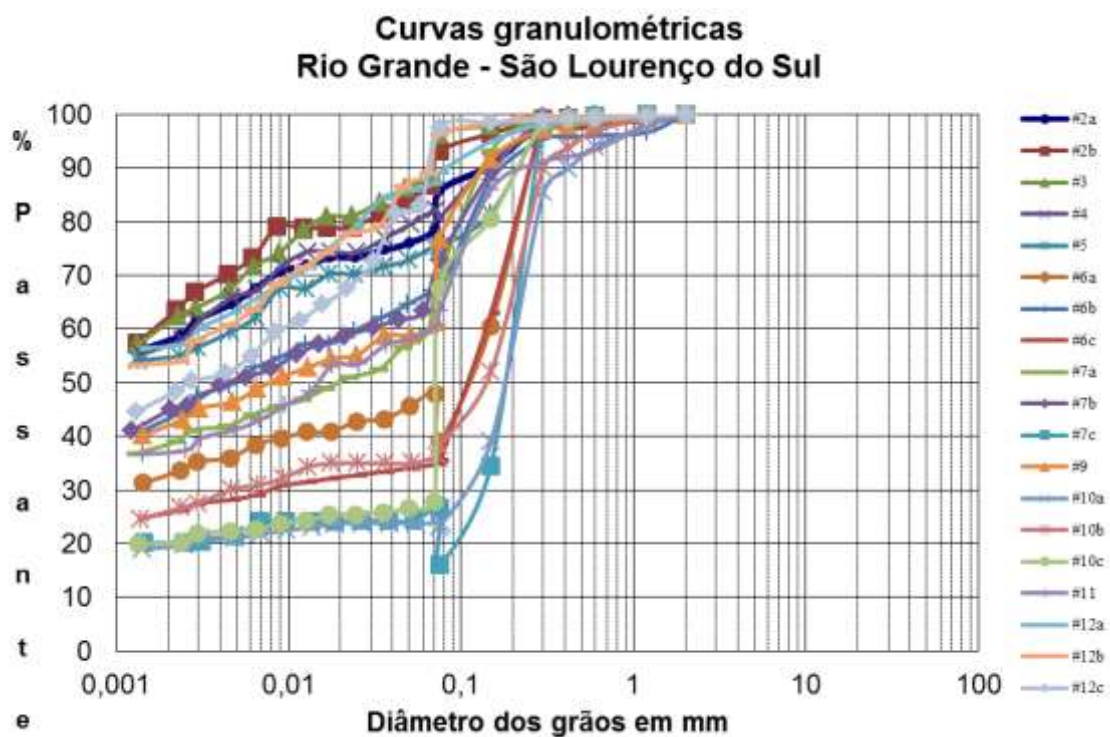


Figura 4.10. Curvas granulométricas amostras de Rio Grande - São Lourenço do Sul.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 encontram-se as curvas granulométricas das amostras #2A (localizada mais ao sul) e #10A (localizada mais ao norte), respectivamente. As curvas granulométricas das demais amostras encontram-se no Apêndice B.

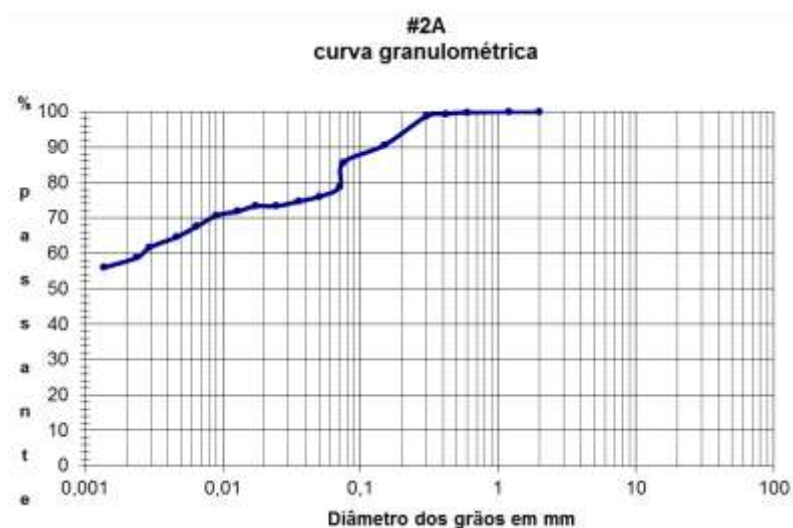


Figura 4.11. Curva granulométrica da amostra #2A.

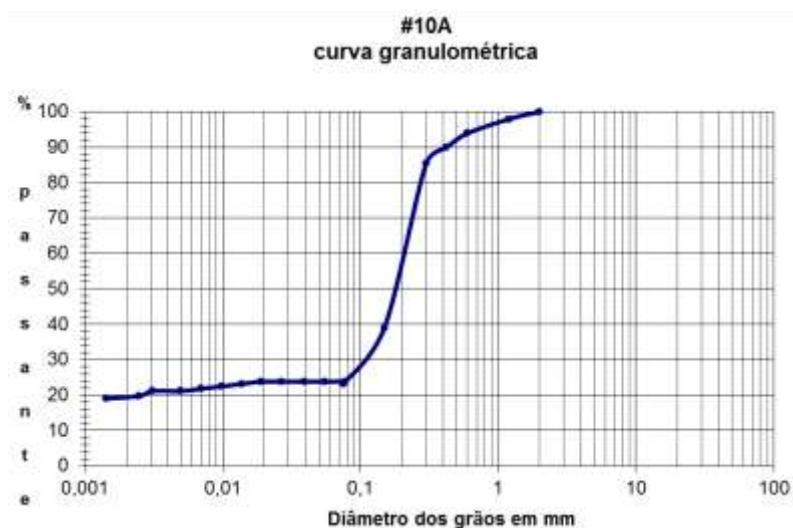


Figura 4.12. Curva granulométrica da amostra #10A.

Na Figura 4.13 encontra-se a classificação das amostras segundo o diagrama de Shepard (1954).

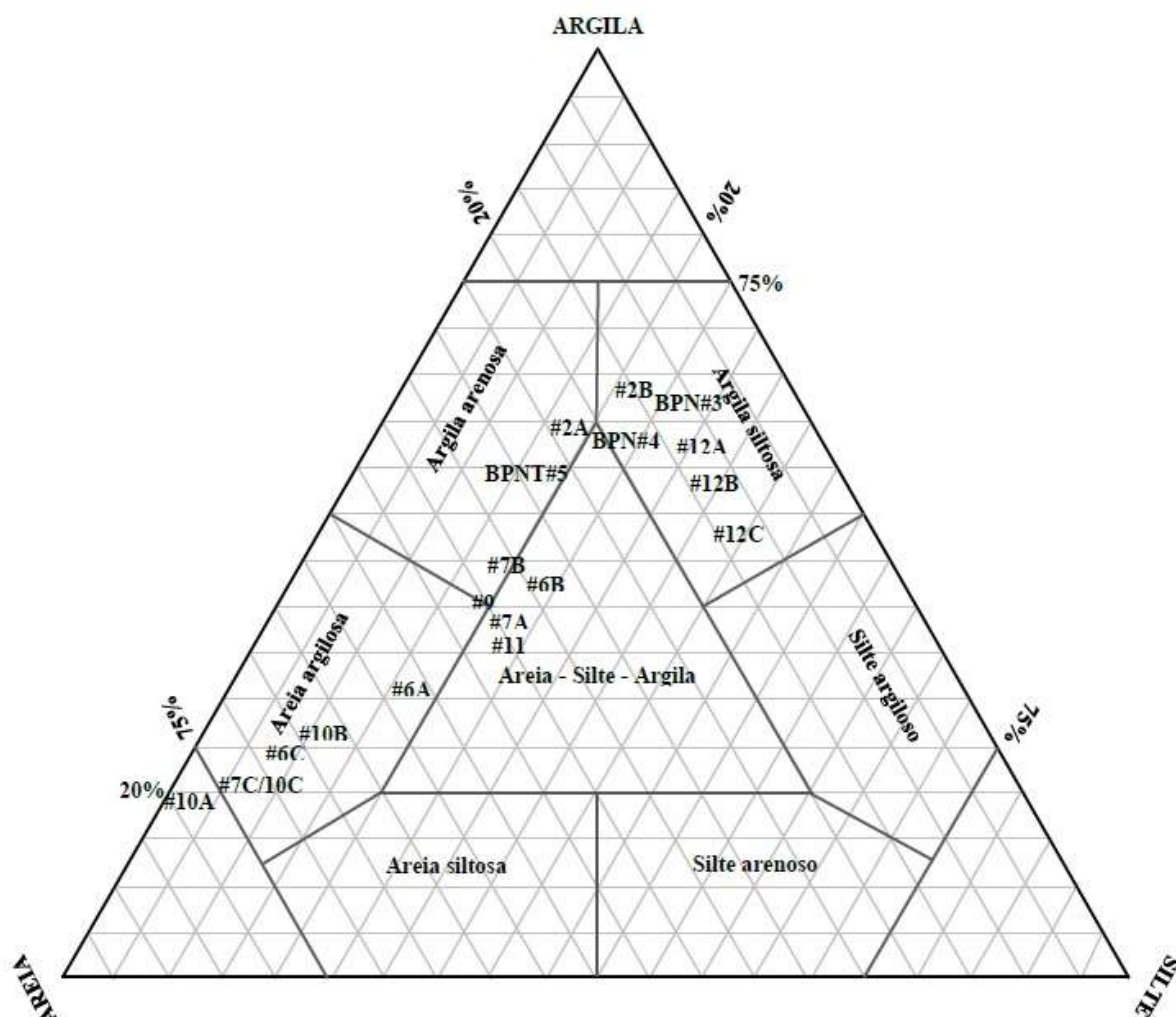


Figura 4.13. Classificação de Shepard (1954).

As amostras coletadas no canal de acesso ao porto (#2A, #2B, Bacia Porto Novo #3, #4 e T#05) tendem a apresentar uma maior quantidade de sedimentos finos (classe Argila siltosa), assim como as amostras coletadas em lâminas d'água mais espessas na Lagoa (#12A, #12B e #12C), uma tendência já observada por Calliari et al. (1980). As amostras mais próximas às margens da Lagoa (#10A, #10B e #10C) tendem a apresentar textura mais grossa (Areias argilosas), devido ao nível energético mais elevado, que provoca a retirada e a impossibilidade de deposição dos sedimentos finos (Antiqueira e Calliari, 2005).

Observa-se uma concordância razoável entre os resultados compilados por Marroig (2015) e os do presente estudo, conforme mostrado na Fig. 4.14. As discrepâncias ficam por conta dos pontos #12A, #12B e #12C, que mostraram textura mais fina nos ensaios do presente trabalho.

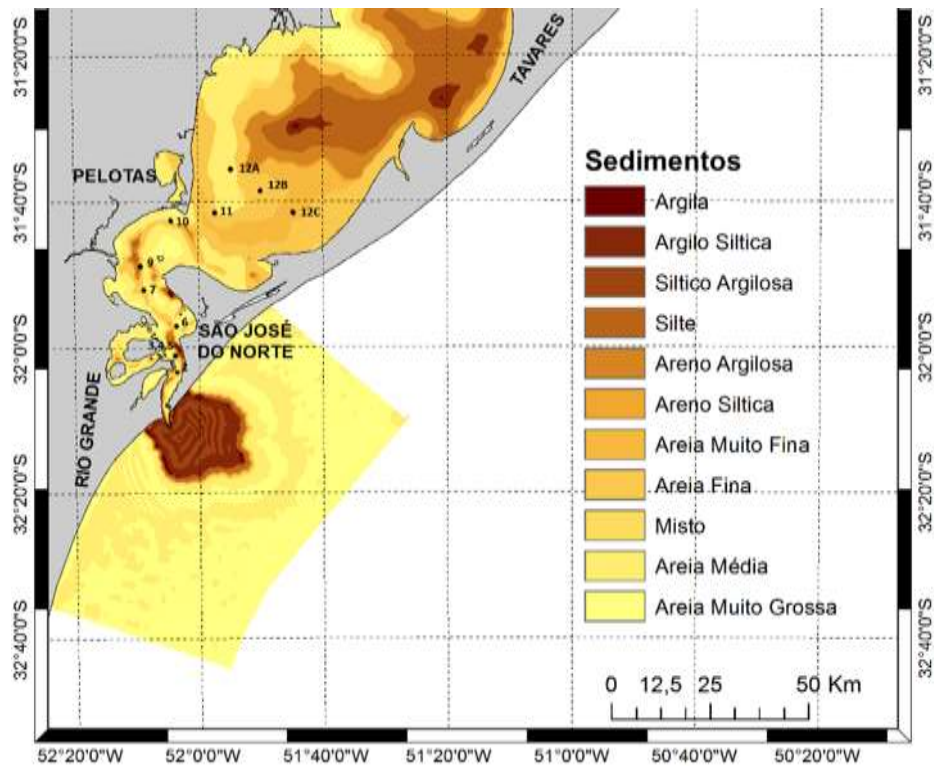


Figura 4.14. Pontos amostrais do presente trabalho sobre o mapa faciológico de Marroig (2015).

Na Figura 4.15 encontra-se a classificação das amostras segundo o diagrama de Pejrup (1988).

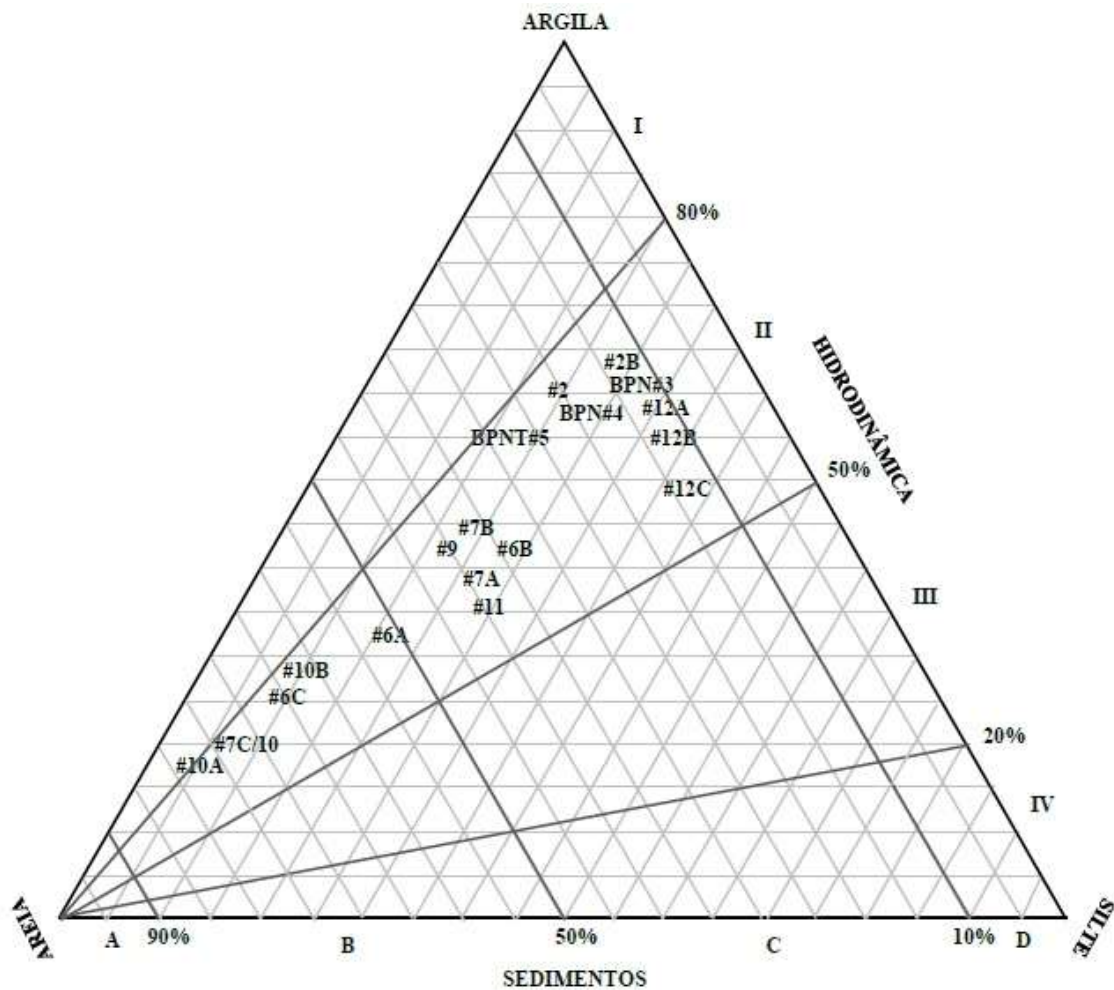


Figura 4.15. Classificação de Pejrup (1988).

Na Tabela 4.4 apresenta-se uma comparação entre os sistemas granulométricos de classificação segundo Marroig (2015), Shepard (1954) e Pejrup (1988).

Tabela 4.4. Comparação entre os sistemas granulométricos de classificação.

Amostra	Fácies	Shepard	Pejrup
#2A	Misto	Argila arenosa	CII
#2B	Misto	Argila siltosa	CII
#6A	Misto	Areia argilosa	BII
#6B	Misto	Areia - silte - argila	CII
#6C	Misto	Areia argilosa	BII
#7A	Misto	Areia - silte - argila	CII
#7B	Misto	Argila arenosa	CII
#7C	Misto	Areia argilosa	BII
#9	Misto	Areia argilosa	CII
#10A	Areia média	Areia	BII
#10B	Areia média	Areia argilosa	BII
#10C	Areia média	Areia argilosa	BII
#11	Areia fina	Areia - silte - argila	CII
#12A	Areia média	Argila siltosa	CII
#12B	Areia fina	Argila siltosa	CII
#12C	Areia muito fina	Argila siltosa	CII
Bacia Porto Novo #3	Misto	Argila siltosa	CII
Bacia Porto Novo #4	Misto	Argila siltosa	CII
Bacia Porto Novo T#05	Misto	Argila arenosa	CII

Nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 encontram-se os resultados das análises estatísticas, considerando o método do densímetro, realizadas segundo o formulário de Folk e Ward (1957). Observam-se as três classes principais de sedimentos encontrados neste estudo, circulos nos gráficos: Areias argilosas (conjunto mais à esquerda), misturas de areia, argila e silte (conjunto central) e Argilas siltosas (conjunto mais à direita). Verifica-se ainda, que uma grande dispersão nos resultados de desvio padrão inclusivo (σ_I), com leve tendência de decréscimo σ_I à medida que aumenta a presença de finos nos sedimentos.

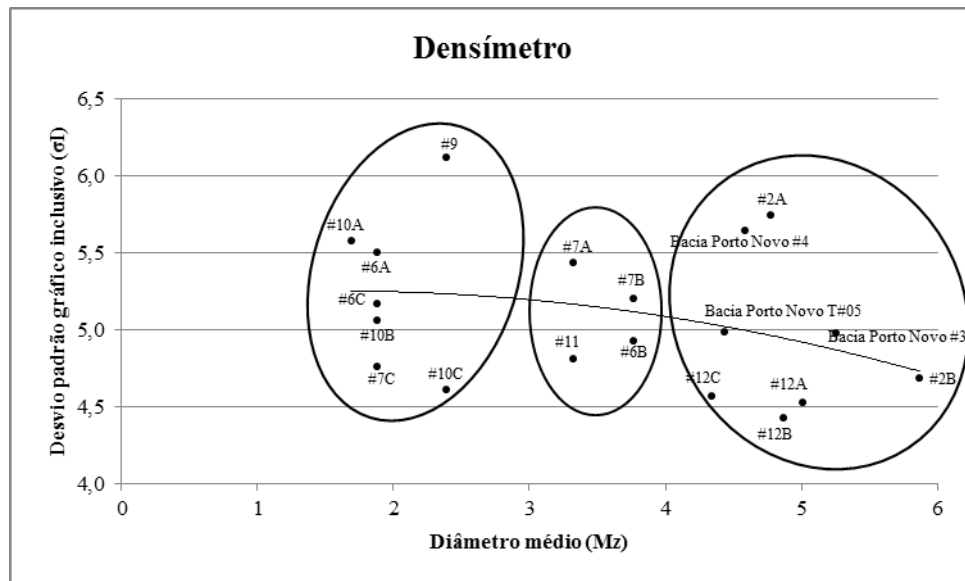


Figura 4.16. Diâmetro médio (M_z) versus desvio padrão (σ_I).

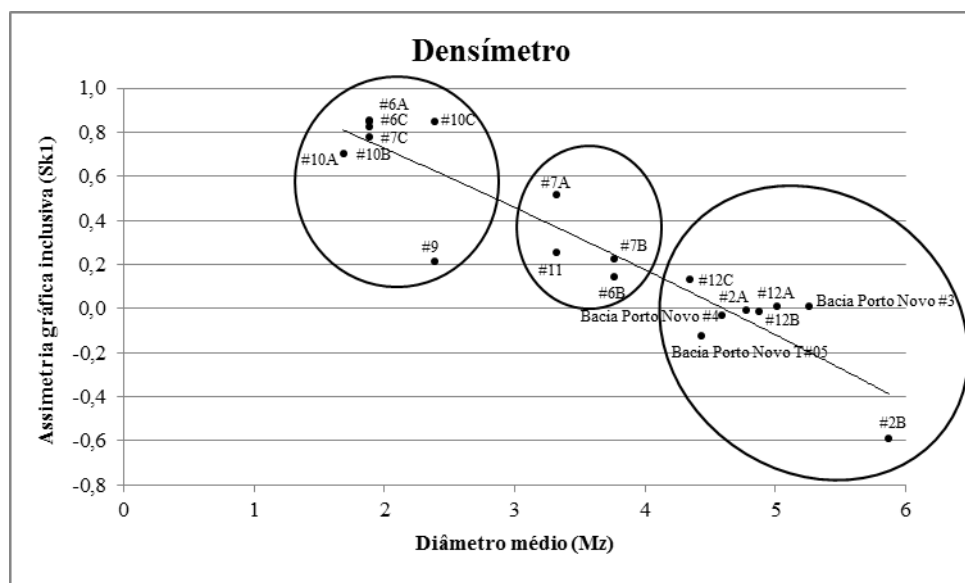


Figura 4.17. Diâmetro médio (M_z) versus assimetria (Sk_I).

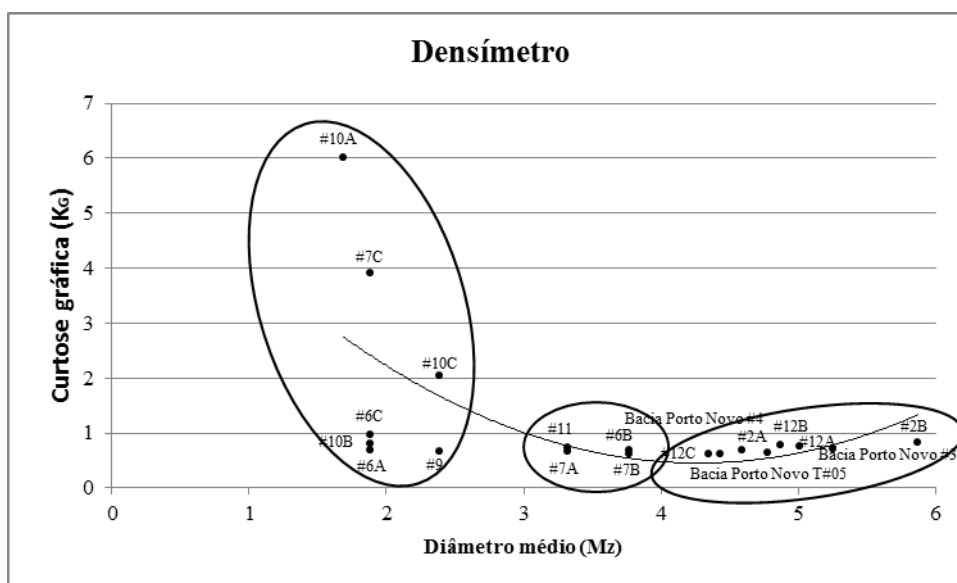


Figura 4.18. Diâmetro médio (M_z) versus curtose (K_G).

