



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO FUNDO LAGUNAR ENTRE RIO GRANDE E SÃO LOURENÇO DO SUL (RS)

Bruna Sá Britto Valério¹, Antônio Marcos de Lima Alves², José Antônio Scotti Fontoura³

¹ Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: brunasabritto@yahoo.com.br

² Universidade Federal do Rio Grande
Laboratório de Geotecnia e Concreto – EE
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
*e-mail: antonioalves@furg.br

³ Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Laboratório de Engenharia Costeira - EE
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
*e-mail: josefontoura@furg.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é descrever os resultados de uma campanha de investigações geotécnicas, com base em 19 amostras retiradas do leito da Lagoa dos Patos, entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS). Esta saída de camp, aconteceu em fevereiro de 2014, com o auxílio da lancha Larus (FURG), e foi uma parceria entre a FURG (Laboratório de Engenharia Costeira - LEC) e a UFRJ (Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos - LDSC). As amostras foram coletadas entre as curvas isobatimétricas de 2,50 a 14,40 metros de profundidade, através de amostrador de fundo do tipo "box corer". Os sedimentos foram submetidos a ensaios de caracterização básica (teor de umidade, em 19 amostras; moldagem de anel para obtenção de índices físicos, em 15 amostras; ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, em 19 amostras; peso específico real dos grãos, em 19 amostras; limites de Atterberg, em 18 amostras), e ensaios de palheta de laboratório (em 19 amostras). Com os resultados dos ensaios de caracterização básica, foi organizado um banco de dados bastante amplo, contendo parâmetros descritivos e de comportamento geomecânico dos solos presentes nos pontos amostrados. Este banco de dados pode ser útil no apoio em projetos de engenharia, bem como no subsídio a estudos sobre o transporte de sedimentos em regiões lagunares.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização das superfícies e subsuperfícies rasas de áreas submersas (rios, reservatórios, lagos, zonas costeiras e plataforma continental interna) são 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 relacionados à dragagem e 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 ensaios utilizados em zonas emersas muitas vezes têm de ser adaptados (ou mesmo descartados) para a investigação de áreas emersas.

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) 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, mesmo tais métodos geofísicos (geralmente acústicos, como o sonar de varredura lateral) precisam ser calibrados com dados reais do leito imerso, para serem confiáveis (Bulla e Hartmann, 2009).

Segundo Randolph et al. (2005), os ensaios de caracterização básica que devem ser realizados em laboratório, visando aplicações em geotecnia marinha e lagunar, são: teor de umidade, peso específico seco, peso específico real dos grãos, granulometria, limites de Atterberg e teor de carbonatos. Ensaios de caracterização mais sofisticados, como difração de raios-X e microscopia eletrônica, também podem ser empregados.

Com o intuito de coletar amostras e obter dados de: velocidade de corrente, batimetria, turbidez da água e densidade, para a caracterização do fundo lagunar em questão, uma saída de campo foi realizada. Com o auxílio da lancha Larus (FURG), foram coletadas 19 amostras superficiais de fundo lagunar, entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS). A coleta aconteceu através de uma parceria entre a FURG (Laboratório de Engenharia Costeira - LEC) e a UFRJ (Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos - LDSC), em fevereiro de 2014. As amostras foram coletadas através de amostrador de fundo do tipo "box corer", e foram armazenadas e posteriormente submetidas a ensaios de caracterização básica e ensaio de palheta no Laboratório de Geotecnia e Concreto - FURG.

2. LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo está compreendido entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS), no interior da Lagoa dos Patos. As amostras foram extraídas entre 2,50 e 14,40 metros de profundidade. Na Figura 1, encontram-se os locais onde foram obtidos os tubos amostrais.