4.2. Matéria orgânica

a. Área marinha entre Rio Grande e Torres

A Tabela 4.5 exibe os valores de matéria orgânica apontados após a realização do ensaio. De acordo com Mendonça e Matos (2005), para encontrar o teor de matéria orgânica de um solo deve-se multiplicar o teor de carbono orgânico pelo fator de “Van Bemmelen” que é de aproximadamente 1,724, pois a matéria orgânica presente em uma amostra contém cerca de 58% de carbono orgânico, de acordo com a Eq. 4.1 mostrada por Mendonça e Matos (2005).

$$M.O. = 1,724.C.O. \quad (4.1)$$

Onde:

M.O. - Matéria orgânica;

C.O. - Carbono orgânico.

Tabela 4.5. Teor de matéria orgânica.

Amostra	M.O. dag/kg
TRN1	1,00
TRN2	1,00
TRN4	1,62
Pal2	2,99
Pal3	1,62
Pal7	0,75
TRC4	1,74

Ainda em conformidade com Mendonça e Matos (2005), quanto mais arenoso o solo, menores os teores de carbono orgânico, e por consequência o de matéria orgânica, corroborando assim com os resultados do ensaio, conforme observado na Tab. 4.6.

Tabela 4.6. Teor de carbono orgânico e porcentagem de areia.

Amostra	C.O. dag/kg	Areia (%)
TRN1	0,58	64
TRN2	0,58	66
TRN4	0,94	42
Pal2	1,73	23
Pal3	0,94	44
Pal7	0,44	58
TRC4	1,01	43

b. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul

A Tabela 4.7 exhibe os valores de matéria orgânica, de carbono orgânico e de porcentagem de areia presente nas amostras #2A, #6C e #12C.

Tabela 4.7. Teor de matéria orgânica.

Amostra	MO dag/kg	C.O dag/kg	Areia (%)
2a	2,36	1,37	22
6c	1,00	0,58	65
12c	2,61	1,51	14

4.3. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e teor de umidade

a. Área marinha entre Rio Grande e Torres

A Tabela 4.8 destaca os valores obtidos para o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade ($IP=LL-LP$) e teor de umidade abaixo do ponto do ensaio de palheta (h). Durante a execução dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg, algumas amostras apresentaram caráter não plástico (NP), não tendo sido possível a realização dos ensaios. Em outras não foram submetidas aos ensaios (PA), pois a quantidade de sedimento era insuficiente para a realização dos mesmos, de acordo com as exigências nas normas ABNT NBR 6459 (1984) e ABNT NBR 7180 (1984).

Tabela 4.8. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e teor de umidade.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	w (%) abaixo do vane	I_L
Novo 1 Mampitubas	NP	NP	x	22,24	-
Novo 2# Lobos	39	16	23	129,30	4,93
Novo 3#	NP	NP	x	20,32	-
Novo 5	21	7	14	34,23	1,95
Pal 1	78	34	44	186,22	3,46
Pal 2	76	42	34	165,06	3,62
Pal 3	52	27	25	72,02	1,80
Pal 4	PA	PA	x	25,18	-
Pal 5	NP	NP	x	x	-
Pal 6	NP	NP	x	20,41	-
Pal 7	30	21	9	55,86	3,87
Pal 8	33	21	12	62,06	3,42
Pal 9	25	19	6	34,43	2,57
Pal 10	22	16	6	35,45	3,24
TRC 1	NP	NP	x	35,00	-
TRC 2	PA	PA	x	9,90	-
TRC 3	28	20	8	48,33	3,54
TRC 4	53	22	31	84,57	2,02
TRC 5	PA	PA	x	184,59	-
TRN 1	24	16	8	119,92	12,99
TRN 2	21	16	5	41,88	5,18
TRN 3	26	16	10	53,78	3,78
TRN 4	51	30	21	68,19	1,82
TRN 5	PA	PA	x	167,69	-
TRP 33	56	28	28	105,83	2,78
TRP3II	47	26	21	88,06	2,96
TRS 1	NP	NP	x	33,24	-

Na Figura 4.19 é mostrada a tradicional carta de plasticidade de Casagrande, relacionando os valores de limite de liquidez e índice de plasticidade das amostras em estudo.

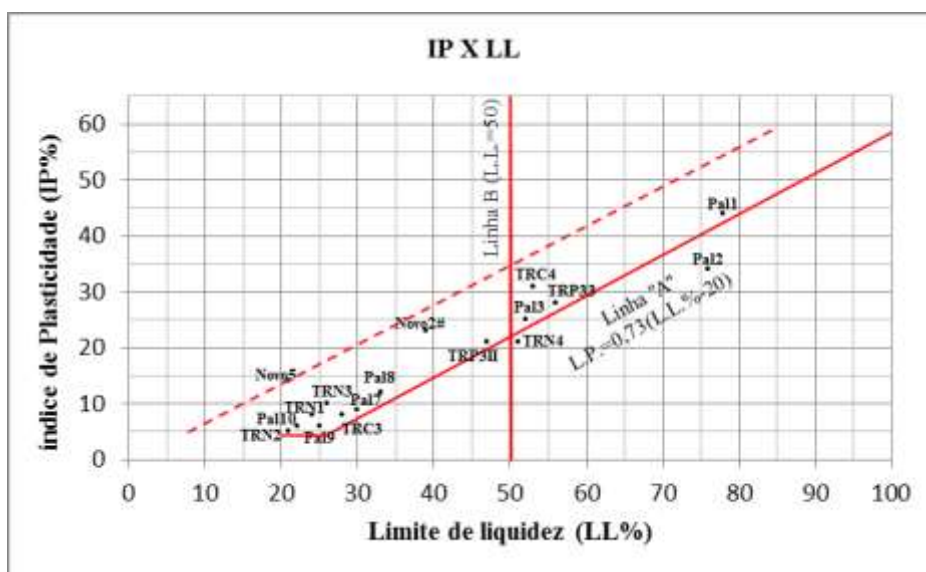


Figura 4.19. Plasticidade das amostras apresentadas na Carta de plasticidade de Casagrande.

Através da carta de plasticidade, é possível observar que grande parte das amostras estão localizadas acima da linha A, o que indica presença importante de argila. Porém, a amostra Pal2, apesar de apresentar alta porcentagem de argila, ficou abaixo da linha A. Esta plasticidade reduzida pode ser explicada pela presença marcante de matéria orgânica nesta amostra, conforme exposto na Tab. 4.3.

A maioria dos pontos, com marcante presença de areia, se situou à esquerda da linha B, o que evidencia solos de baixa compressibilidade e de baixa a média plasticidade. No entanto, alguns sedimentos ficaram localizados à direita da linha B (os sedimentos com maior percentual de argila), sendo, portanto caracterizados como argilas de alta plasticidade.

Na Figura 4.20 mostra-se a relação entre o índice de plasticidade (IP) e a porcentagem de argila de cada amostra.

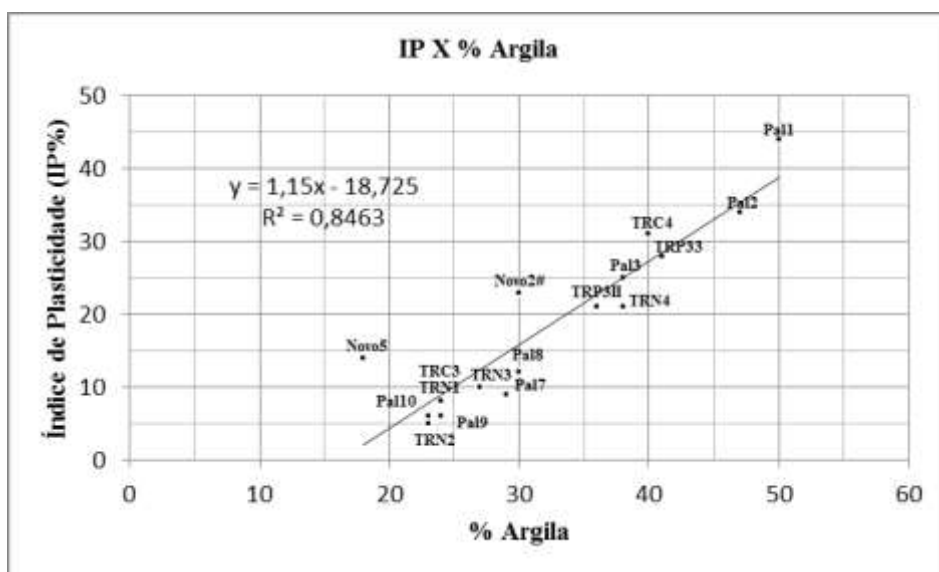


Figura 4.20. Índice de plasticidade versus % de argila.

Pode-se observar que quanto mais elevado o percentual da fração argilosa do sedimento, maior será o índice de plasticidade. Os pontos com porcentagem de argila maior do que 35% correspondem à classe de misturas de areia, silte e argila, estando na parte superior do triângulo central de Shepard.

Explorando a linha de tendência gerada na Fig. 4.20 constata-se a impossibilidade de determinação do índice de plasticidade em amostras onde o percentual de argila foi inferior a 18%. No conjunto de amostras em estudo, este percentual de argila marcou a fronteira entre os sedimentos plásticos e não-plásticos.

b. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul

A Tabela 4.9 destaca os valores obtidos para o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e teor de umidade abaixo do ponto do ensaio de palheta (h). Durante a execução dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg, somente uma amostra (#7C) não foi submetida ao ensaio, pois a quantidade de sedimento era insuficiente para a realização dos ensaios (PA).

Tabela 4.9. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e teor de umidade.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	w (%) abaixo do vane	I_L
#2A	65	45	20	170,73	6,29
#2B	71	34	37	258,17	6,06
#6A	35	19	16	51,72	2,05
#6B	48	27	21	110,54	3,98
#6C	29	19	10	49,41	3,04
#7A	52	24	28	134,47	3,95
#7B	53	24	29	312,65	9,95
#7C	PA	PA	x	30,02	-
#9	40	22	18	74,24	2,90
#10A	22	12	10	41,72	2,97
#10B	35	16	19	100,22	4,43
#10C	32	16	16	64,56	3,04
#11	39	25	14	58,81	2,42
#12A	57	30	27	254,65	8,32
#12B	66	24	42	132,00	2,57
#12C	67	29	38	171,57	3,75
Bacia Porto Novo #3	73	44	29	212,23	5,80
Bacia Porto Novo #4	62	39	23	216,43	7,71
Bacia Porto Novo T#05	51	31	20	202,16	8,56

Na Figura 4.21 é mostrada a tradicional carta de plasticidade de Casagrande, relacionando os valores de limite de liquidez e índice de plasticidade das amostras em estudo.

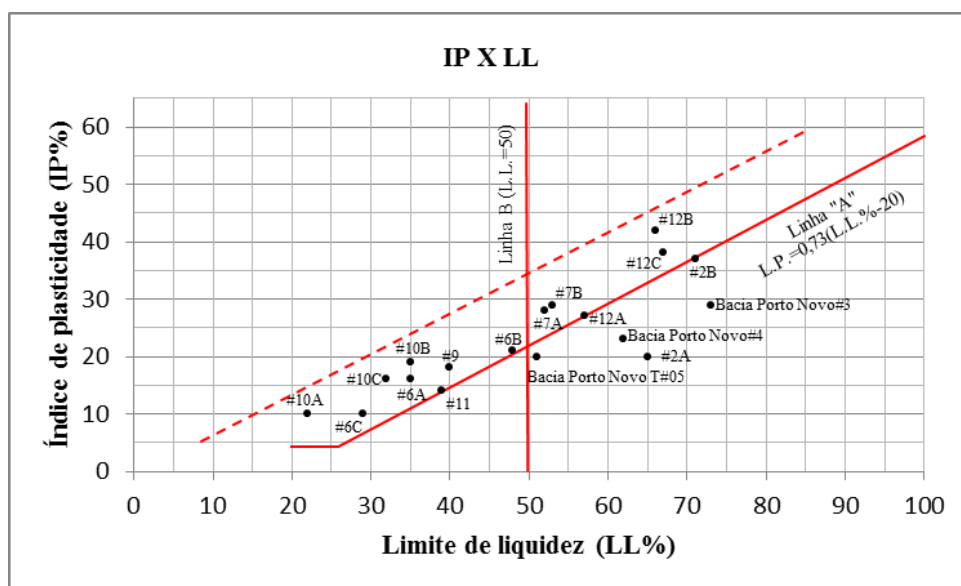


Figura 4.21. Carta de plasticidade de Casagrande.

Na Figura 4.22 mostra-se a relação entre o índice de plasticidade (IP) e a porcentagem de argila de cada amostra.

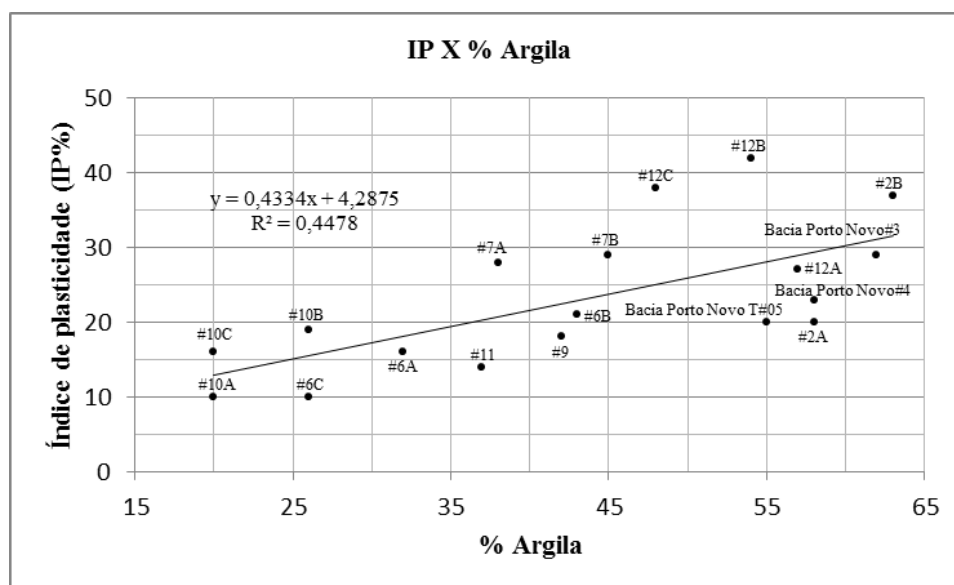


Figura 4.22. Índice de plasticidade versus % de argila.

Apesar da grande dispersão observada neste gráfico, a tendência é de crescimento do índice de plasticidade com o aumento do percentual da fração argilosa do sedimento.

4.4. Índices físicos

a. Área marinha entre Rio Grande e Torres

A Tabela 4.10 mostra os resultados obtidos em relação ao peso específico real dos grãos (γ_s), peso específico natural (γ_{nat}), peso específico natural seco (γ_d), índice de vazios (e), porosidade (n) e percentual de argila (% argila).

O índice de vazios (e), a porosidade (n) e o peso específico natural seco (γ_d) foram calculados a partir dos demais índices medidos (teor de umidade, γ_s e γ_{nat}). Vale ressaltar que a medida do peso específico natural (γ_{nat}), a partir da moldagem de um anel, pode ter sido prejudicada em alguns casos, devido ou à consistência muito mole da amostra, ou à presença muito forte de conchas.

Tabela 4.10. Índices físicos.

Amostra	γ_s (kN/m³)	γ_{nat} (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	e	n (%)	Argila (%)
Novo 1 Mampitubas	26,45	x	x	x	x	9
Novo 2# Lobos	26,68	13,04	5,69	3,69	78,68	30
Novo 3#	26,65	19,09	15,87	0,68	40,47	11
Novo 5	26,72	x	x	x	x	18
Pal 1	25,39	11,03	3,85	5,59	84,82	50
Pal 2	26,75	x	x	x	x	47
Pal 3	25,94	15,51	9,02	1,88	65,24	38
Pal 4	26,73	15,29	12,21	1,19	54,30	10
Pal 5	x	x	x	x	x	x
Pal 6	26,45	x	x	x	x	10
Pal 7	27,40	14,37	9,22	1,97	66,35	29
Pal 8	26,53	15,83	9,77	1,72	63,18	30
Pal 9	26,36	18,58	13,82	0,91	47,57	24
Pal 10	26,79	x	x	x	x	23
TRC 1	27,28	17,35	12,85	1,12	52,89	17
TRC 2	26,46	x	x	x	x	8
TRC 3	26,70	x	x	x	x	24
TRC 4	26,39	16,07	8,71	2,03	67,01	40
TRC 5	26,69	12,43	4,37	5,11	83,64	50
TRN 1	26,00	16,93	7,70	2,38	70,39	24
TRN 2	26,50	17,87	12,60	1,10	52,47	23
TRN 3	26,45	x	x	x	x	27
TRN 4	26,49	15,89	9,45	1,80	64,34	38
TRN 5	26,53	x	x	x	x	PA
TRP 33	26,23	14,35	6,97	2,76	73,42	41
TRP3II	26,70	15,20	8,08	2,30	69,73	36
TRS 1	26,14	18,84	14,14	0,85	45,91	16

Os resultados dos índices físicos são coerentes, uma vez que as amostras com maior presença de argila apresentaram menor peso específico natural e maior índice de vazios.

b. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul

A Tabela 4.11 apresenta os resultados obtidos para peso específico real dos grãos (γ_s), peso específico natural (γ_{nat}), peso específico natural seco (γ_d), índice de vazios (e), porosidade (n) e percentual de argila (% argila).

Tabela 4.11. Índices físicos.

Amostra	γ_s (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	n (%)	Argila (%)
#2A	24,62	12,79	16,98	0,93	80,82	58
#2B	25,18	11,47	18,79	1,20	87,29	63
#6A	26,53	17,05	22,29	0,56	57,65	32
#6B	25,77	14,27	20,29	0,81	73,70	43
#6C	26,85	17,16	22,56	0,56	57,22	26
#7A	26,45	13,85	21,33	0,91	77,67	38
#7B	28,75	10,71	23,19	1,68	90,97	45
#7C	25,84	x	x	x	x	20
#9	24,96	15,84	20,46	0,58	63,58	42
#10A	26,07	x	x	x	x	20
#10B	26,28	15,14	22,65	0,74	71,23	26
#10C	25,73	16,47	22,18	0,56	61,10	20
#11	24,09	x	x	x	x	37
#12A	23,80	11,80	18,31	1,02	86,02	57
#12B	25,05	13,22	20,20	0,90	77,26	54
#12C	25,49	x	x	x	x	48
Bacia Porto Novo #3	25,18	12,53	17,49	1,01	84,06	62
Bacia Porto Novo #4	23,91	12,22	17,20	0,96	83,85	58
Bacia Porto Novo T#05	25,00	12,28	19,09	1,04	83,75	55

Para os índices físicos das amostras da Lagoa dos Patos, observa-se uma variabilidade bastante alta, porém a tendência geral é de redução de peso específico natural e aumento do índice de vazios com a maior presença de argila.

4.5. Resistência ao cisalhamento não drenada (S_u)

a. Área marinha entre Rio Grande e Torres

Na Tabela 4.12 são mostrados os resultados do ensaio de palheta de laboratório, em termos da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) de cada amostra.

Tabela 4.12. Resistência ao cisalhamento não drenada (S_u).

Amostra	S_u (kPa)
Novo 1 Mampitubas	x
Novo 2# Lobos	1,65
Novo 3#	12,66
Novo 5	6,48
Pal 1	2,48
Pal 2	2,89
Pal 3	8,27
Pal 4	x
Pal 5	x
Pal 6	x
Pal 7	6,76
Pal 8	14,48
Pal 9	4,69
Pal 10	10,75
TRC 1	8,27
TRC 2	x
TRC 3	4,69
TRC 4	2,76
TRC 5	1,52
TRN 1	4,55
TRN 2	8,54
TRN 3	4,69
TRN 4	15,03
TRN 5	x
TRP 33	3,03
TRP3II	2,89
TRS 1	8,55

Não foi possível a realização do ensaio em seis amostras, pela inexistência de altura de sedimento suficiente no tubo PVC para permitir a penetração da palheta até o ponto de ensaio (6,3 cm abaixo da superfície). Algumas amostras com muita presença de areia também não foram submetidas ao ensaio de palheta.

Através dos gráficos das Figs. 4.23, 4.24 e 4.25, pode-se observar que a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) decresce com o aumento do teor de umidade, com o aumento da

porcentagem de argila, e com o aumento do índice de plasticidade da amostra. Além disso, porcentagens de argila, teor de umidade e IP elevados estão diretamente conectados a sedimentos localizados à direita da linha B, na carta de plasticidade de Casagrande.

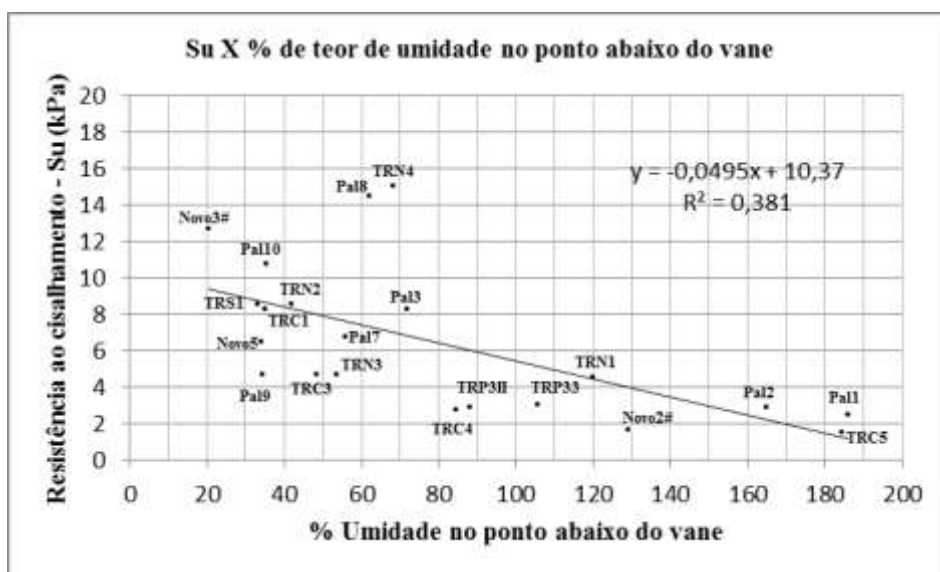


Figura 4.23. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus % de teor de umidade no ponto abaixo do ensaio de palheta.

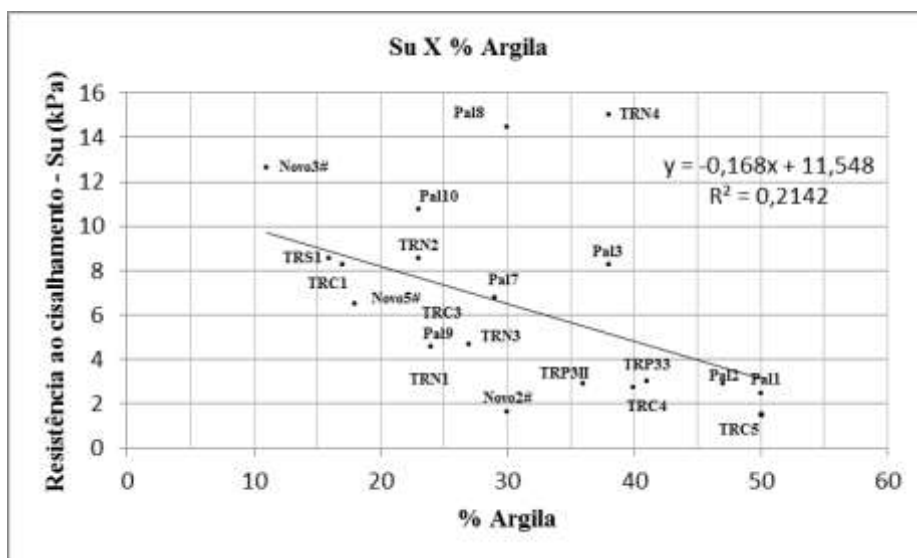


Figura 4.24. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus % de argila.

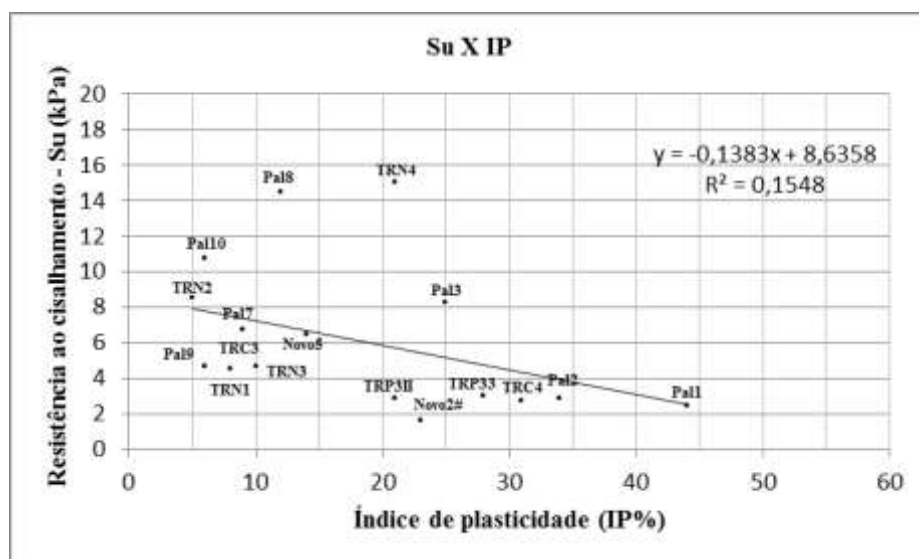


Figura 4.25. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus índice de plasticidade.

Ficam evidentes nos gráficos anteriores dois pontos anômalos (Pal8 e TRN4), que fogem da tendência de comportamento apresentada pelos demais pontos. Estas duas amostras apresentaram forte presença de conchas, que acabaram influenciando nas medidas de Su, uma vez que este ensaio foi realizado com a amostra ainda no interior do tubo PVC, sem a retirada das conchas.

No gráfico da Fig. 4.26 são apresentados os resultados da relação entre Su e o índice de atividade coloidal (Ia), razão entre o índice de plasticidade (IP) e o percentual de argila da amostra.

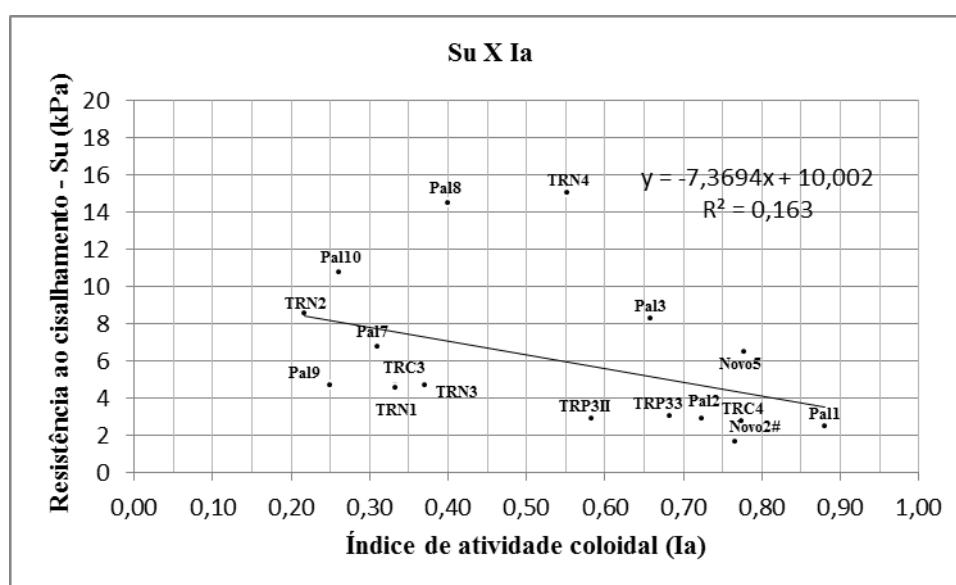


Figura 4.26. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus índice de atividade coloidal (Ia).

Grande parte das amostras apresentaram um índice de atividade coloidal inferior a 0,75, o que caracteriza solos inativos. As amostras mais argilosas e plásticas apresentaram Ia entre 0,75 e 0,90, caracterizando solos de atividade normal. Ainda, observa-se neste gráfico os dois pontos anômalos (Pal8 e TRN4), já discutidos anteriormente.

b. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul

Na Tabela 4.13 são exibidos os valores de resistência ao cisalhamento não drenada (Su) de cada amostra para a região de Rio Grande a São Lourenço do Sul.

Tabela 4.13. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su).

Amostra	Su (kPa)
#2A	3,86
#2B	1,38
#6A	4,96
#6B	3,58
#6C	5,24
#7A	2,69
#7B	0,83
#7C	3,31
#9	5,24
#10A	9,65
#10B	2,90
#10C	5,79
#11	1,93
#12A	2,76
#12B	3,03
#12C	3,86
Bacia Porto Novo #3	1,93
Bacia Porto Novo #4	1,93
Bacia Porto Novo T#05	1,38

As amostras obtidas ao longo do Canal do Porto de Rio Grande (localizadas a Sul) apresentaram baixos valores de resistência ao cisalhamento não drenada (Su), fato que remete à forte presença de finos em sua granulometria. Já os sedimentos extraídos das margens da Lagoa, como são de caráter arenoso, devido à mais alta energia de mobilização imposta, exibem valores mais altos de Su. Contudo, alguns pontos demonstraram caráter anômalo frente à tendência, fato que pode ser explicado pela presença de conchas na amostra.

Nas Figs. 4.27, 4.28 e 4.29, são apresentados os gráficos de resistência ao cisalhamento não drenada versus porcentagem de teor de umidade no ponto abaixo do ensaio de palheta, resistência ao cisalhamento não drenada versus porcentagem de argila e resistência ao cisalhamento não drenada versus índice de plasticidade.

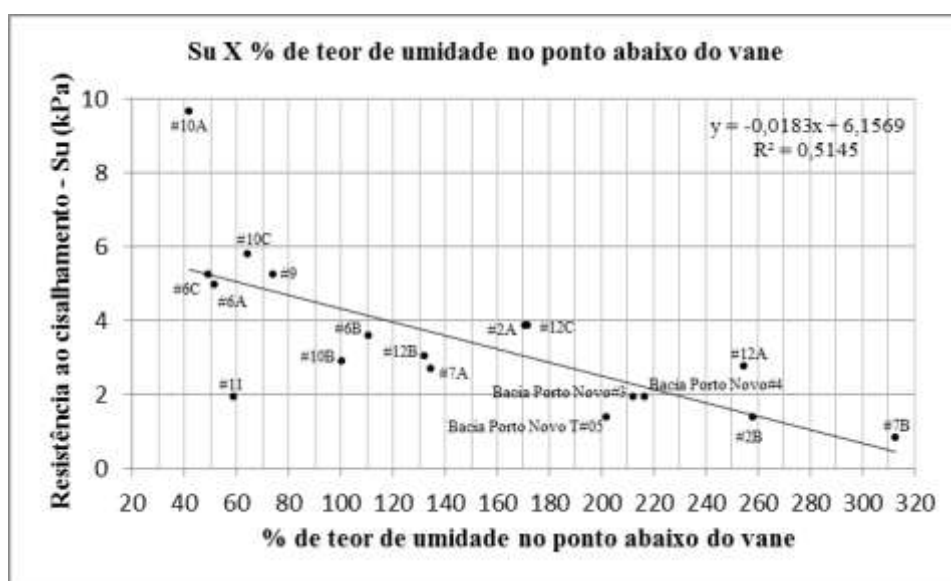


Figura 4.27. Resistência ao cisalhamento não drenada (Su) versus % de teor de umidade no ponto abaixo do ensaio de palheta.

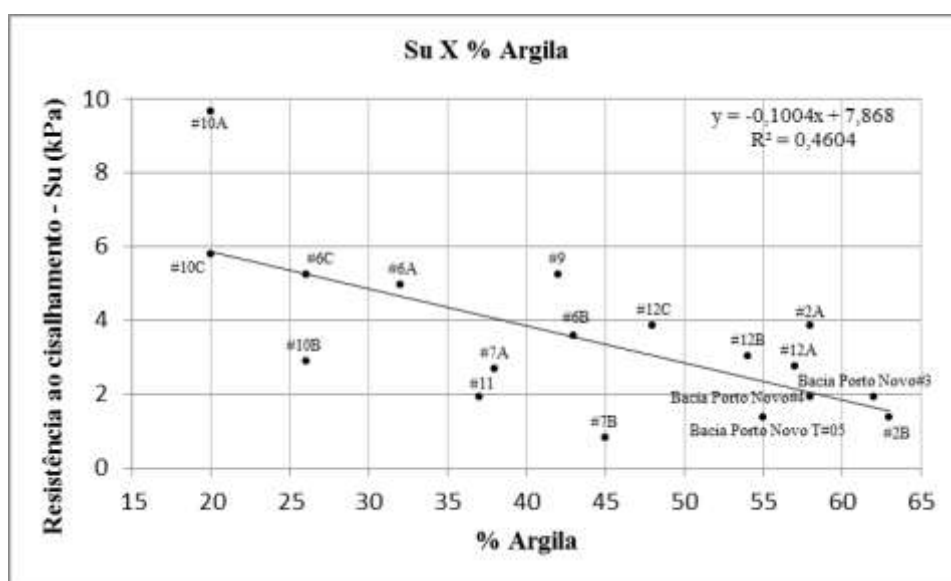


Figura 4.28. Resistência ao cisalhamento (Su) versus % de argila.

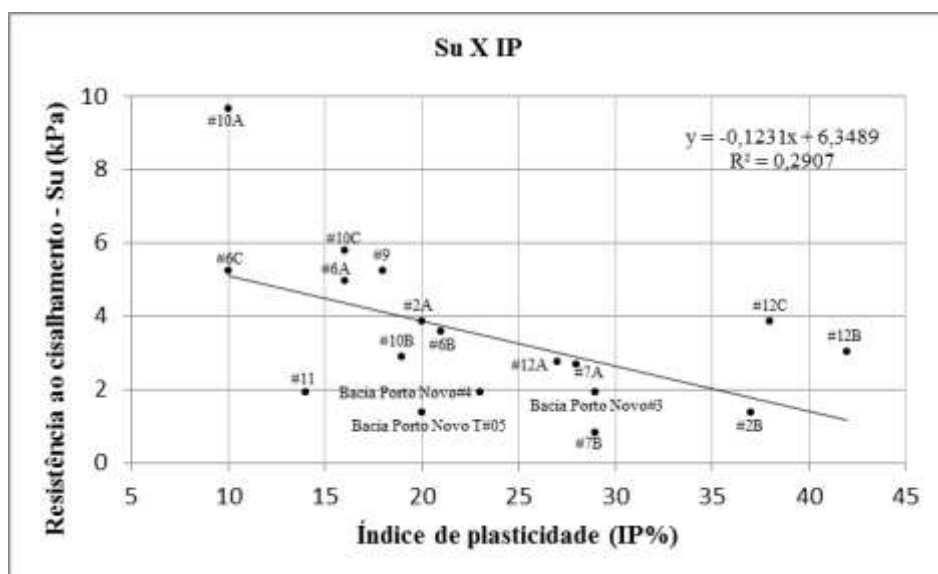


Figura 4.29. Resistência ao cisalhamento (Su) versus índice de plasticidade.

Observando ainda os gráficos das Figs. 4.27, 4.28 e 4.29, fica evidente a presença de um ponto anômalo (#10A). Esse ponto fugiu da tendência dos demais, devido ao fato de apresentar inúmeras conchas no ponto onde foi executado o ensaio de palheta, portanto influenciando fortemente o resultado de Su.

No gráfico da Fig. 4.30 são apresentados os resultados da relação entre Su e o índice de atividade coloidal (Ia), razão entre o índice de plasticidade (IP) e o percentual de argila da amostra.

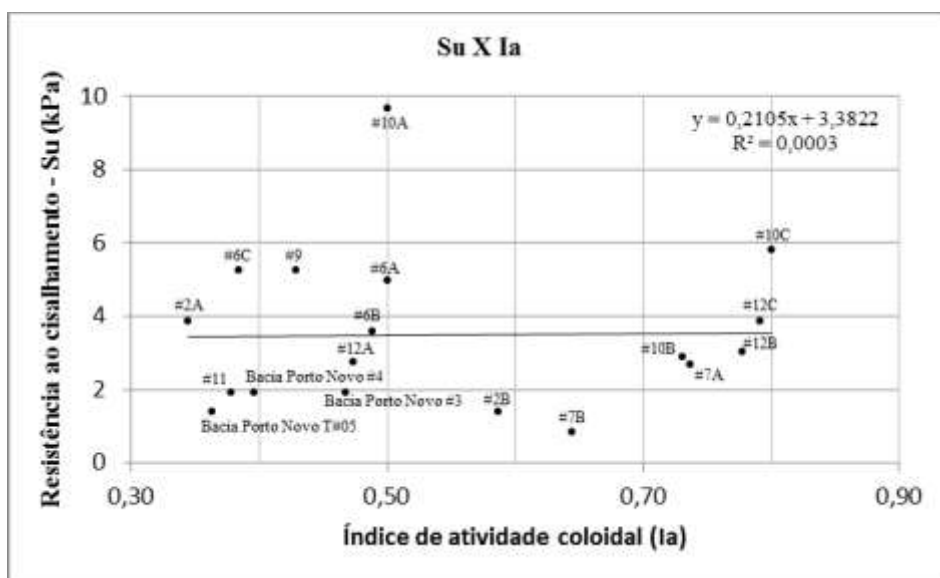


Figura 4.30. Resistência ao cisalhamento (Su) versus % índice de atividade coloidal (Ia).

A maioria das amostras apresentou um índice de atividade coloidal inferior a 0,75, o que caracteriza solos inativos. As amostras mais argilosas e plásticas apresentaram Ia entre 0,75 e 0,80, caracterizando solos de atividade normal. Ainda, observa-se neste gráfico o ponto anômalo (#10A), já discutido anteriormente.

4.6. Difratometria de raios X (DRX)

a. Área marinha entre Rio Grande e Torres

A Figura 4.31, 4.32 e 4.33 apresentam os gráficos gerados para a amostra Pal 2, para as frações de areia, silte e argila após o refinamento dos dados obtidos através do ensaio de difratometria de raios X. Observando a intensidade dos picos difratados, é possível identificar, que a amostra em questão é composta pelos seguintes minerais: quartzo, mica, feldspato, montmorilonita, illita e caulinita.

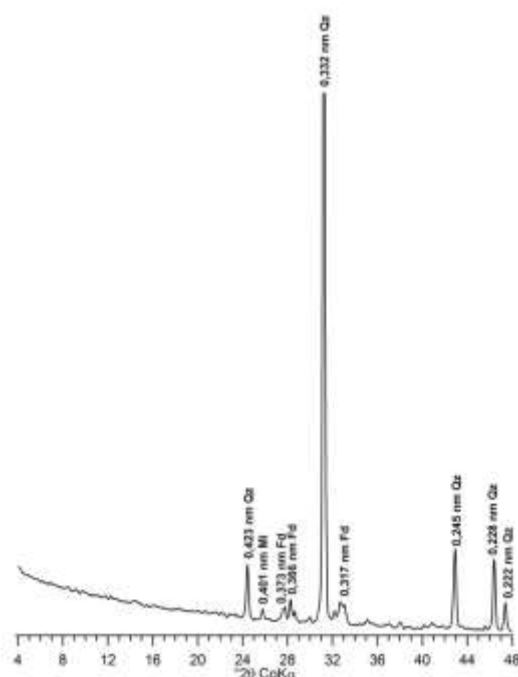


Figura 4.31. Difrátograma de raios X para amostra Pal 2 - fração areia (sem tratamentos).

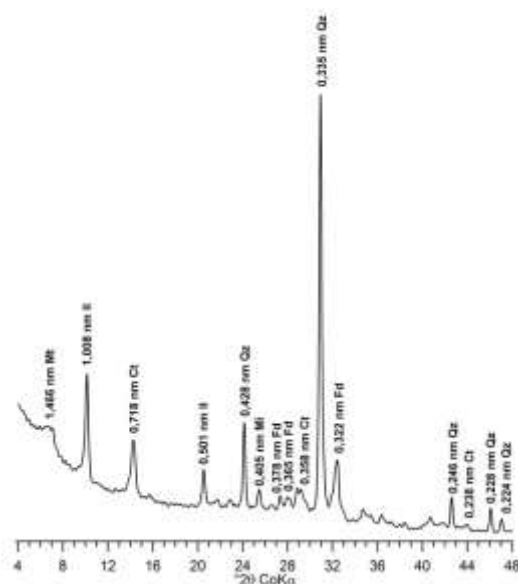


Figura 4.32. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - fração silte (sem tratamentos).

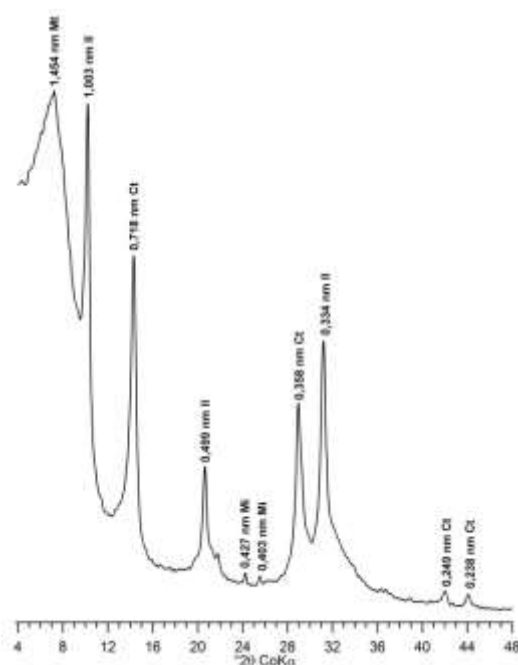


Figura 4.33. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - fração argila (sem tratamentos).

Através da observação dos gráficos gerados após a realização do ensaio de DRX com os tratamentos de saturação com potássio, saturação com magnésio, solvatação com glicerol, aquecimento a 350°C e 550°C (Fig. 4.34), pode-se confirmar a presença de ilita, caulinita e

montmorilonita. Além disso, também é possível constatar a influência de cada tratamento no argilomineral: caulinita - colapsa quando é aquecida a 550°C, ilita - não apresenta alterações diante dos tratamentos, montmorilonita - expande quando solvatada com glicerol e contrai quando é saturada com potássio e aquecida a 550°C.

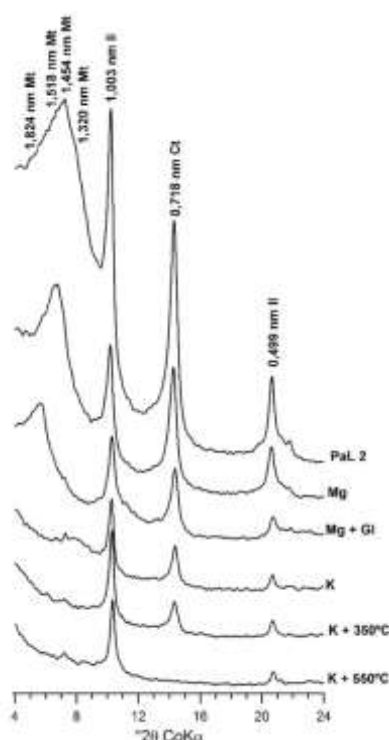


Figura 4.34. Difratoograma de raios X para amostra Pal 2 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

Os difratogramas das demais amostras ensaiadas encontram-se no Apêndice C. Os resultados apontam para a presença de caulinita, ilita e montmorilonita em todas as amostras ensaiadas.

b. Área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul

A Figura 4.35, 4.36 e 4.37 apresentam os gráficos gerados para a amostra #2A, frações areia, silte e argila, onde é possível constatar através da intensidade dos picos difratados que os minerais que compõe a amostra, são: quartzo, mica, feldspato, montmorilonita, ilita e caulinita.

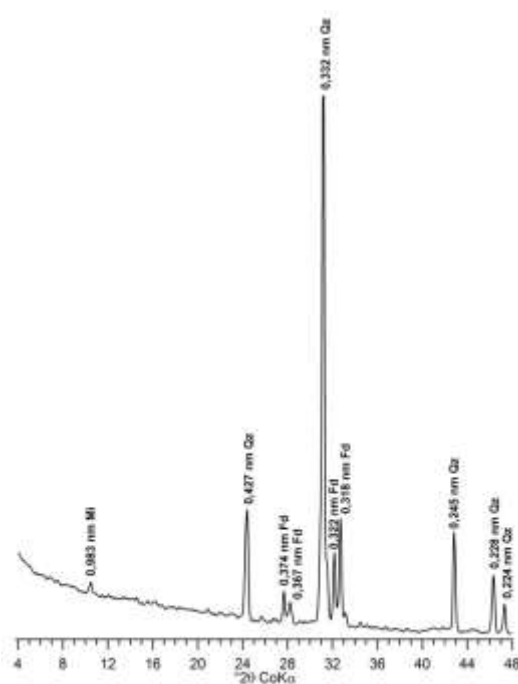


Figura 4.35. Difratoograma de raios X para amostra #2A - fração areia (sem tratamentos).

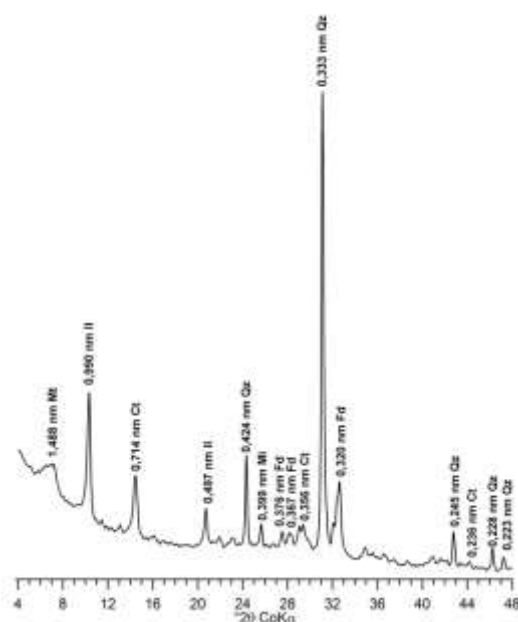


Figura 4.36. Difratoograma de raios X para amostra #2A - fração silte (sem tratamentos).