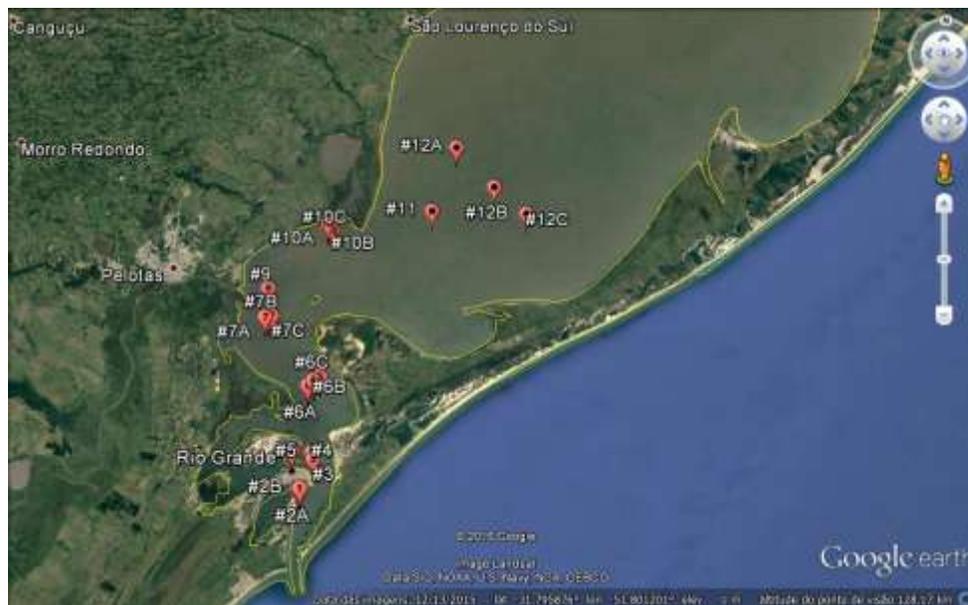


Figura 1. Localização dos pontos de amostragem entre as cidades de Rio Grande e São Lourenço do Sul (Fonte: Google Earth).

As coordenadas geográficas de cada ponto encontram-se expostas na Tab. 1.

Tabela 1. Coordenadas geográficas e profundidades de lâmina d'água nos pontos de amostragem (Rio Grande - São Lourenço do Sul).

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

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Amostragem

Nesta investigação geotécnica, todas as amostras foram coletadas com amostrador de fundo "box corer" (tipo 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. 2).



Figura 2. Amostrador de fundo "box corer", tipo Ekman.

A operação para extração das amostras foi feita a partir da lancha Larus (FURG), através 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 em todas as amostras) 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 era fechado com uma 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).



Figura 3. Subamostra do ponto #2b.

Os 19 tubos com as subamostras foram armazenados em câmara úmida, até o momento de abertura e realização dos ensaios no Laboratório de Geotecnia e Concreto - FURG.

3.2. Ensaios de laboratório

O primeiro ensaio realizado nas subamostras foi o ensaio de palheta de laboratório. Para tal, a subamostra era aberta, e a parte superior do tubo PVC era serrada, se necessário, para possibilitar o alcance do equipamento de palheta na superfície da amostra (Fig. 4). 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 4. Ensaio de palheta de laboratório na Subamostra #7c.

Após a realização do ensaio de palheta, as subamostras foram cuidadosamente extraídas dos tubos de PVC. Uma certa quantidade de material, localizado na profundidade 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-se que não ocorreu amolgamento da amostra).

Durante este processo, observou-se em algumas amostras a presença marcante de conchas, que poderiam interferir no resultado dos demais ensaios de caracterização. Assim, a fim de evitar a influência da presença de conchas nos ensaios subsequentes, as mesmas foram retiradas manualmente das amostras antes da realização dos ensaios de granulometria, peso específico real dos grãos e limites de Atterberg. Na Fig. 5 é mostrada a fotografia de uma amostra com presença de conchas.



Figura 5. Conchas presentes na Subamostra #12c.

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 do peso específico real dos grãos, 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).

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1. Composição granulométrica

A distribuição granulométrica dos sedimentos, composta pelos resultados dos ensaios de peneiramento e sedimentação, permitiram definir as frações percentuais de argila ($\phi \leq 0,002$ mm), silte ($0,002 < \phi \leq 0,06$ mm) e areia ($0,06 < \phi \leq 2,0$ mm) de uma determinada amostra (sendo ϕ o diâmetro do grão), conforme ABNT NBR 6502/1995. A Tab. 2 apresenta os valores obtidos para o conjunto de amostras em estudo.

Tabela 2. Percentuais de argila, silte e areia.

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

De uma forma geral, observa-se que as amostras coletadas mais ao sul (#2A, #2B, Bacia Porto Novo #3, #4 e T#05) tendem a apresentar uma maior quantidade de sedimentos finos, pois além do estuário o ambiente de deposição se apresenta com velocidade moderada, o que propicia a sedimentação da fração argilosa (Antiqueira & Calliari, 2005). As amostras coletadas em lâminas d'água mais espessas também tendem a apresentar maior quantidade de finos, uma tendência já observada por Calliari (1980).

4.2. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e umidade

A Tab. 3 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).

Tabela 3. Limites de Atterberg, índice de plasticidade e umidade da amostra.

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

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), de acordo com as exigências nas normas ABNT NBR 6459 (1984) e ABNT NBR 7180 (1984).