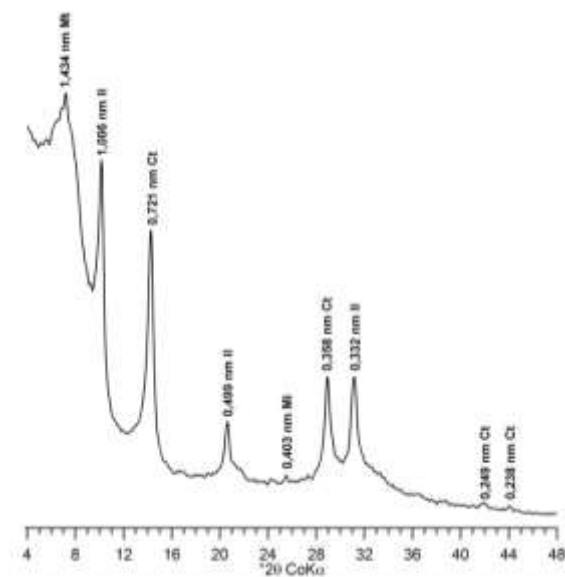


Figura 4.37. Difratoograma de raios X para amostra #2A - fração argila (sem tratamentos).

A Figura 4.38 apresenta os gráficos gerados após o ensaio de DRX com tratamentos para a amostra #2A.

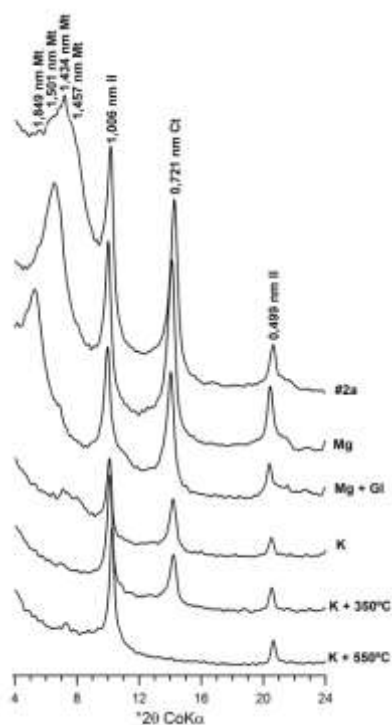


Figura 4.38. Difratoograma de raios X para amostra #2A - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

Os difratogramas das demais amostras ensaiadas encontram-se no Apêndice D. Os resultados apontam para a presença de caulinita, illita e montmorilonita em todas as amostras ensaiadas.

4.7. Ensaio de Adensamento

Nas Figuras 4.39 e 4.40 encontram-se, como exemplo, as curvas tensão versus índice de vazios das amostras Pal7 e TRN1. As demais curvas de tensão versus índice de vazios encontram-se no Apêndice E.

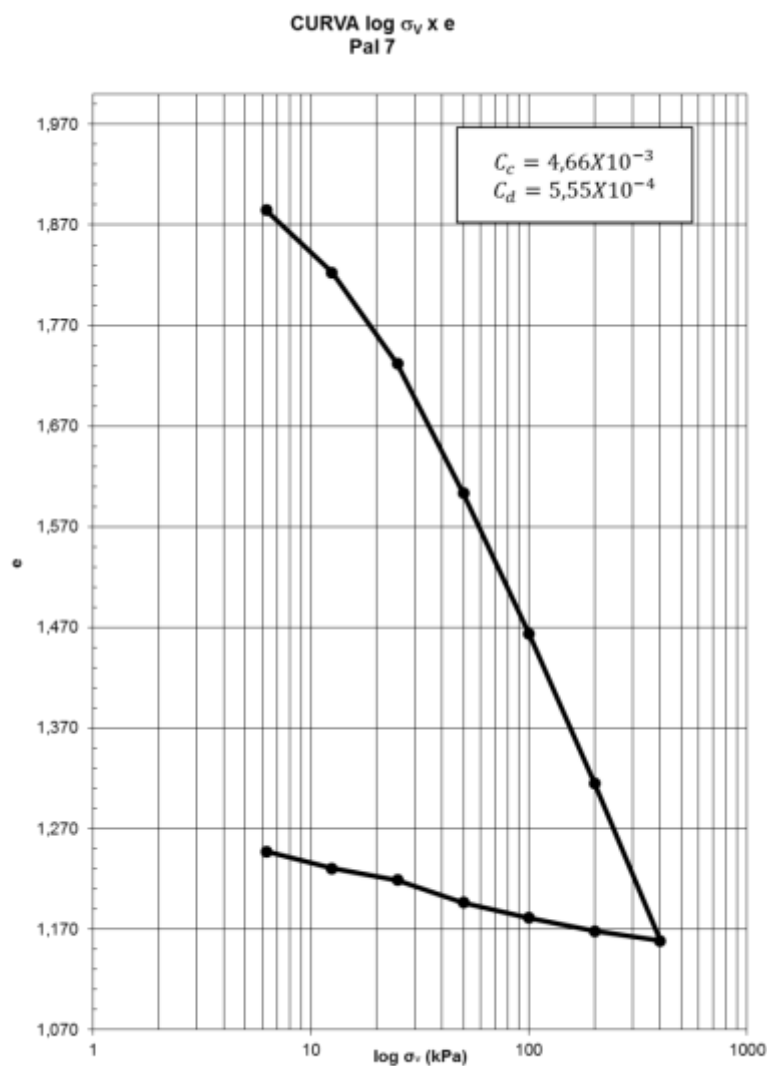


Figura 4.39. Gráficos de log tensão versus índice de vazios amostra Pal 7.

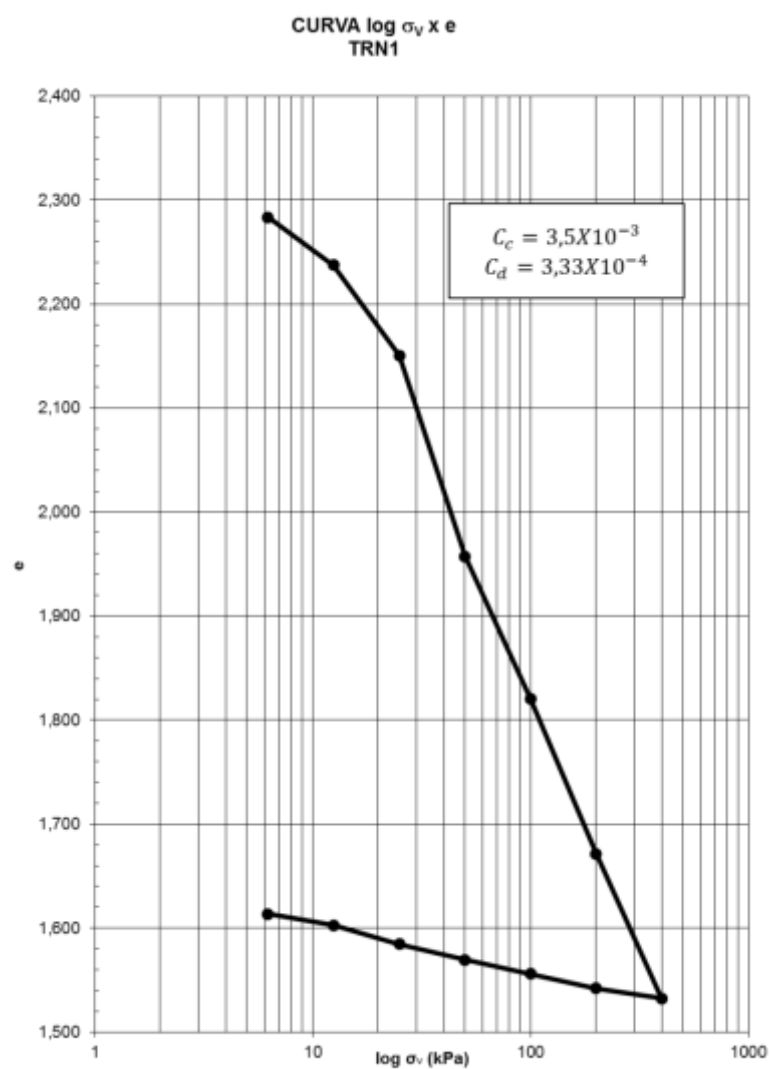


Figura 4.40. Gráficos de log tensão versus índice de vazios amostra TRN1.

Na Tabela 4.14 são mostrados os parâmetros obtidos através do ensaio de adensamento.

Tabela 4.14. Resultados dos parâmetros do ensaio de adensamento.

Amostra	Estágio (kPa)	H ₅₀ (cm)	t ₅₀ (s)	C _v (cm ² /s) Casagrande	H ₅₀ (cm)	t ₉₀ (s)	C _v (cm ² /s) Taylor	C _c	C _d
Pal 7	6,25	-	-	-	-	-	-	4,66x10 ⁻³	5,55x10 ⁻⁴
	12,5	1,9236	4200	4,3390E-05	1,9224	24000	3,2645E-05		
	25,0	1,871	1920	8,9795E-05	1,8757	8640	8,6327E-05		
	50,0	1,797	1200	1,3253E-04	1,805	2940	2,3493E-04		
	100,0	1,708	420	3,4208E-04	1,7137	2160	2,8824E-04		
	200,0	1,6121	300	4,2665E-04	1,616	2160	2,5631E-04		
	400,0	1,507	305	3,6672E-04	1,508	2940	1,6398E-04		
TRN1	6,25	-	-	-	-	-	-	3,50x10 ⁻³	3,33x10 ⁻⁴
	12,5	1,9532	660	2,8468E-04	1,9545	2940	2,7546E-04		
	25,0	1,9119	1560	1,1540E-04	1,9178	3840	2,0305E-04		
	50,0	1,831	480	3,4399E-04	1,8355	2940	2,4294E-04		
	100,0	1,7298	540	2,7290E-04	1,738	1825	3,5089E-04		
	200,0	1,6426	186	7,1443E-04	1,65	960	6,0122E-04		
	400,0	1,553	126	9,4271E-04	1,562	745	6,9429E-04		
TRN2	6,25	-	-	-	-	-	-	2,80x10 ⁻³	3,33x10 ⁻⁴
	12,5	1,963	3000	6,3259E-05	1,966	8640	9,4839E-05		
	25,0	1,8997	1380	1,2879E-04	1,905	6000	1,2823E-04		
	50,0	1,8334	1200	1,3796E-04	1,834	8640	8,2532E-05		
	100,0	1,745	780	1,9227E-04	1,7496	6000	1,0816E-04		
	200,0	1,655	540	2,4981E-04	1,657	3840	1,5158E-04		
	400,0	1,5636	240	5,0170E-04	1,5627	3840	1,3482E-04		
TRN4	6,25	-	-	-	-	-	-	5,33x10 ⁻³	6,66x10 ⁻⁴
	12,5	1,8316	5700	2,8986E-05	1,835	24000	2,9744E-05		
	25,0	1,742	6000	2,4909E-05	1,749	24000	2,7021E-05		
	50,0	1,6382	3000	4,4057E-05	1,641	11760	4,8545E-05		
	100,0	1,521	1980	5,7544E-05	1,524	10140	4,8559E-05		
	200,0	1,4007	1500	6,4418E-05	1,399	8640	4,8024E-05		
	400,0	1,2882	1080	7,5674E-05	1,289	6000	5,8707E-05		
TRC4	6,25	-	-	-	-	-	-	4,00x10 ⁻³	6,66x10 ⁻⁴
	12,5	1,832	6000	2,7549E-05	1,831	37500	1,8953E-05		
	25,0	1,731	4680	3,1532E-05	1,733	28289	2,2507E-05		
	50,0	1,616	3060	4,2031E-05	1,617	21660	2,5592E-05		
	100,0	1,4945	1500	7,3334E-05	1,496	10140	4,6791E-05		
	200,0	1,372	1200	7,7256E-05	1,373	8640	4,6255E-05		
	400,0	1,249	1020	7,5324E-05	1,248	7260	4,5481E-05		
TRC5	6,25	-	-	-	-	-	-	0,015	6,66x10 ⁻⁴
	12,5	1,419	4200	2,3611E-05	1,432	13500	3,2202E-05		
	25,0	1,267	2400	3,2942E-05	1,276	10140	3,4041E-05		
	50,0	1,125	1320	4,7221E-05	1,124	8640	3,1000E-05		
	100,0	0,9855	960	4,9825E-05	0,988	6000	3,4490E-05		
	200,0	0,862	660	5,5447E-05	0,861	6000	2,6193E-05		
	400,0	0,7487	660	4,1829E-05	0,7438	8640	1,3575E-05		

Analisando a Tab. 4.14, verifica-se que o coeficiente de adensamento (C_v) é variável com a tensão aplicada, podendo apresentar-se crescente ou decrescente. Na Figura 4.41 é mostrado um exemplo deste fato, onde na amostra Pal 7 o C_v é decrescente com o nível de tensões, enquanto que na Fig. 4.42, amostra TRN1, o C_v é crescente com o nível de tensões.

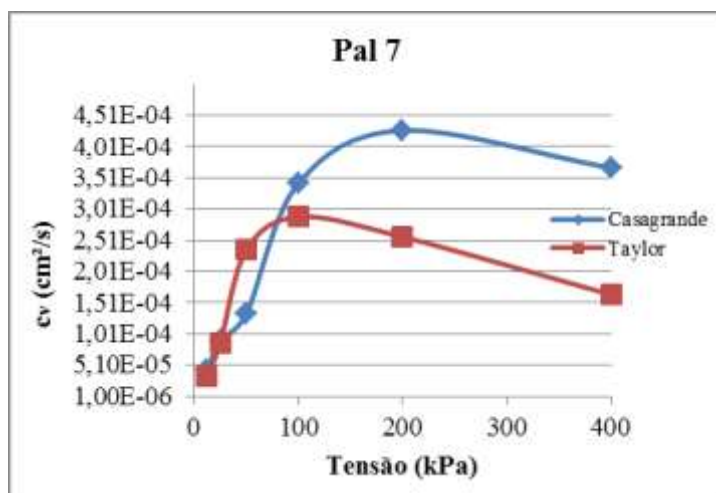


Figura 4.41. Gráficos de tensão versus C_v amostra Pal 7.

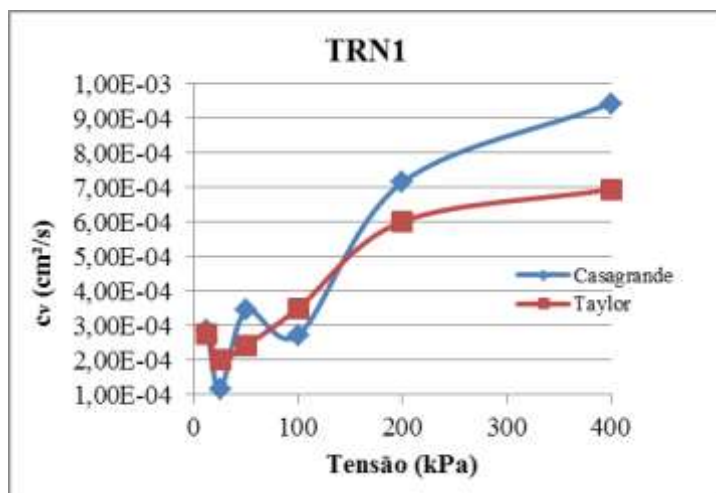


Figura 4.42. Gráficos de tensão versus C_v amostra TRN1.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. Conclusões

Foram apresentados e discutidos resultados de caracterização geotécnica básica de 27 amostras do fundo marinho, coletadas na região compreendida entre Rio Grande e Torres (RS), e de 19 amostras do fundo lagunar, coletadas na região entre Rio Grande a São Lourenço do Sul (RS).

Para a região marinha, a seguinte síntese de resultados pode ser formulada:

- Amostras coletadas mais ao sul apresentaram maiores percentuais de argila, umidade, índice de plasticidade e menor resistência ao cisalhamento. Esse fato pode estar ligado à forte influência de sedimentos finos oriundos do desague da Lagoa dos Patos;
- Amostras coletadas mais ao norte, em cotas batimétricas menores, apresentam grandes percentuais de areia, baixo teor de umidade e elevada resistência ao cisalhamento. Ambientes de deposição mais energéticos próximos da costa podem explicar este fato;
- Amostras coletadas ao norte, em cotas batimétricas maiores, apresentam elevados percentuais de argila. Ambientes de deposição menos energéticos em maiores distâncias da costa também podem explicar este fato;
- Em geral, a classificação granulométrica das amostras tem boa concordância com o mapa faciológico da Bacia de Pelotas, proposto por Paixão (2012);
- Não foi possível inferir conclusões para os ensaios de DRX, pois a análise não foi feita de forma quantitativa, mas somente para determinar a mineralogia da amostra, o que impossibilitou atribuir certos resultados, como os de adensamento, à presença marcante de dado mineral.

Para a região lagunar, pode-se sintetizar os resultados da seguinte maneira:

- Amostras coletadas mais ao sul (no canal de acesso ao Porto de Rio Grande) apresentaram maiores percentuais de argila, teor de umidade, índice de plasticidade e menor resistência ao cisalhamento;
- Amostras coletadas mais ao norte, próximo às margens da Lagoa dos Patos, apresentam grandes percentuais de areia, baixo teor de umidade e elevada resistência ao cisalhamento. Ambientes de deposição mais energéticos próximos das margens podem explicar este fato;

- Amostras coletadas ao norte, em cotas batimétricas maiores, apresentam grandes percentuais de argila. Ambientes de deposição menos energéticos em zonas mais próximas ao centro da Lagoa dos Patos também podem explicar este fato;
- Em geral, a classificação granulométrica das amostras tem boa concordância com o mapa faciológico da Lagoa dos Patos, proposto por Marroig (2015), a menos das amostras coletadas em zonas mais centrais da Lagoa, a maiores cotas batimétricas, onde os resultados do presente trabalho mostram maior presença de finos em relação aos resultados expostos por Marroig (2015).

O banco de dados resultante dos estudos apresentados no presente trabalho acrescenta às tradicionais medidas de granulometria, resultados de caracterização geotécnica básica e medidas de resistência ao cisalhamento de amostras do fundo marinho entre Rio Grande e Torres (RS), e de amostras do fundo lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS). Espera-se que este banco de dados possa contribuir no meio técnico, de forma a acrescentar conhecimento em relação às características dos sedimentos marinhos e lagunares superficiais.

5.2. Sugestões para Pesquisas Futuras

- Ampliar o banco de dados, acrescentando resultados de caracterização de mais amostras de fundo das duas regiões;
- Utilizar amostradores capazes de extrair amostras em cotas batimétricas elevadas.

REFERÊNCIAS

- Abreu, J. G. N. e Calliari, L. J. (2005). Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. **Revista Brasileira de Geofísica**, Vol. 23, No. 2, p. 123-132.
- Allwright, D. J. (2002). **The vibrating tuning fork fluid density tool**. Study Group Report.
- Antiqueira, J. A. F. e Calliari, L. J. (2005). Características sedimentares da desembocadura da Laguna dos Patos. **Gravel** (Porto Alegre), Vol. 3, p. 39-46.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). **Solo - Análise Granulométrica, NBR 7181**, Rio de Janeiro, 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). **Solo - Determinação do Limite de Liquidez, NBR 6459**, Rio de Janeiro, 6 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). **Solo - Determinação do Limite de Plasticidade, NBR 7180**, Rio de Janeiro, 3 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). **Solo - Determinação da Massa Específica, NBR 6508**, Rio de Janeiro, 8 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). **Rochas e Solos, NBR 6502**, Rio de Janeiro, 18 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). **Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de Ensaio, NBR 6484**, Rio de Janeiro, 17 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (Anexo A - Determinação do teor de umidade de solos), NBR 6457**, Rio de Janeiro, 9 p.
- Baldez, A. L. (2010). **Construção e testes de um penetrômetro de queda livre para caracterização do perfil de resistência ao cisalhamento de solos marinhos**. Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 128 p.
- Barbosa, E. G., Rosa, M.L.C. e Ayup-Zouain, R.N. (2008). Cronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: uma revisão das seqüências deposicionais. **Gravel**, Vol. 6, p. 125-138.
- Bennett, R. H. e Nelsen, T. A. (1983). Seafloor characteristics and dynamics affecting geotechnical properties at shelfbreaks. **The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication**, No. 33, p. 333-355.

- Bogossian, F. (2012). A história da geotecnia offshore no Brasil, **Fundações e obras geotécnicas**, No. 21, p. 66-71.
- Briaud, J.L. (2013). Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils, **John Wiley and Sons**, New Jersey.
- Bulla, L. A. S. e Hartmann, C. (2009). Aplicação do QTC SIDEVIEW na Classificação de Sedimentos através de Imagens de Sonar de Varredura Lateral, num Trecho do Canal São Gonçalo, RS, Brasil. **Gravel** (Porto Alegre), Vol. 7, No. 1, p. 19-30.
- Burmister, D. M. (1949). Principles and techniques of soil identification. **Proceedings, Annual Highway Research Board Meeting, National Research Council, Washington, D. C.**, Vol. 29, p. 402-434
- Calliari, L. J. e Abreu, J. G. N.. Litologia da plataforma continental interna adjacente a cidade do Rio Grande (RS), através da interpretação de registros de sonar de varredura lateral e amostragem superficial. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXIII, 1984, Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro, p. 1553-1564.
- Calliari, L. J., Gomes, M. E. V., Griep, G. H. e Möller Jr., O. O.. Características sedimentológicas e fatores ambientais da região estuarial da Lagoa dos Patos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXI, 1980, Balneário Camboriú, Santa Catarina. **Anais**, Vol. 2, p. 862-875.
- Calliari, L. J., Griep, G. e Vieira, H., (1977). Características sedimentológicas do 2o perfil de bentos - Lagoa dos Patos - Parte Sul. **Atlântica**, Vol. 2, No. 1, p. 63-82.
- Corrêa, I. C. S.. Depósito de material carbonático da Plataforma Continental Interna do Rio Grande do Sul (Brasil). In: International Conference on Marine Resources of the Pacific, 1983, Viña del Mar, Chile. **Anais**, Viña del Mar, Chile, p. 155-163.
- Corrêa, I. C. S. e Abreu, V. S.. Evolução da sedimentação holocênica da plataforma continental e talude superior entre Rio Grande e Torres - RS. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXIII, 1984, Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro, p. 63-78.
- Corrêa, I. C. S., Martins, L. R. S., Ketzer, J. M. M., Elias, A. R. D. e Martins, R. (1996). Evolução sedimentológica e paleogeográfica da plataforma continental sul e sudeste do Brasil. **Notas Técnicas**, Vol. 9, p. 51-61.
- Davis, A., Haynes, R., Bennell, J. e Huws, D. (2002). Surficial Seabed Sediment Properties Derived from Seismic Profiler Responses. **Marine Geology**, Vol. 182, p. 209-223.
- Dayal, U. (1978). Recent trends in underwater in-situ soil testing. **IEEE Journal of Oceanic**

Engineering, Vol. 3, n. 4, p. 176-186.

- Das, B. M. (2010). **Principles of geotechnical engineering**. Cengage Learning. 7ª Ed..
- Dias, J.A. (2004). **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos**. Disponível em: http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/Sedim/SedimA_AT.pdf.
- Dunsiger, A. D., Chari, T. R., Fader, G. B., Peters, G. R., Simpkin, P. G. e Zielinski, A. (1981), Ocean sediments - a study relating geophysical, geotechnical, and acoustic properties. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 18, issue 4, p. 492-501.
- Embrapa (2011). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2ª Ed..
- Folk, R.L. e Ward, W.C. (1957). Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, Vol. 27, No. 1, pp. 3-26.
- Fontes, M. (2016). **Remoção de matéria orgânica em amostras de solo**. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 2 p.
- Harris, M. M., Avera, W. E., Abelev, A., Bentrem, F. W. e Bibee, L. D. (2008). Sensing shallow seafloor and sediment properties, recent history. **Proc. 2008 MTS/IEEE Oceans**, Quebec, p. 1–11.
- Head, K. H. (1982). **Manual of Soil Laboratory Testing**, Vol. 2, Pentech Press, London.
- ISSMGE (2005). Geotechnical and geophysical investigations for offshore and nearshore developments. Int. Society for Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. **Handbook**.
- Kc Denmark - **Research equipment**. Disponível em < <http://www.kc-denmark.dk/products/sediment-samplers.aspx>>. Acesso em 11 de Maio de 2016.
- Krumbein, W.C. (1934). Size frequency distributions of sediments. **Journal of Sedimentary Petrology**, Vol. 4, No. 2, pp. 65 - 77.
- Leão, T. F. (2013). **Características de depósitos de lama sobre diferentes regimes hidrodinâmicos**. Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 86 p.
- Lee, C., Yun, T. S., Lee, J-S., Bahk, J. J. e Santamarina, J. C. (2011). Geotechnical characterization of marine sediments in the Ulleung Basin, East Sea. **Engineering Geology**, Vol. 117, No. 1, p. 151-158.
- Liu, S. Y., Shao, G. H., Du, Y. J. e Cai, G. J. (2011). Depositional and geotechnical properties of marine clays in Lianyungang, China. **Engineering Geology**, Vol. 121, No. 1, p. 66-74.
- McManus, D.A. (1963). A criticism of certain usage of the phi notation. **Journal of Sedimentary**

- Petrology**, Vol. 33, No. 3, pp. 670-674.
- Marchetti, S. (2014). The seismic dilatometer for in situ soil investigations. **Indian Geotechnical Conference 2014**, Kakinada, India, 9 p.
- Marroig, P. C. (2015). **Transporte de lama fluida no complexo estuarino de Rio Grande - RS**. Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 137 p.
- Mello, J. R. e Bogossian, F. (1998). Fundações de estruturas offshore. **In: Fundações teoria e prática**, São Paulo: Pini, 2ª Ed..
- Mendonça, E. de S. e Matos, E. da S. (2005). **Matéria orgânica do solo: método de análises**. Viçosa: UFV.
- Nogueira, J. B. (2001). **Mecânica dos solos - Ensaio de laboratório**. São Carlos: EESC-USP.
- Ohtsubo, M., Higashi, T., Kanayama, M. e Takayama, M. (2007) Depositional geochemistry and geotechnical properties of marine clays in the Ariake Bay area, Japan. In: Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Three Volume Set: **Proceedings of the Second International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils**, Singapore, 29 November-1 December 2006. CRC Press, p. 1893-1938.
- Paixão, B. E. G. (2012). **Distribuição faciológica da Bacia de Pelotas**. Monografia de graduação, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, 53 p.
- Pansu, M. e Gautheyrou, J. (2006). Mineralogical Characterisations by X-Ray Diffractometry. **Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods**, p. 83-131.
- Passos, M. S. e Fontoura, J. A. S.. Sistema de informações geográficas aplicado ao estudo da caracterização sedimentológica costeira do Rio Grande do Sul. In: Mostra de Produção Universitária, 14ª, 2015, Rio Grande. **Anais**, Rio Grande, FURG.
- Pejrup, M. (1988). The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. In Boer, P.L., Gelder, A., e Nio, S.D. (Eds.), Tide-Influenced Sedimentary Environment and Facies, **D. Reidel Publishing Company**, p. 289-300.
- Pinto, C. S., 2006. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 3ª Ed..
- Preston, J. M., Collins, W. T., Mosher, D. C., Poeckert, R. H. e Kuwahara, R. H. (1999). The Strength of Correlations between Geotechnical Variables and Acoustic Classifications. **In: OCEANS'99 MTS/IEEE Conference, 1999**, Seattle, Vol. 3, p. 1123-1128.
- Rabassa, C. M. (2010). **Monitoramento geotécnico da obra de ampliação dos molhes do Rio**

- Grande, Brasil.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 130 p.
- Randolph, M. F. (2012). Offshore Geotechnics - the Challenges of Deepwater Soft Sediments. **GeoCongress 2012 “State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering”**, Oakland, p. 241-271.
- Randolph, M. F., Cassidy, M. e Gourvenec, S. (2005). Challenges of Offshore Geotechnical Engineering. **In: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, XVI, 2005**, Osaka, Vol. 1, p. 123-176.
- Resende, M., Curi, N., Ker, J. C., Rezende, S. B. (2005). **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: Editora UFLA.
- Sahu, B. K. (1964). Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. **Journal of Sedimentary Petrology**, Vol. 34, No. 1, p. 73-83.
- Schnaid, F., (2000). **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos.
- Shepard, F.P. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. **Journal of Sedimentary Petrology**, Vol. 24, No. 3, pp. 151-158.
- Souza, L. A. P. (2006). **Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas**. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 311 p.
- STEMA SURVEY SERVICES, (2006). **DensLog - Density acquisition module**. STEMA Survey Services b. v., The Netherlands.
- STEMA Systems - **Research equipment**. Disponível em <www.stema-systems.nl>. Acesso em 13/12/2016.
- Tanaka, H., Locat, J., Shibuya, S., Soon, T. T. e Shiwakoti, D. R. (2001). Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake Clays. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 38, No. 2, p. 378-400.
- Tanaka, H., et al.. A comparative study on geotechnical characteristics of marine soil deposits worldwide. **In: The International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002**, Vol. 12, No. 2, 8 p.
- Thompson, D. e Beasley, D. (2012). **Handbook for Marine Geotechnical Engineering**, Naval Facilities Engineering Command.

- Tomazelli, L. J. e Villwock, J. A., (2005). Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, No. 3, p. 109-115.
- Urien, C. M. e Martins, L. R. (1978). Sedimentos da Plataforma continental Sul-Americana entre Cabo de Santa Marta (Brasil) e Terra do Fogo (Argentina). **Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia**, Porto Alegre, Vol. 3, p. 213-224.
- Viatest indústria e comércio de equipamentos LTDA - **Manual do equipamento**. Disponível em < www.viatest.com.br/manual>. Acesso em 14/12/2016.
- Weaver, P. P. E. e Schultheiss, P. J. (1990). Current Methods for Obtaining, Logging and Splitting Marine Sediment Cores. **Marine Geophysical Researches**, Vol. 12, p. 85-100.
- Wetzel, A. (1990). Interrelationships between porosity and other geotechnical properties of slowly deposited, fine-grained marine surface sediments. **Marine Geology**, Vol. 92, No. 1-2, p. 105-113.
- Whittig, L. D. e Allardice, W. R. (1986). X-Ray Diffraction Techniques. **In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis - Part 1**. Physical and Mineralogical Methods. 2. ed. Madison, WI: [s.n.]. p. 331 – 362.
- Yan, W. M. e Ma, Y. (2010). Geotechnical characterization of Macau marine deposits. **Engineering Geology**, Vol. 113, No. 1, p. 62-69.

APÊNDICE A - Curvas granulométricas - área marinha entre Rio Grande e Torres

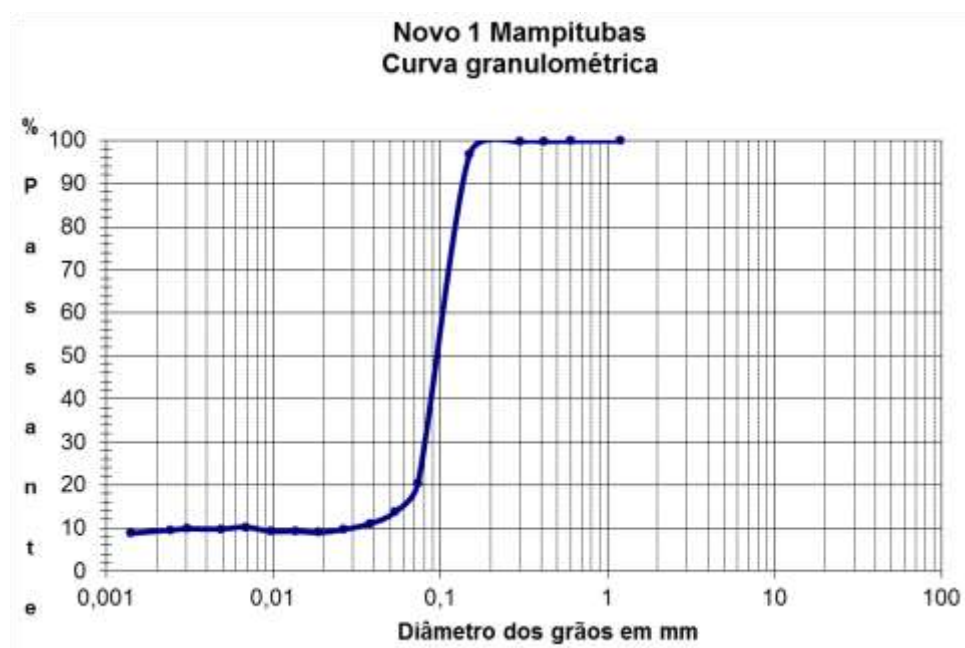


Figura A.1. Curva granulométrica amostra Novo 1 Mampitubas.

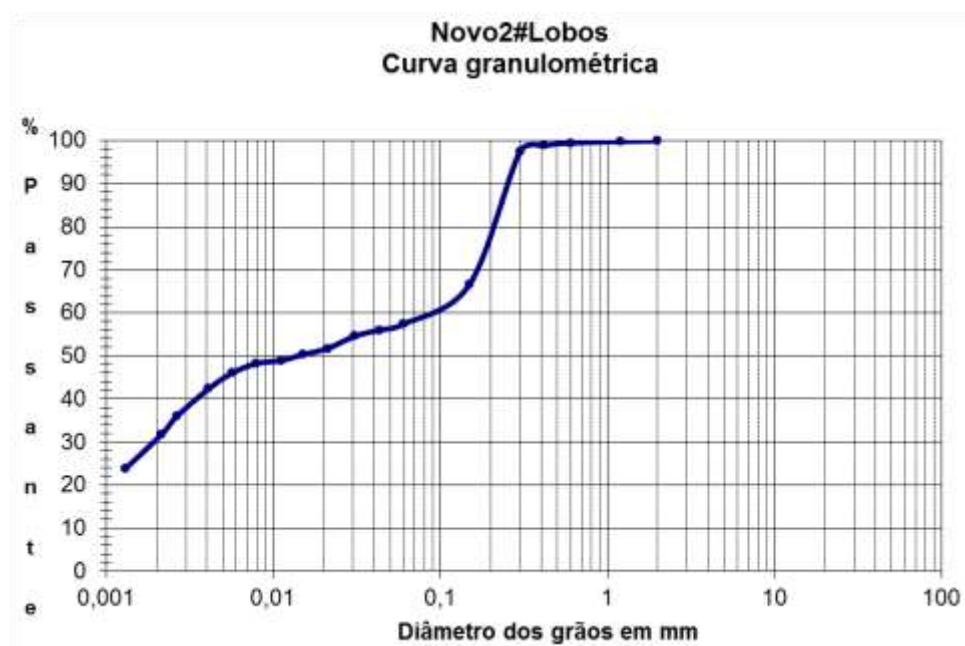


Figura A.2. Curva granulométrica amostra Novo2#Lobos.

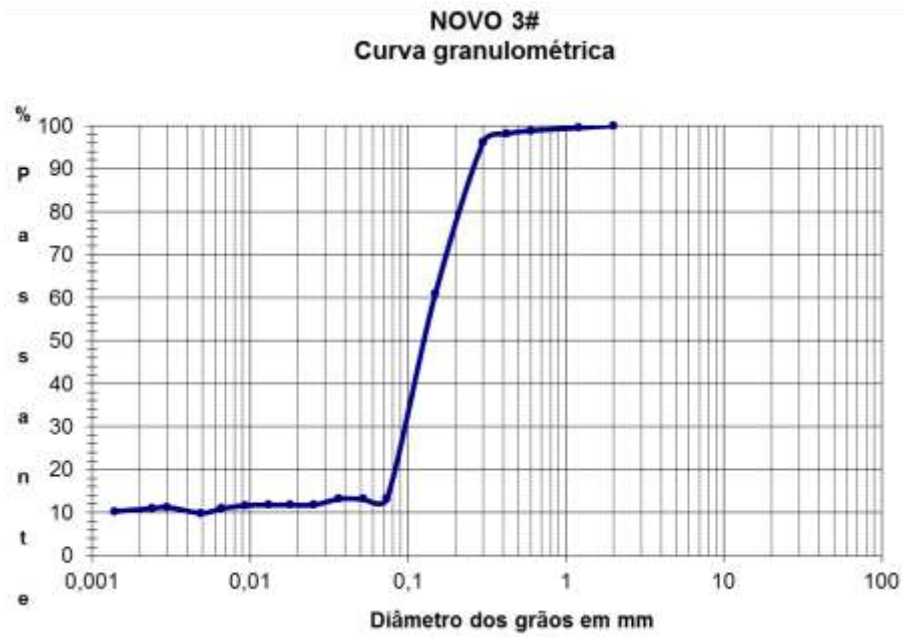


Figura A.3. Curva granulométrica amostra Novo 3#.

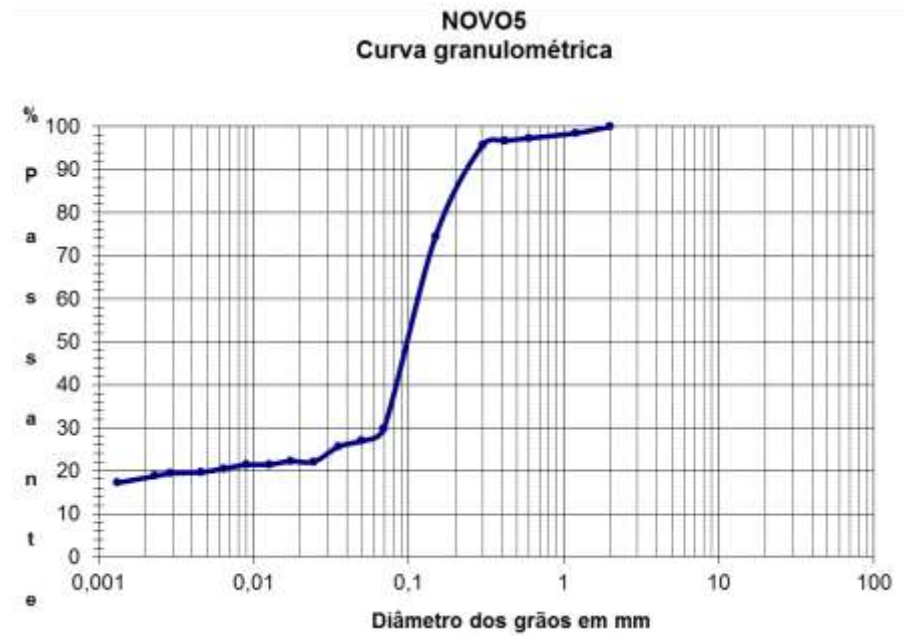


Figura A.4. Curva granulométrica amostra Novo5.



Figura A.5. Curva granulométrica amostra Pal 2.



Figura A.6. Curva granulométrica amostra Pal3.



Figura A.7. Curva granulométrica amostra Pal 4.



Figura A.8. Curva granulométrica amostra Pal6.

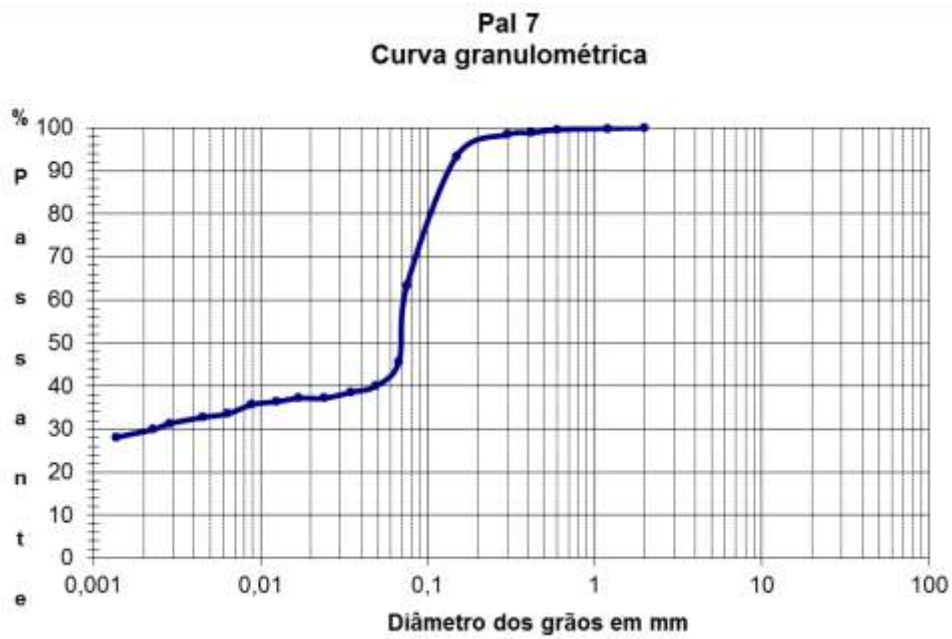


Figura A.9. Curva granulométrica amostra Pal 7.



Figura A.10. Curva granulométrica amostra Pal8.

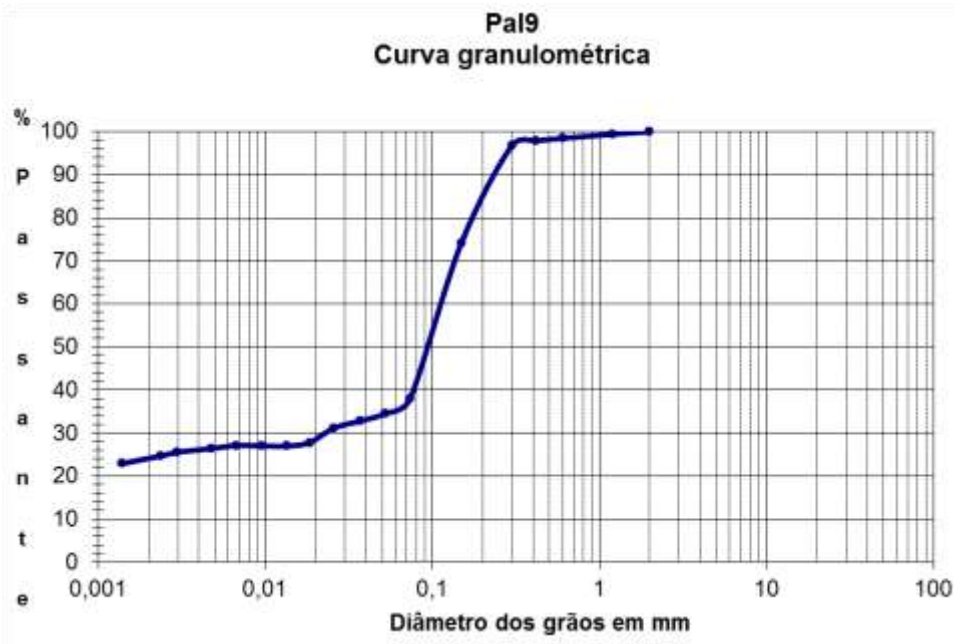


Figura A.11. Curva granulométrica amostra Pal9.

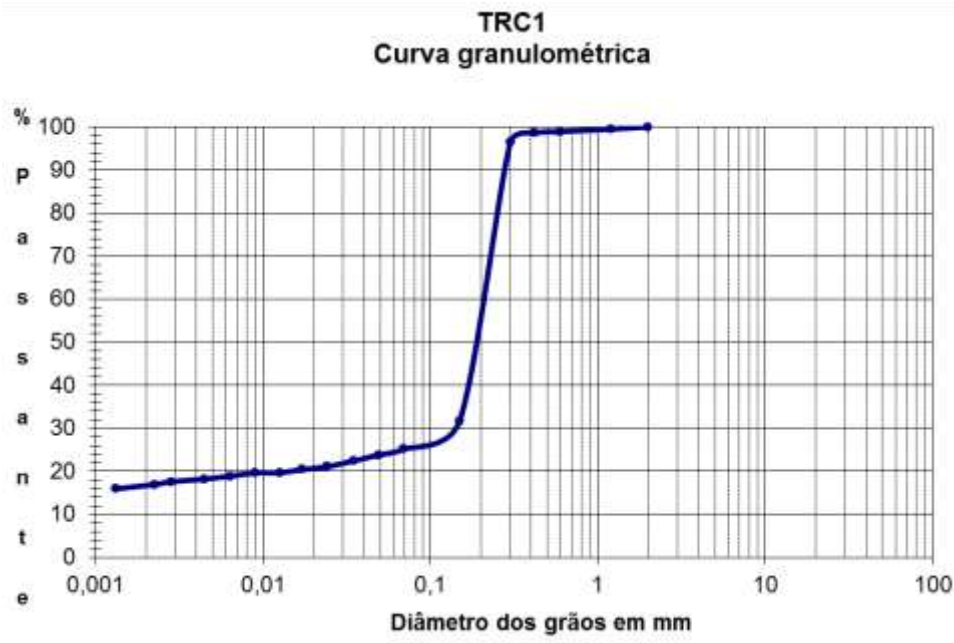


Figura A.12. Curva granulométrica amostra TRC1.

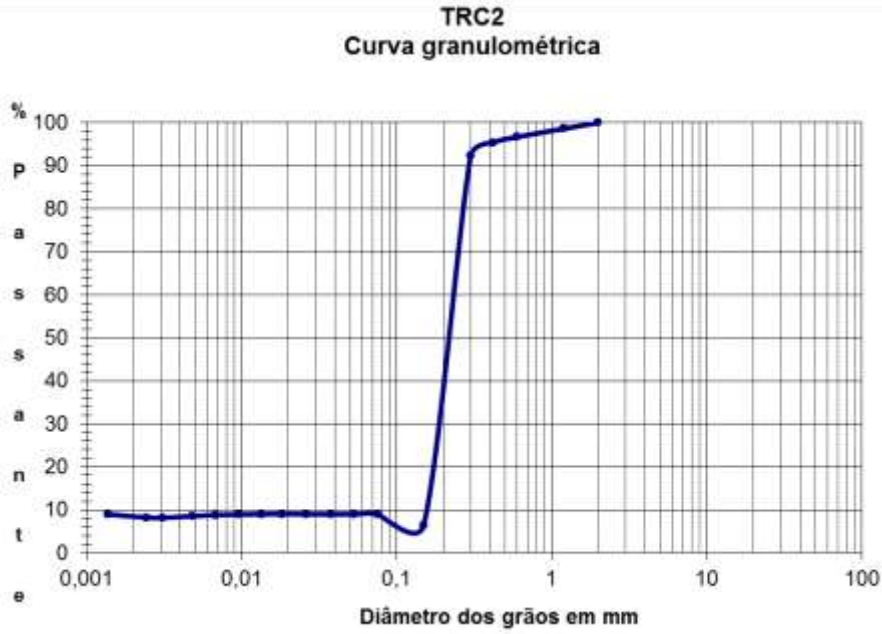


Figura A.13. Curva granulométrica amostra TRC2.