4.3. Índices físicos

A Tab. 4 mostra os resultados obtidos em medições do peso específico real dos grãos (γ_s), peso específico natural (γ_{nat}), peso específico natural seco (γ_d) e índice de vazios (e).

Tabela 4. Índices físicos.

Amostra	γ_s (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e
#2A	24,62	12,79	16,98	0,93
#2B	25,18	11,47	18,79	1,20
#6A	26,53	17,05	22,29	0,56
#6B	25,77	14,27	20,29	0,81
#6C	26,85	17,16	22,56	0,56
#7A	26,45	13,85	21,33	0,91
#7B	28,75	10,71	23,19	1,68
#7C	25,84	x	x	x
#9	24,96	15,84	20,46	0,58
#10A	26,07	x	x	x
#10B	26,28	15,14	22,65	0,74
#10C	25,73	16,47	22,18	0,56
#11	24,09	x	x	x
#12A	23,80	11,80	18,31	1,02
#12B	25,05	13,22	20,20	0,90
#12C	25,49	x	x	x
Bacia Porto Novo #3	25,18	12,53	17,49	1,01
Bacia Porto Novo #4	23,91	12,22	17,20	0,96
Bacia Porto Novo T#05	25,00	12,28	19,09	1,04

O índice de vazios (e) e o peso específico natural seco (γ_d) foram calculados a partir dos demais índices medidos (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 acentuada de conchas.

4.4. Resistência ao cisalhamento

Na Tab. 5 são mostrados os resultados do ensaio de palheta de laboratório, em termos da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) de cada amostra.

Tabela 5. Resistência ao cisalhamento.

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

5. SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Fig. 6 é mostrada a tradicional carta de plasticidade de Casagrande, relacionando os valores de limite de liquidez e índice de plasticidade das amostras em estudo.

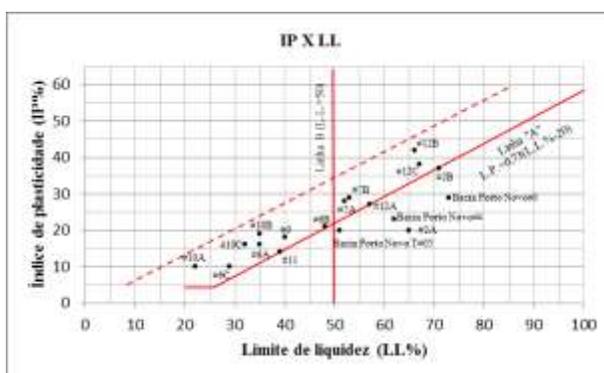


Figura 6. Carta de plasticidade de Casagrande.

Através da carta de plasticidade, é possível observar que grande parte das amostras está localizada acima da linha A, o que indica presença importante de argila. Entretanto, quatro amostras se situaram abaixo da linha A, que é um indicativo da presença de siltes ou argilas orgânicas. Oito pontos amostrais se situaram 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, sendo, portanto caracterizados como argilas de alta plasticidade.

Na Fig. 7 mostra-se a relação entre o índice de plasticidade (IP) e a porcentagem de argila de cada amostra.

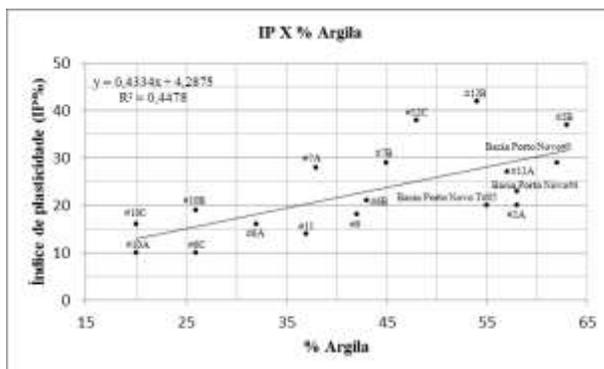


Figura 7. Índice de plasticidade versus % Argila.

Pode-se observar que quanto mais elevado o percentual da fração argilosa do sedimento maior será o índice de plasticidade.

Através dos gráficos das Figs. 8, 9 e 10, pode-se observar que a resistência ao cisalhamento (S_u) tende a decrescer com o aumento da umidade, com o aumento da porcentagem de argila, e com o aumento do índice de plasticidade da amostra. Além disso, porcentagens de argila, umidade e IP elevados estão diretamente conectados a sedimentos localizados à direita da linha B, na carta de plasticidade de Casagrande.