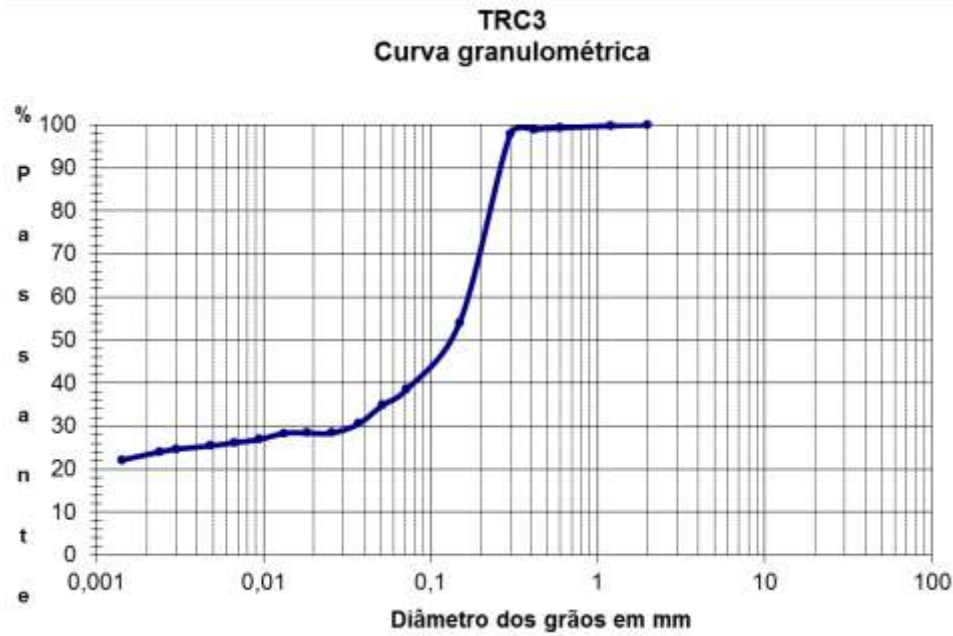


Figura A.14. Curva granulométrica amostra TRC3.

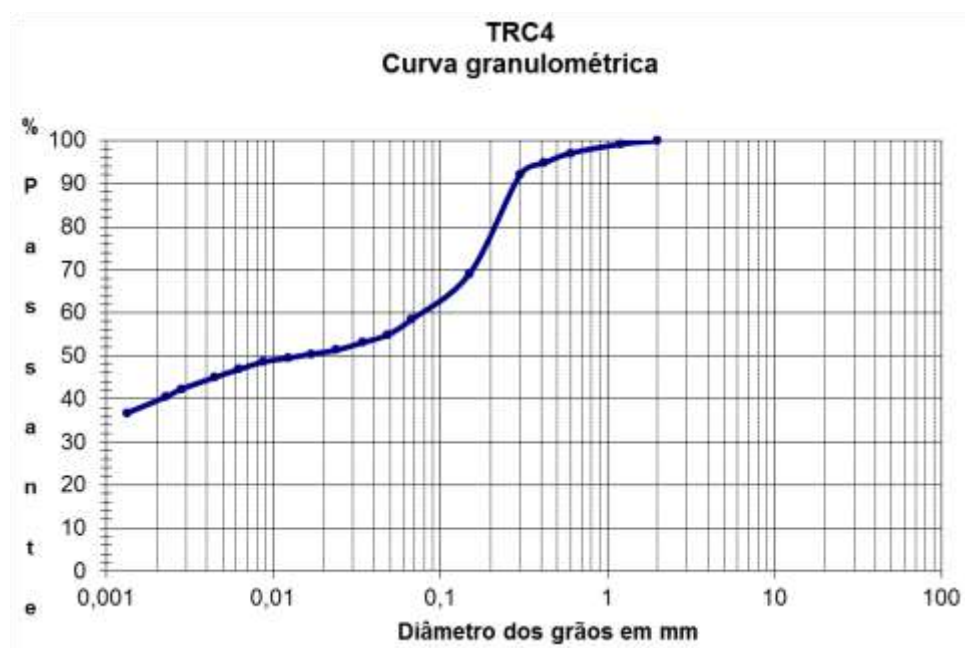


Figura A.15. Curva granulométrica amostra TRC4.



Figura A.16. Curva granulométrica amostra TRC5.

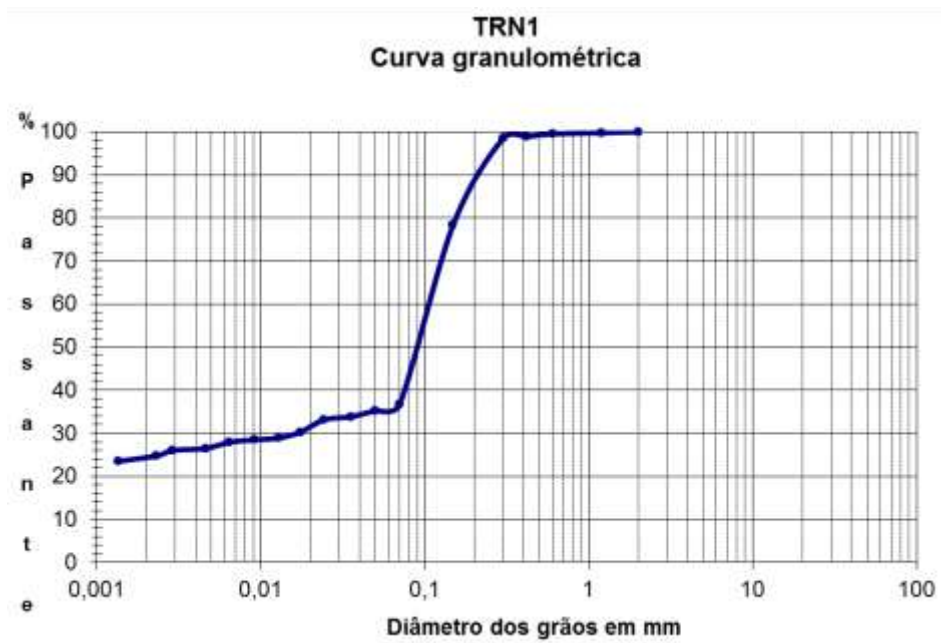


Figura A.17. Curva granulométrica amostra TRN1.

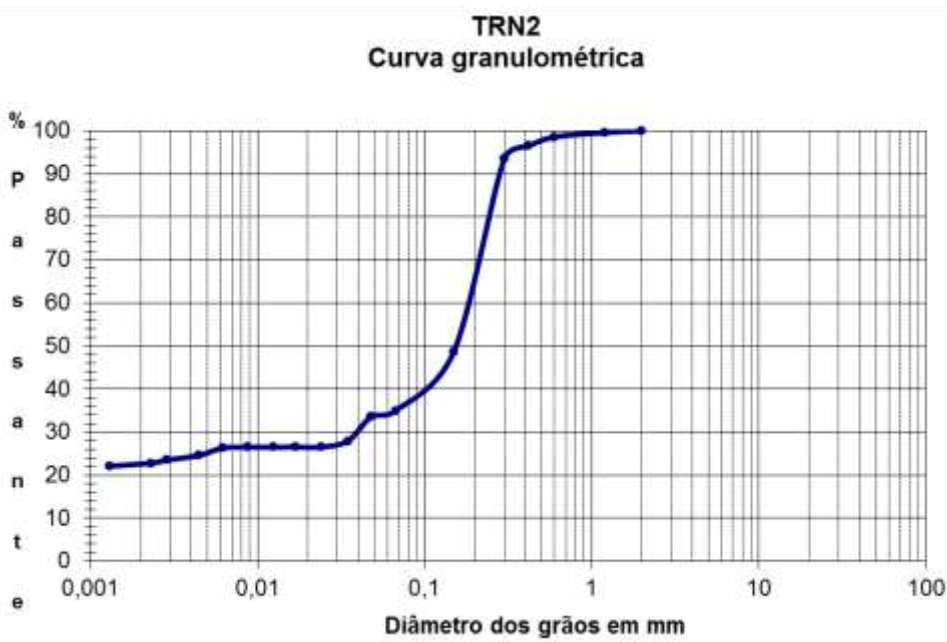


Figura A.18. Curva granulométrica amostra TRN2.

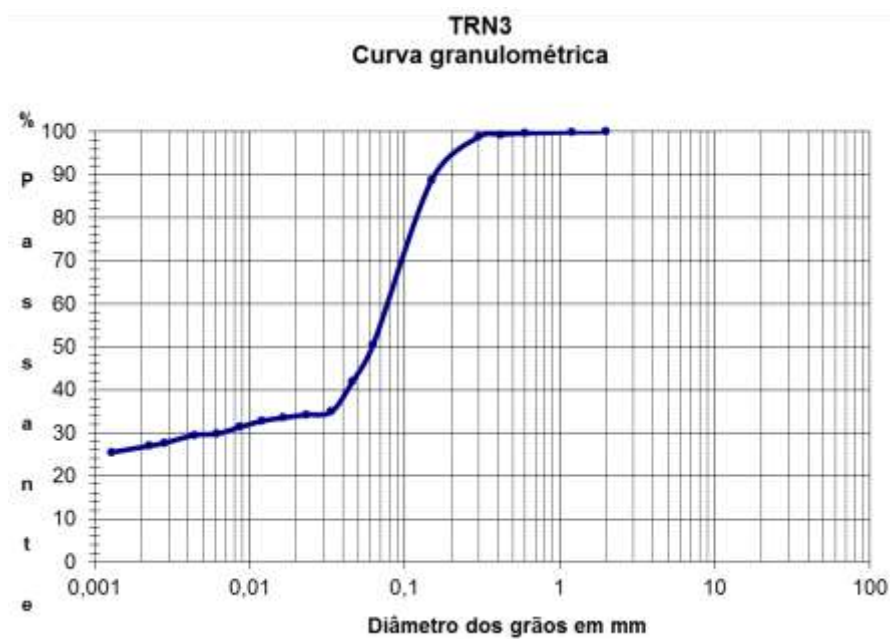


Figura A.19. Curva granulométrica amostra TRN3.

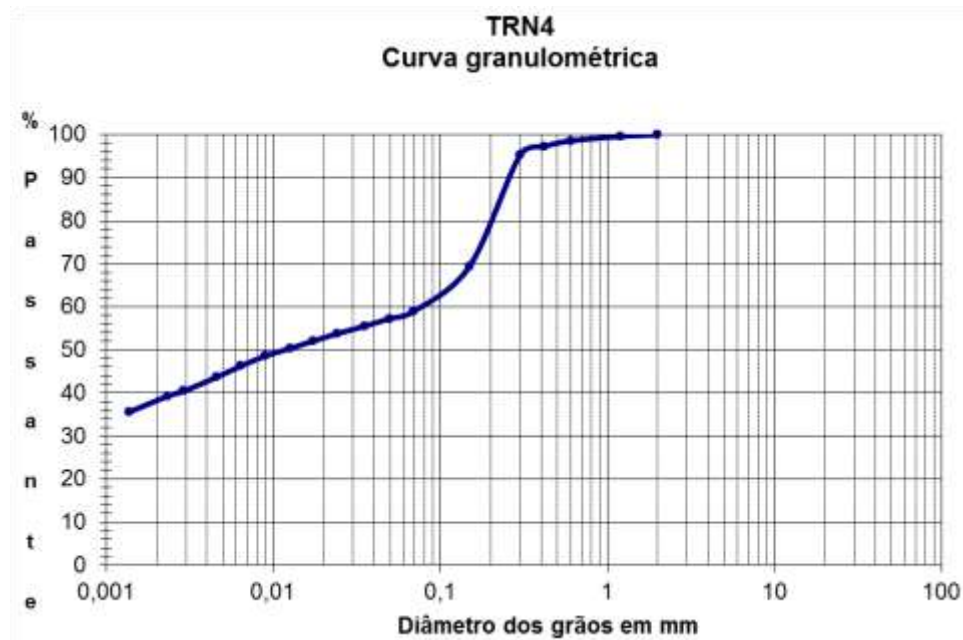


Figura A.20. Curva granulométrica amostra TRN4.

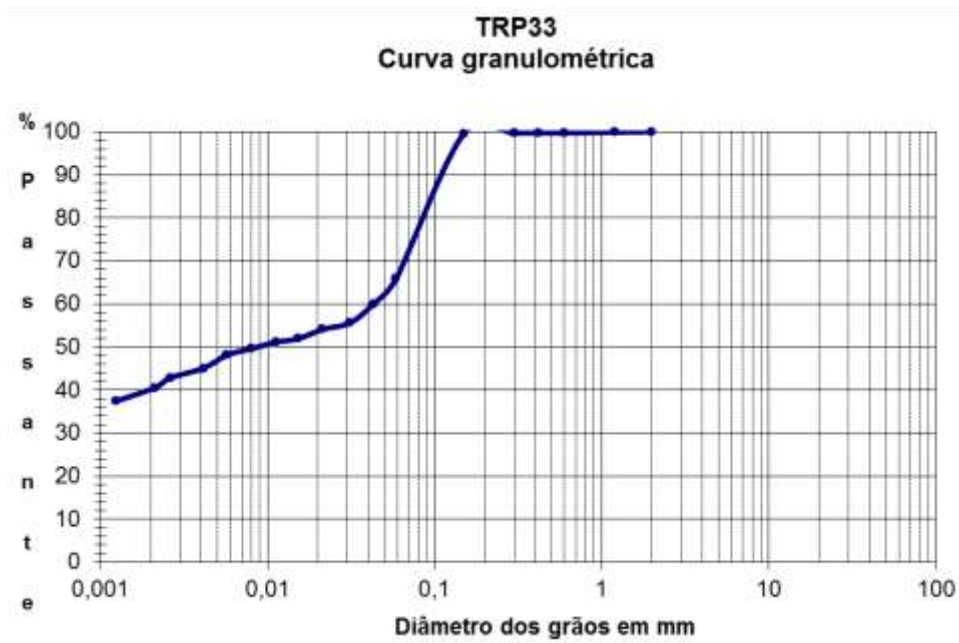


Figura A.21. Curva granulométrica amostra TRP33.

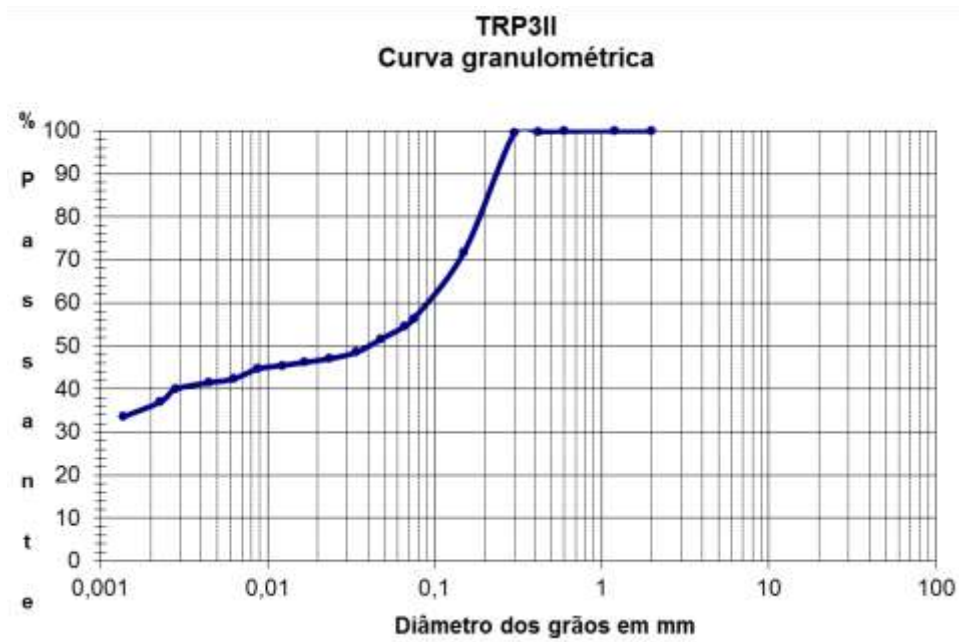


Figura A.22. Curva granulométrica amostra TRP3II.

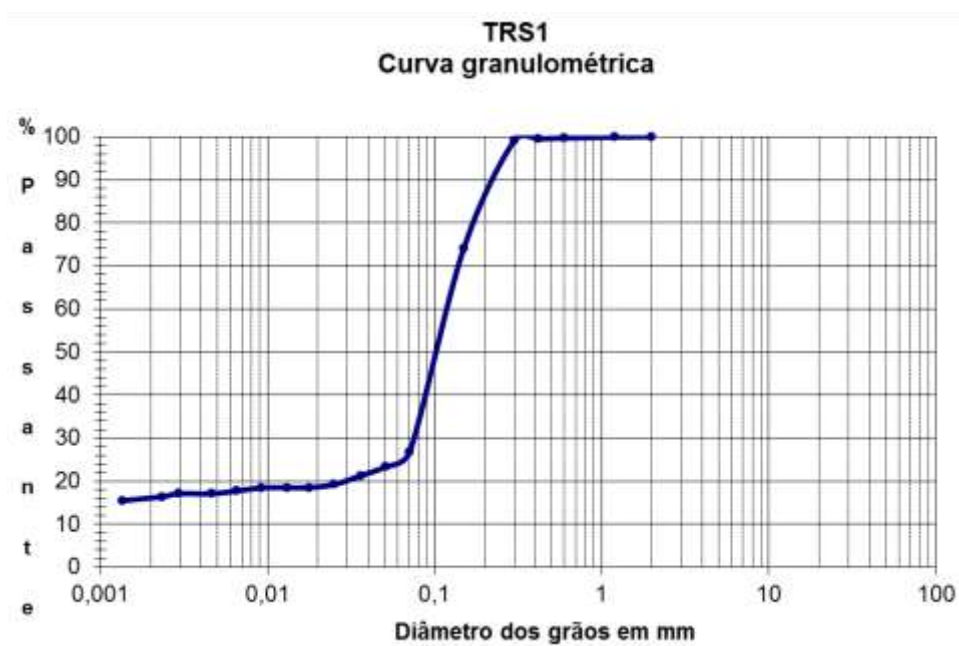


Figura A.23. Curva granulométrica amostra TRS1.

APÊNDICE B - Curvas granulométricas - área lagunar entre Rio Grande e São Lourenço Do Sul

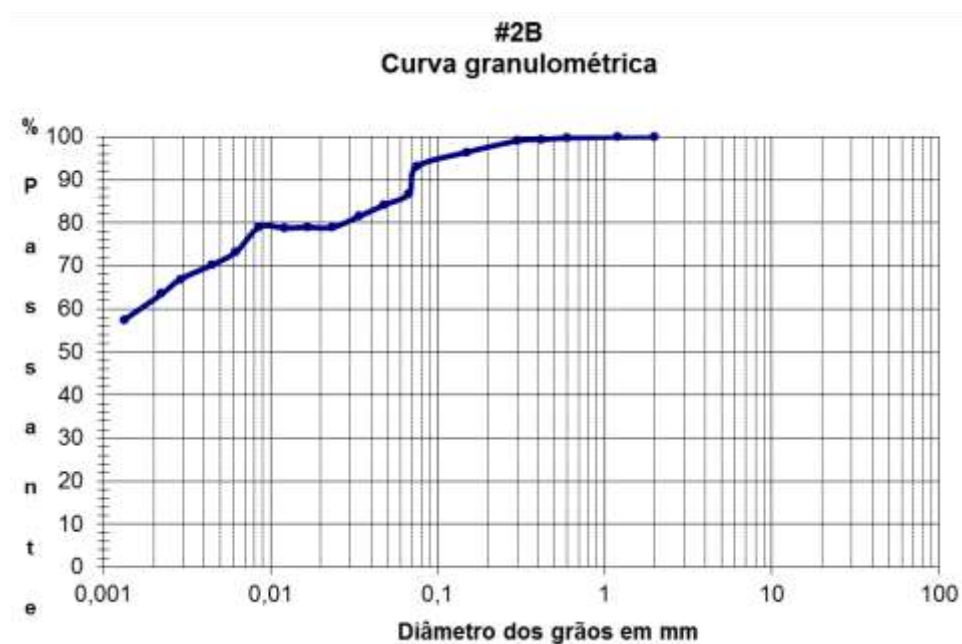


Figura B.1. Curva granulométrica amostra #2B.

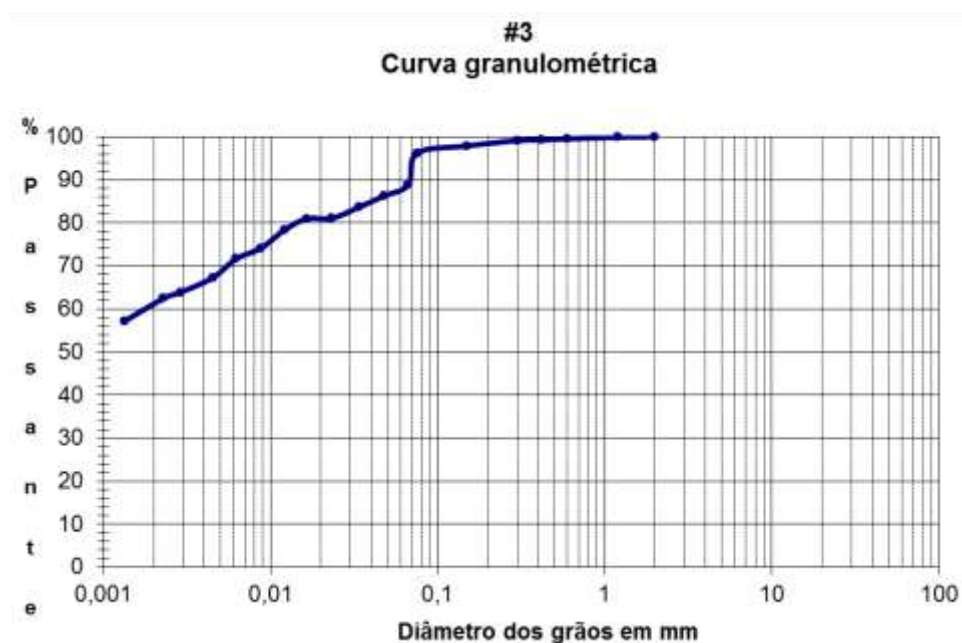


Figura B.2. Curva granulométrica amostra #3.



Figura B.3. Curva granulométrica amostra #4.



Figura B.4. Curva granulométrica amostra #5.



Figura B.5. Curva granulométrica amostra #6A.