Figura 8. Resistência ao cisalhamento versus Umidade no ponto abaixo do vane.

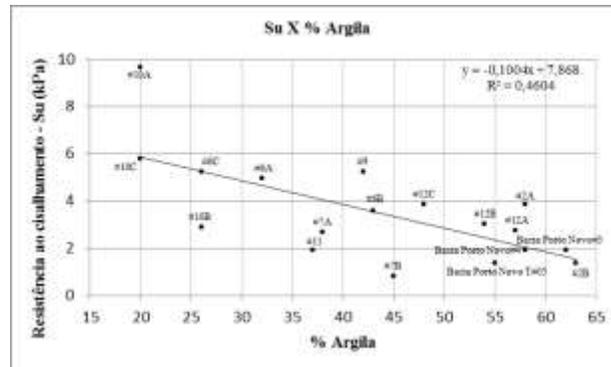


Figura 9. Resistência ao cisalhamento versus % Argila.

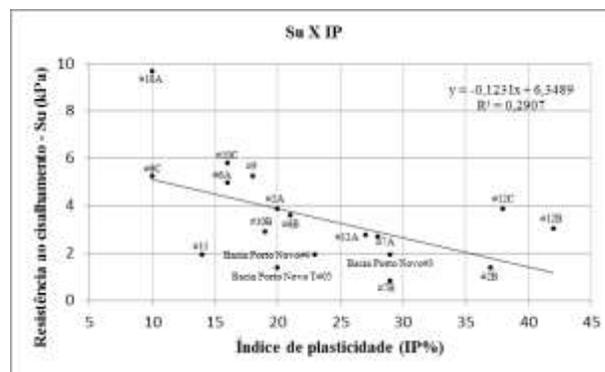


Figura 10. Resistência ao cisalhamento versus IP.

Observando ainda os gráficos das Figs. 8, 9 e 10, 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 S_u .

No gráfico da Fig. 11 são apresentados os resultados da relação entre S_u e o índice de atividade coloidal (Ia), razão entre o índice de plasticidade (IP) e o percentual de argila da amostra.

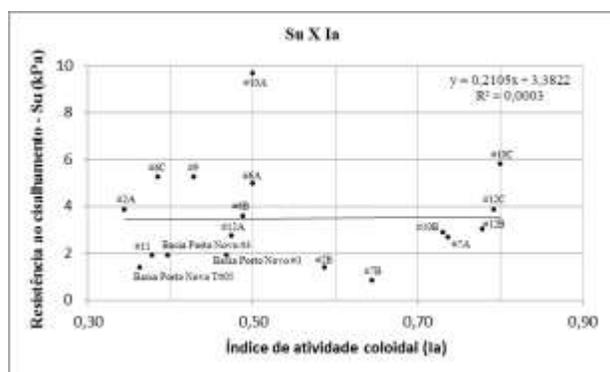


Figura 11. Resistência ao cisalhamento versus % Ia.

A maioria das amostras apresentou um índice de atividade coloidal inferior a 0,75, o que caracteriza solos inativos (indicativo de argila 1:1). Ainda, observa-se neste gráfico o ponto anômalo (#10A), já discutido anteriormente.

6. CONCLUSÃO

Na Figura 12 mostra-se o mapa geral para o fundo da Lagoa dos Patos proposto por Marroig (2015), bem como os pontos amostrais do presente estudo. O trabalho de Marroig (2015) utilizou os dados de hidrodinâmica, sísmica e granulometria obtidos nesta saída de campo para caracterizar o transporte de lama na Lagoa dos Patos, e para determinar a rugosidade de fundo, ela compilou as informações de granulometria de diversos mapas de distribuição granulométrica do fundo da Lagoa dos Patos, existentes na literatura. Observa-se uma boa concordância entre os resultados compilados por Marroig (2015) e os do presente estudo, o que pode ser atestado pelos dados mostrados na Tabela 2. Em geral, nota-se que as amostras coletadas mais ao Sul tendem a apresentar maiores percentuais de sedimentos finos (silte e argila). Também nota-se que as amostras mais próximas às margens da Lagoa tendem a apresentar textura mais arenosa, devido o elevado nível energético que provoca a retirada e a impossibilidade de deposição dos sedimentos finos (Antiqueira & Calliari, 2005).