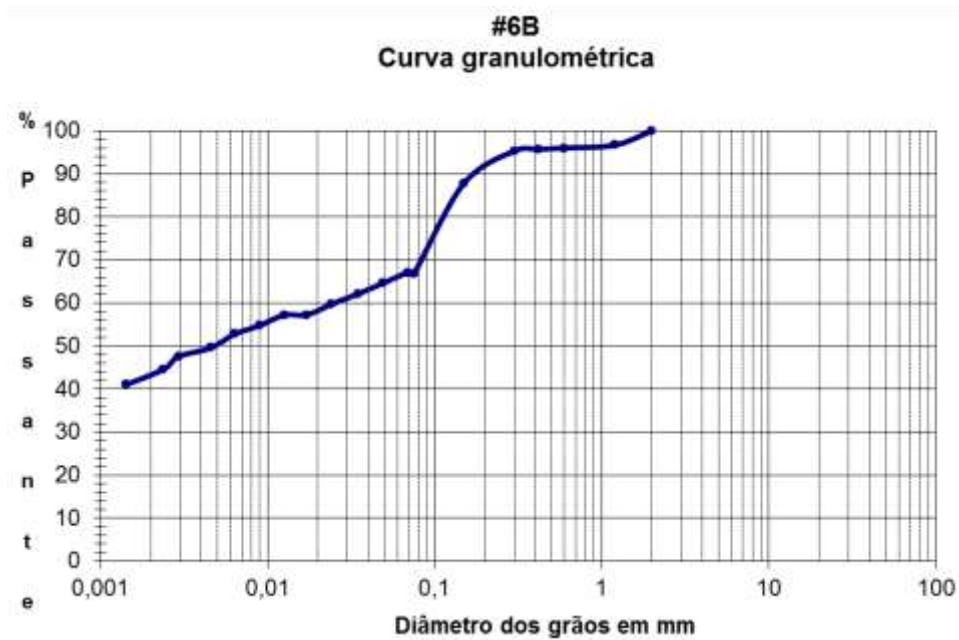


Figura B.6. Curva granulométrica amostra #6B.



Figura B.7. Curva granulométrica amostra #6C.

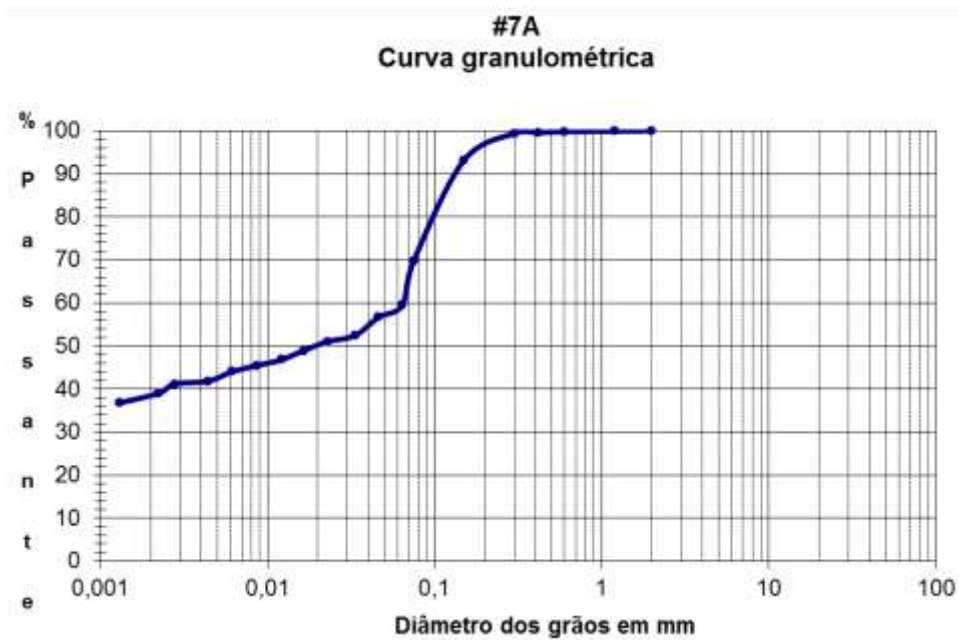


Figura B.8. Curva granulométrica amostra #7A.

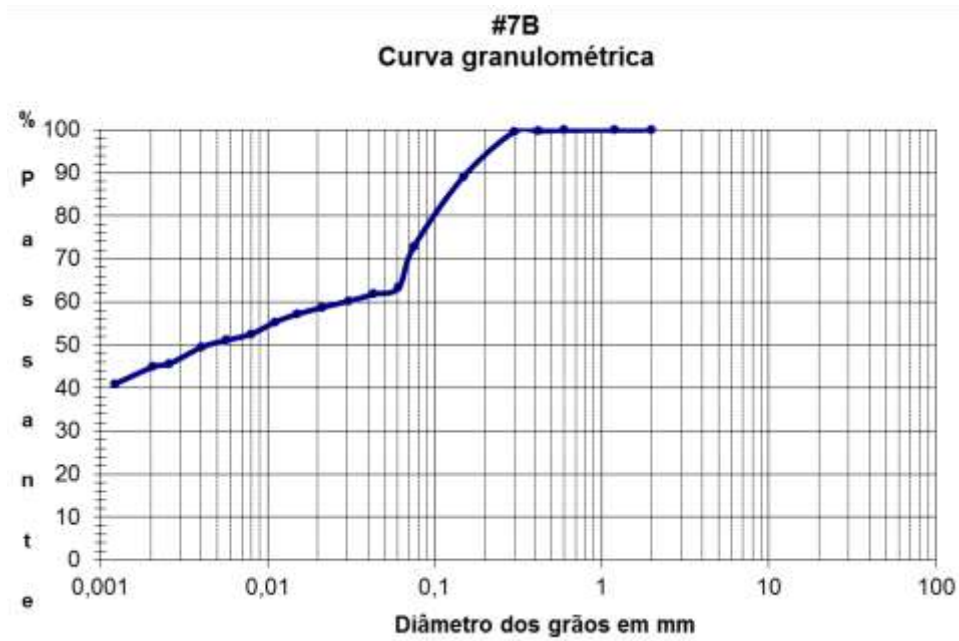


Figura B.9. Curva granulométrica amostra #7B.



Figura B.10. Curva granulométrica amostra #7C.

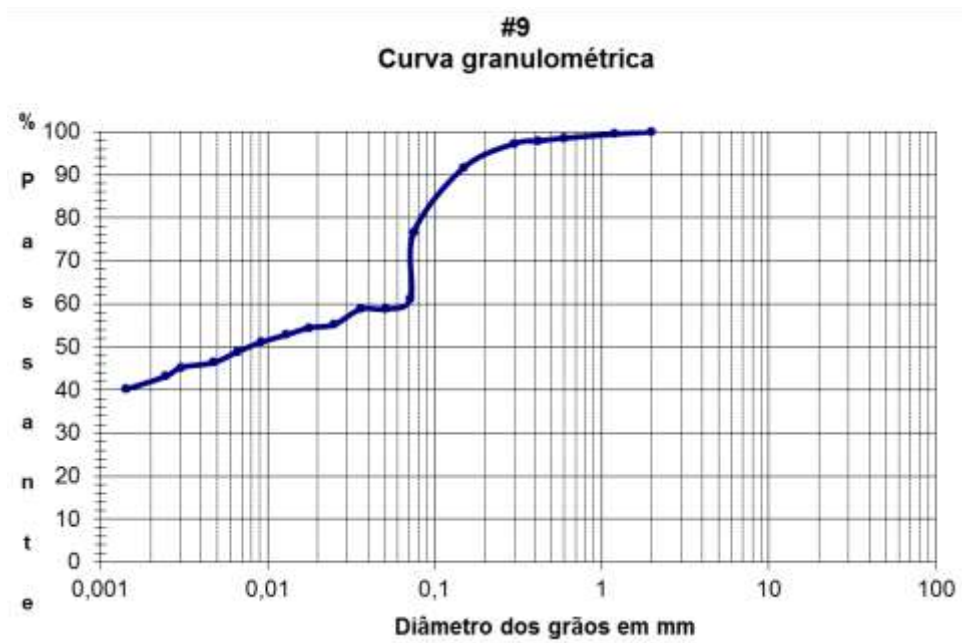


Figura B.11. Curva granulométrica amostra #9.

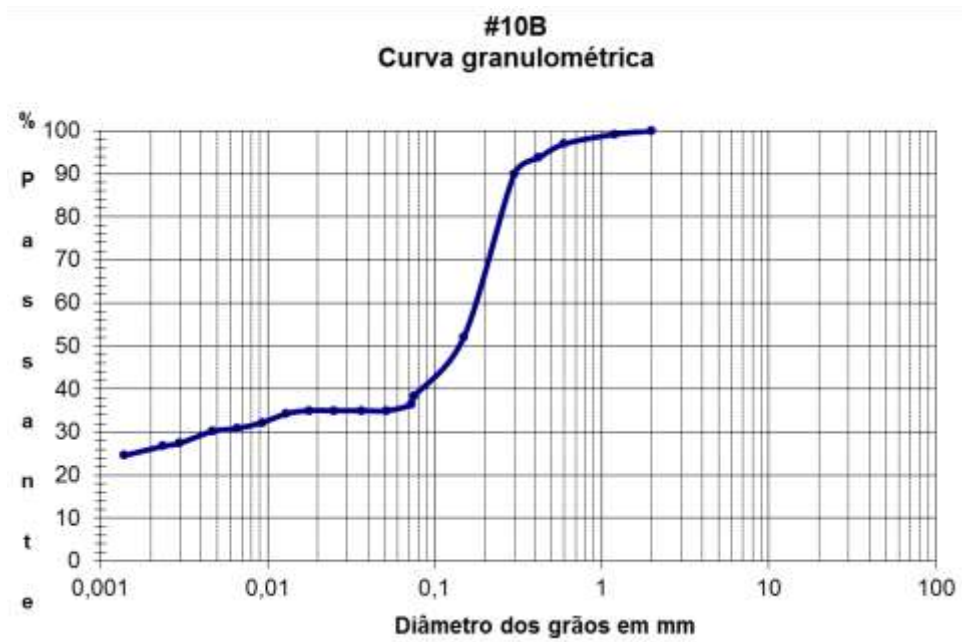


Figura B.12. Curva granulométrica amostra #10B.

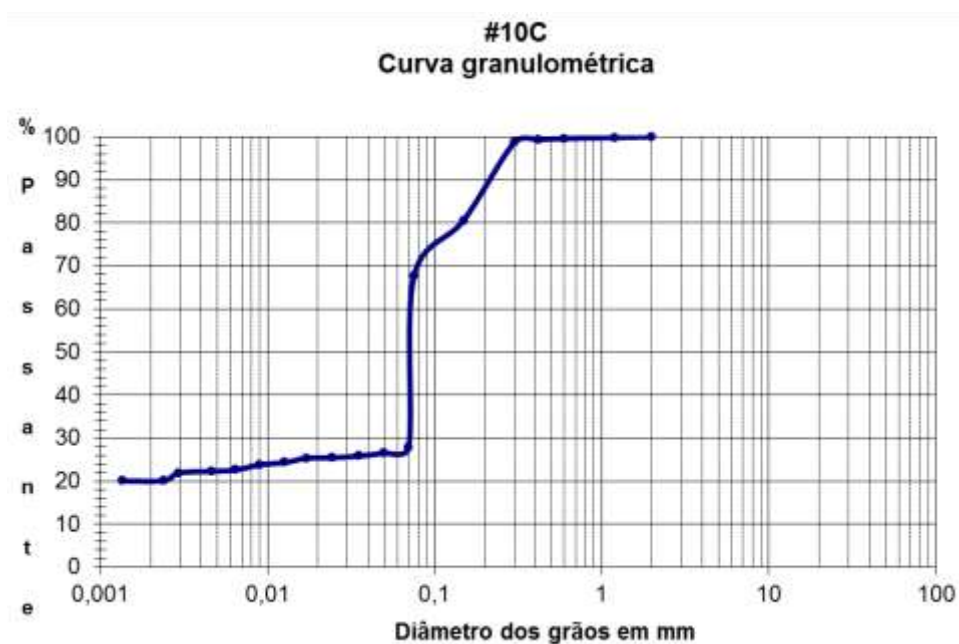


Figura B.13. Curva granulométrica amostra #10C.

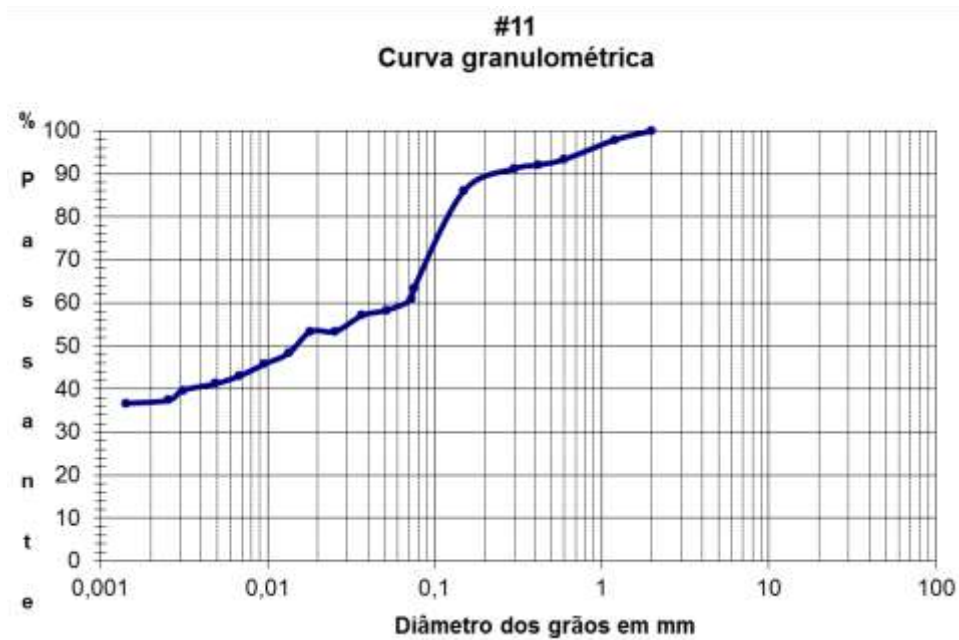


Figura B.14. Curva granulométrica amostra #11.

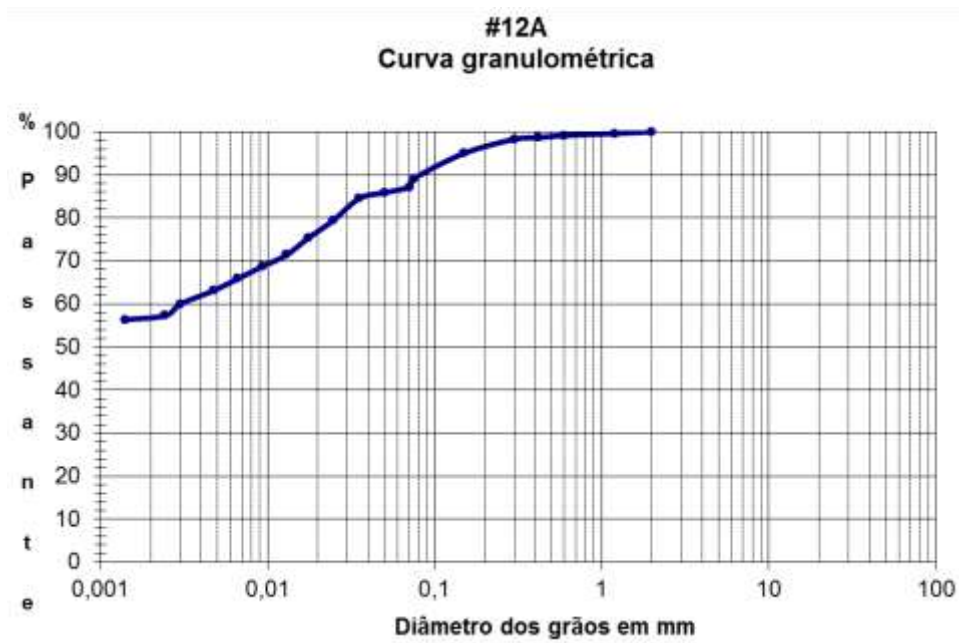


Figura B.15. Curva granulométrica amostra #12A.

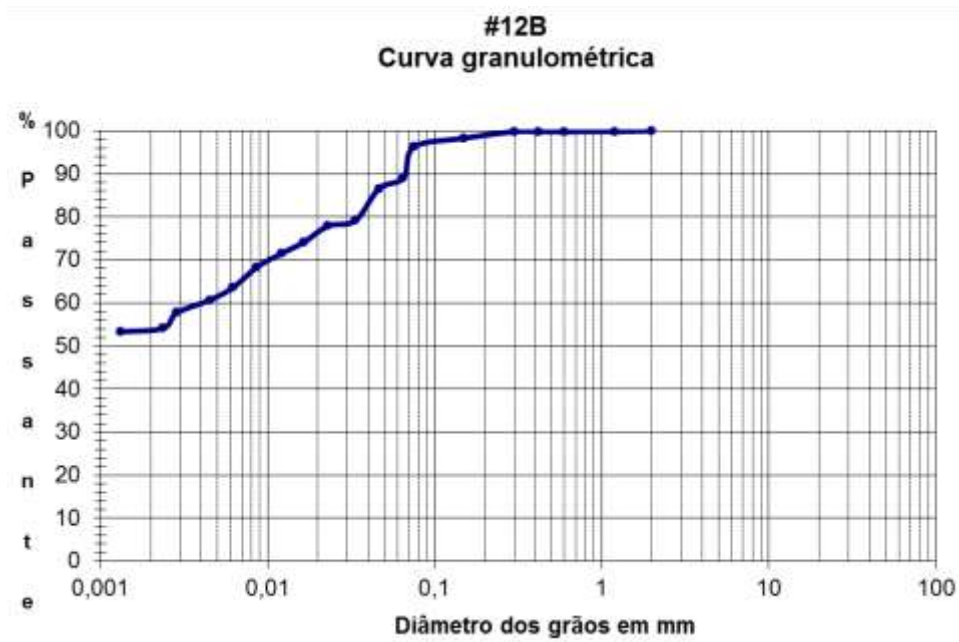


Figura B.16. Curva granulométrica amostra #12B.

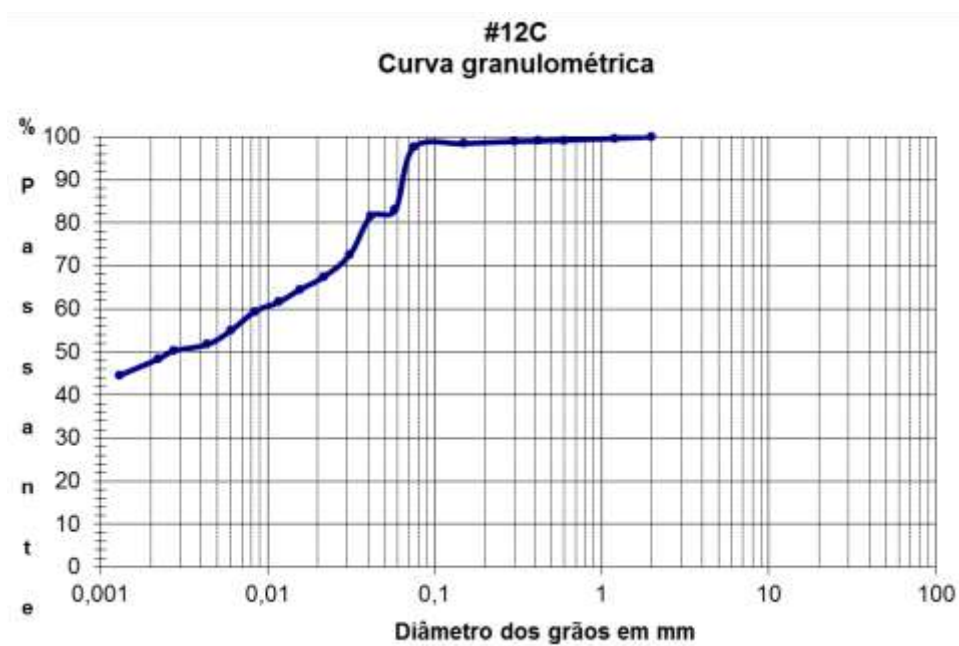


Figura B.17. Curva granulométrica amostra #12C.

APÊNDICE C - Difratomogramas de raios X - área marinha entre Rio Grande e Torres

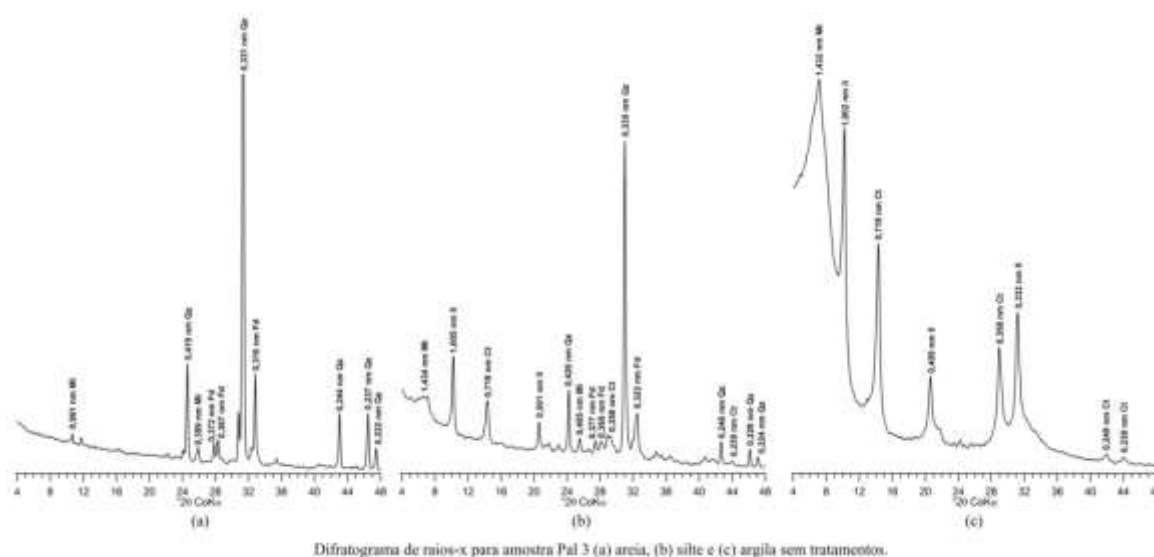


Figura C.1. Difrátograma de raios X para amostra Pal 3 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.

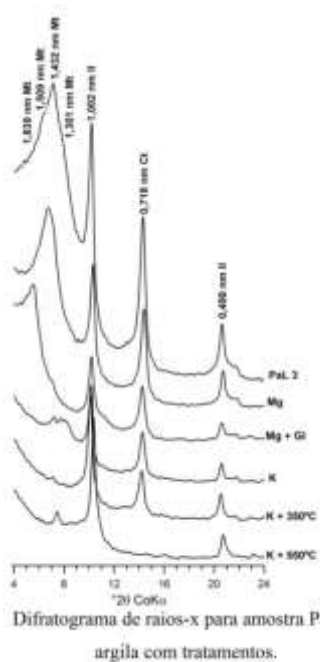


Figura C.2. Difrátograma de raios X para amostra Pal 3 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

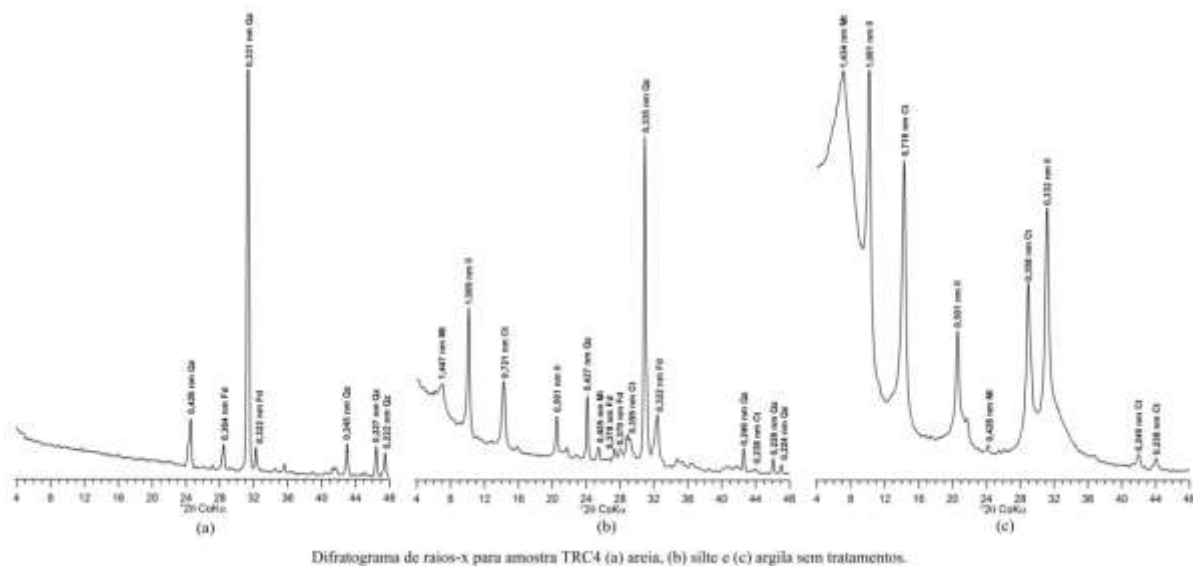


Figura C.5. Difratograma de raios X para amostra TRC4 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.

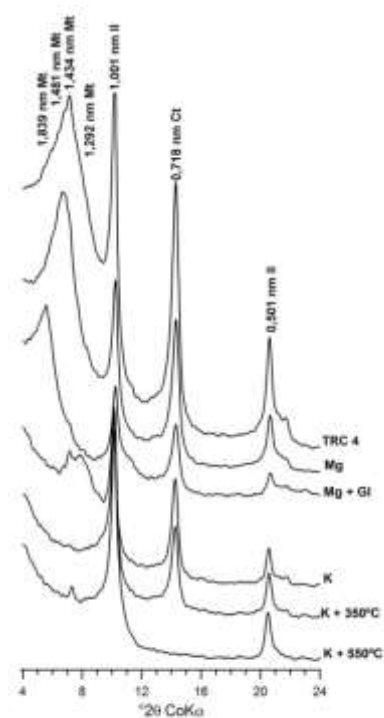


Figura C.6. Difratograma de raios X para amostra TRC4 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

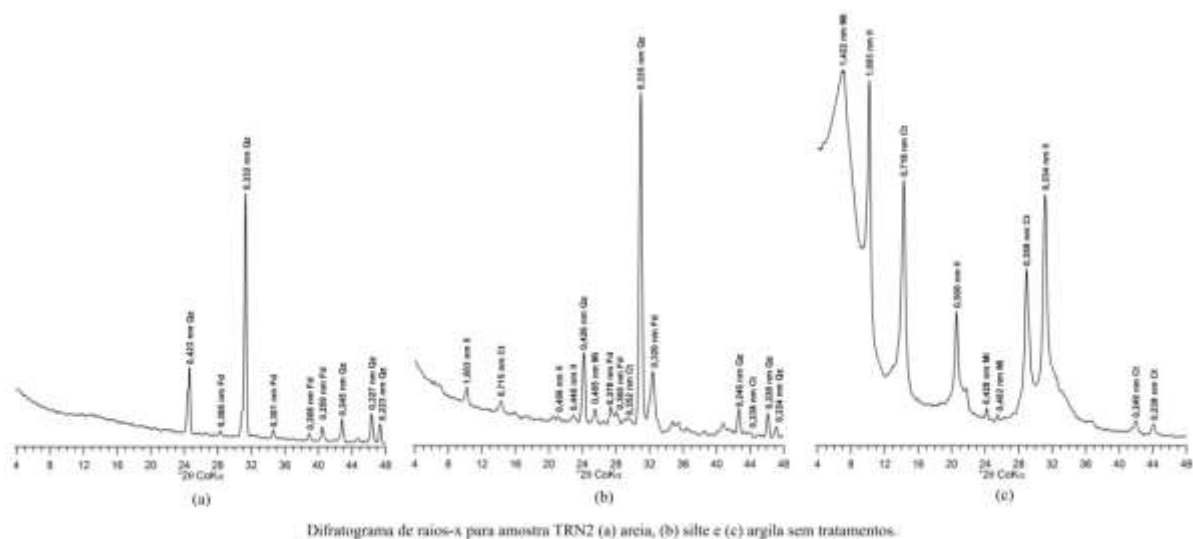


Figura C.9. Difratograma de raios X para amostra TRN2 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.

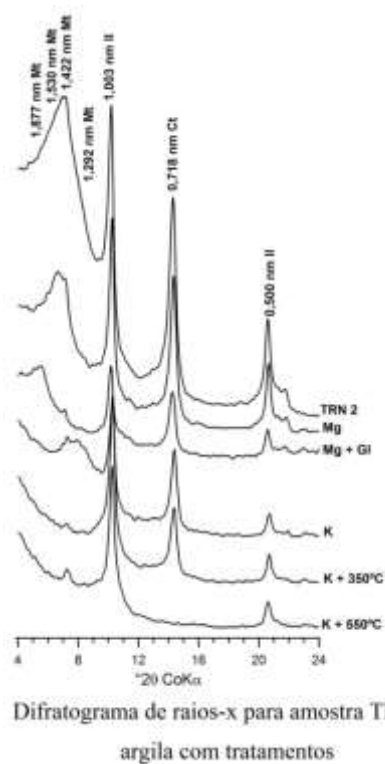


Figura C.10. Difratograma de raios X para amostra TRN2 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

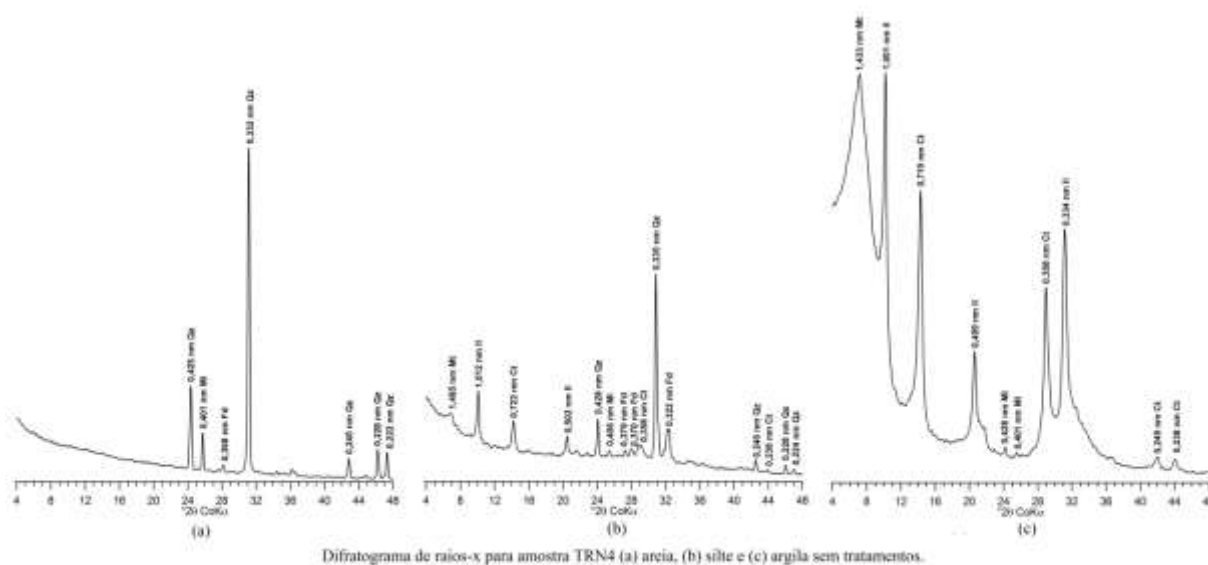


Figura C.11. Difratograma de raios X para amostra TRN4 (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.

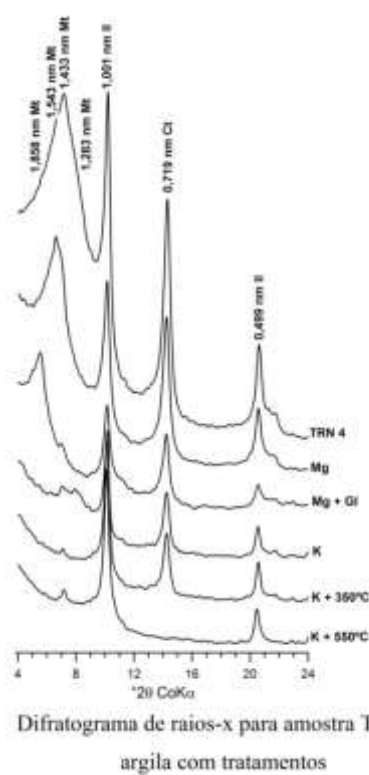


Figura C.12. Difratograma de raios X para amostra TRN4 - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

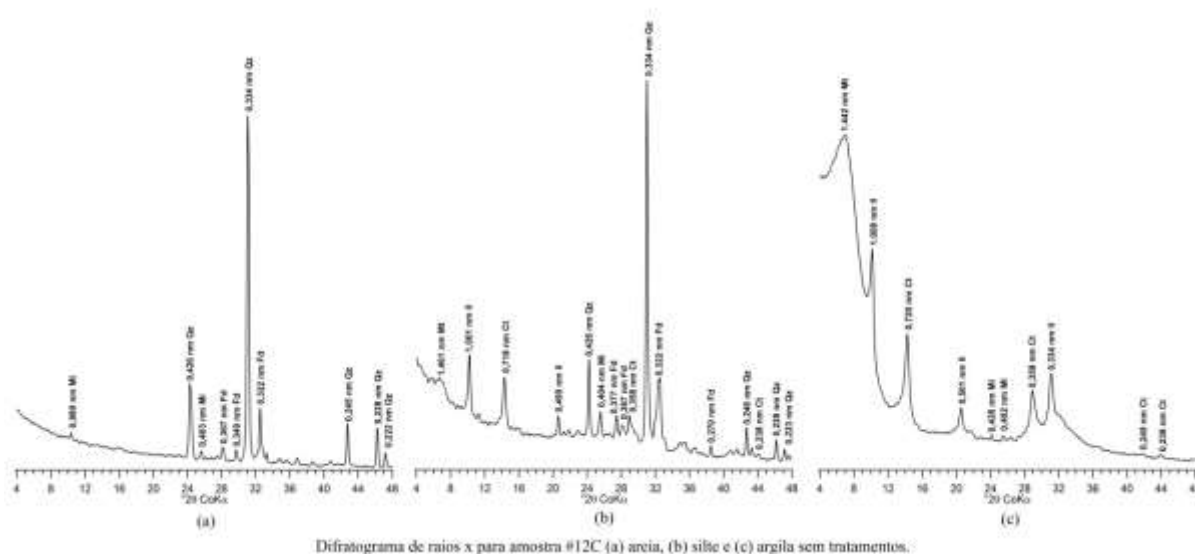
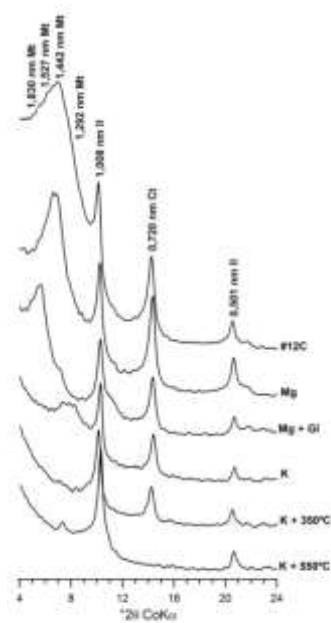


Figura D.3. Difratoograma de raios X para amostra #12C (a) areia, (b) silte e (c) argila sem tratamentos.



Difratoograma de raios x para amostra #12C - argila com tratamentos.

Figura D.4. Difratoograma de raios X para amostra #12C - argila com tratamentos (magnésio, magnésio e glicol, potássio, potássio aquecido à 350°C e potássio aquecido à 550°C).

APÊNDICE E - Curvas tensão versus índice de vazios - área marinha entre Rio Grande e Torres

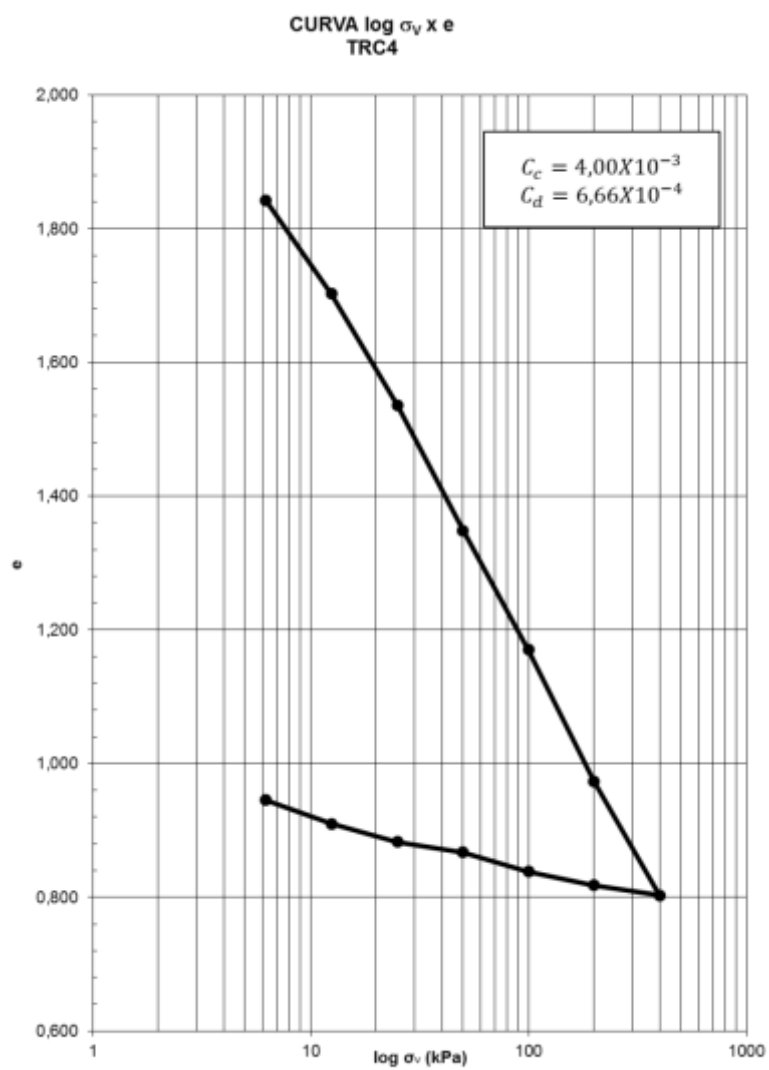


Figura E.1. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRC4.

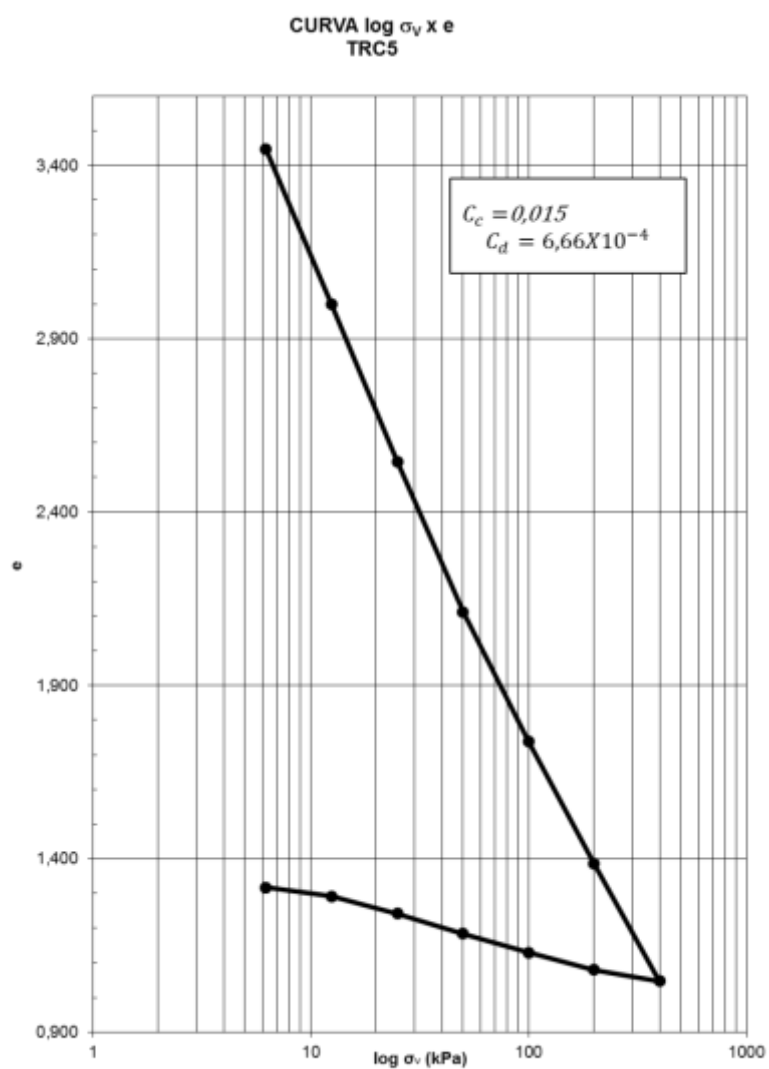


Figura E.2. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRC5.

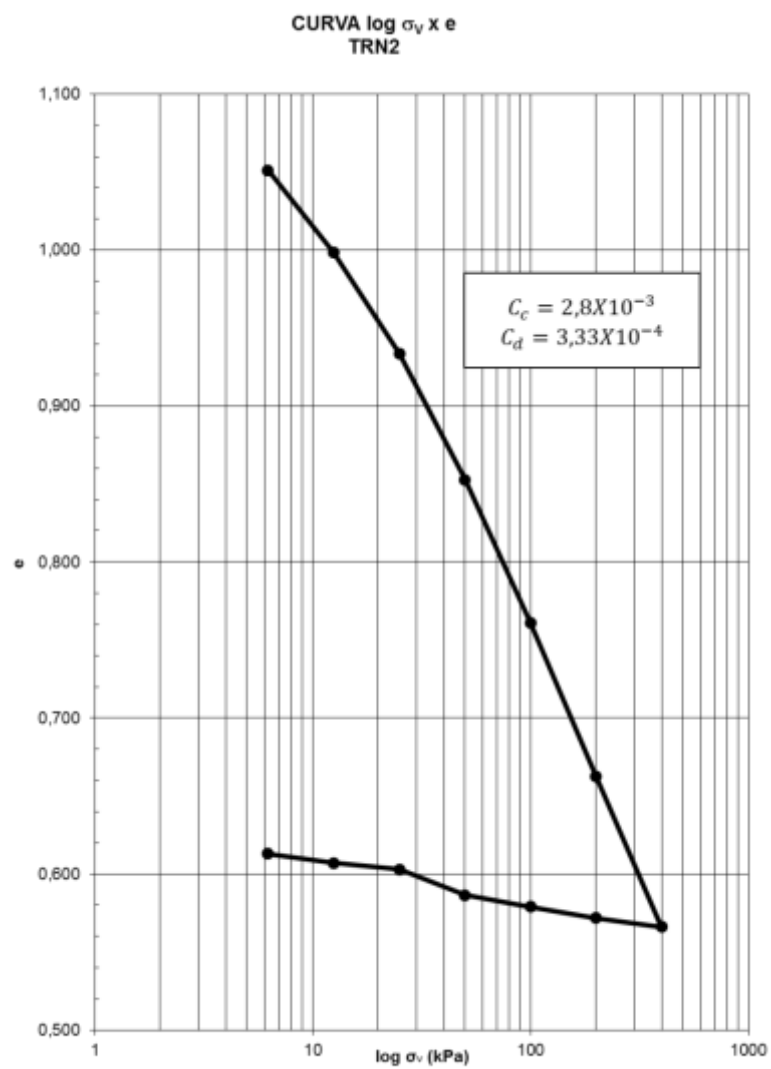


Figura E.3. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRN2.

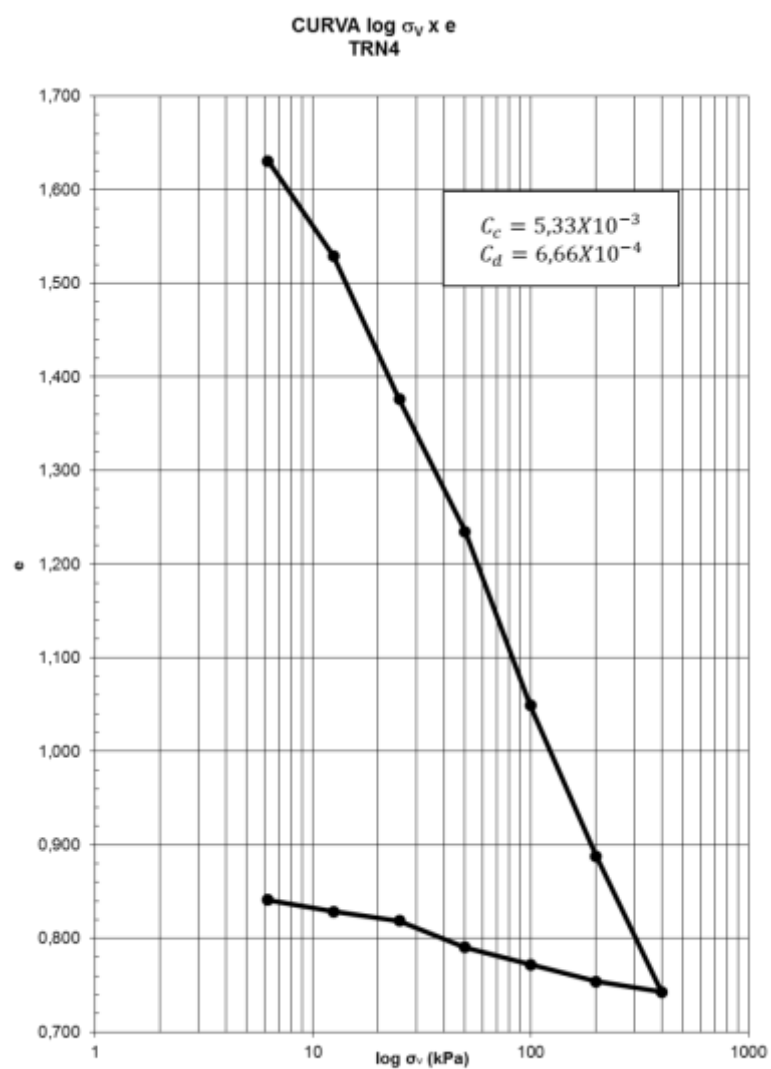


Figura E.4. Gráficos de Tensão (kPa) versus índice de vazios amostra TRN4.