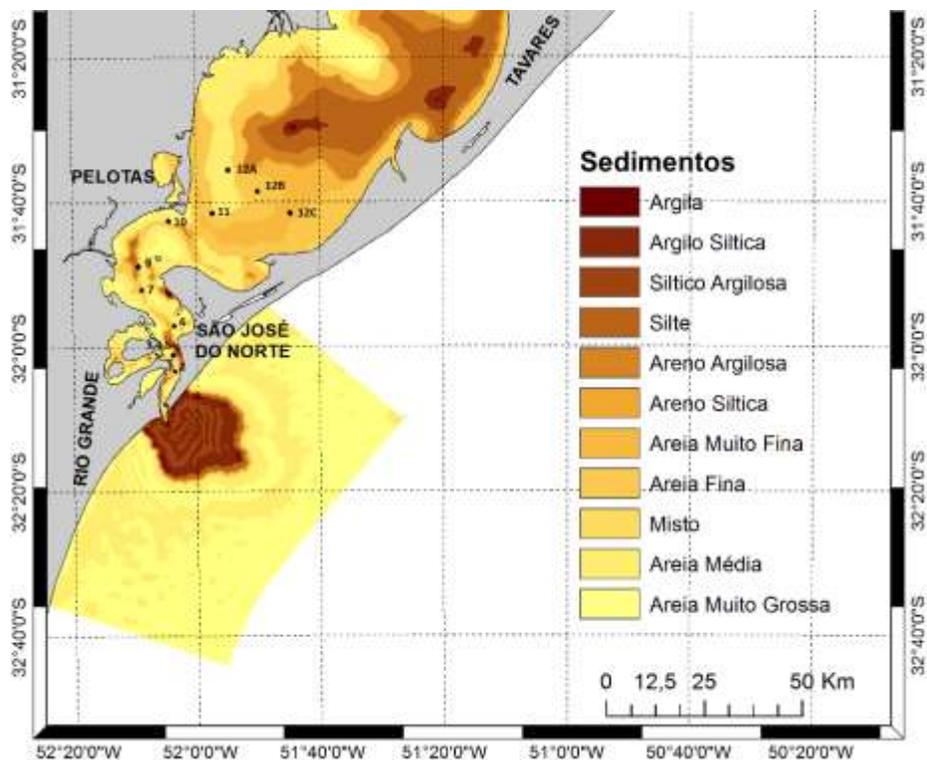


Figura 12. Mapa de distribuição granulométrica para a Lagoa dos Patos (Modificado de Marroig, 2015).

O banco de dados resultante do presente estudo acrescenta às tradicionais medidas de granulometria, resultados de caracterização geotécnica básica e medidas de resistência ao cisalhamento 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 lagunares superficiais.

7. AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro e ao prof. Cezar Bastos, do Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG, pela disponibilidade do espaço físico e instrumentos necessários à realização dos ensaios.

8. REFERÊNCIAS

- Antiqueira, J. A. F. & Calliari, L. J. (2005). Características Sedimentares da Desembocadura da Laguna dos Patos, *Gravel*, No. 3, p. 39-46.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). 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). Solo e Rochas, NBR 6502, Rio de Janeiro, 18 p.
- Bulla, L.A.S., 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*, Vol. 7, No. 1, p. 19-30.
- Calliari, L., et al. (1980). Características sedimentológicas e fatores ambientais da região estuarial da Lagoa dos Patos, *XXXI Congresso Brasileiro de Geologia*, Vol. 2, p. 862-875.
- Davis, A., Haynes, R., Bennell, J., Huws, D. (2002). Surficial Seabed Sediment Properties Derived from Seismic Profiler Responses, *Marine Geology*, Vol. 182, p. 209-223.
- Head, K.H. (1982). *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 2, Pentech Press, London, 454 p.
- Marroig, P.C. (2015). Transporte de Lama Fluida no Complexo Estuário de Rio Grande - RS, Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 137 p.
- Preston, J.M., Collins, W.T., Mosher, D.C., Poekert, R.H., Kuwahara, R.H. (1999). The Strength of Correlations between Geotechnical Variables and Acoustic Classifications, *OCEANS '99 MTS/IEEE Conference*, Seattle, Vol. 3, p. 1123-1128.
- Randolph, M.F., Cassidy, M., Gourvenec, S. (2005). Challenges of Offshore Geotechnical Engineering, *XVI International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Vol. 1, p. 123-176.
- 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.
- Weaver, P.P.E., Schultheiss, P.J. (1990). Current Methods for Obtaining, Logging and Splitting Marine Sediment Cores, *Marine Geophysical Researches*, Vol. 12, p. 85-100.

9. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Bruna Sá Britto Valério, Antônio Marcos de Lima Alves, José Antônio Scotti Fontoura são os únicos responsáveis pelo material apresentado neste artigo.