

# ARGILA SILTOSA PROFUNDA DE RIO GRANDE – ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Silty clay layer from Rio Grande, RS, Brazil - Analysis of the variation of geotechnical parameters

Cristina Lemos Goularte\*

Cezar Augusto Burkert Bastos\*\*

Cláudio Renato Rodrigues Dias\*\*\*

**RESUMO** – O setor portuário brasileiro tem noticiado vultosos investimentos em obras para os anos vindouros, como em adequações e construção de novas estruturas de atracação, em instalações para movimentação de cargas, em estruturas de armazenagem e na implantação de estaleiros e de outras indústrias. O Superporto de Rio Grande, segundo maior porto marítimo do Brasil, vem experimentando esta nova realidade, com a implantação do Pólo Naval de Rio Grande. Neste contexto, o artigo vem contribuir com projetos geotécnicos apresentando uma compilação de parâmetros do solo da camada de argila siltosa profunda do Superporto de Rio Grande. Os parâmetros têm sua variação analisada ao longo da extensão do canal do Superporto e também ao longo da profundidade. Uma análise estatística foi realizada com base em modelos de regressão múltipla, relacionando cada parâmetro geotécnico com a localização e profundidade da amostra. Este estudo procura contribuir no entendimento do comportamento geotécnico deste solo, imprescindível na fase dos anteprojetos e programação de investigações geotécnicas na região.

**SYNOPSIS** – The Brazilian port sector has reported huge investments in the works for years to come, namely in the adaptation and construction of new berthing facilities, in facilities for cargo handling, in storage structures and in the deployment of yards and other industries. The *Superporto de Rio Grande*, the second largest seaport of Brazil, has been experiencing this new reality, with the deployment of the *Pólo Naval of Rio Grande*. This article presents a compilation of geotechnical parameters of the deep silty clay soil layer of Rio Grande, analyzing their variation with depth along the channel of the *Superporto*. A statistical analysis was performed based on multiple regression models, relating each geotechnical parameter with the location and depth of the sample. This study seeks to contribute to the understanding of the geotechnical behavior of this soil, indispensable to the stage of preliminary planning and scheduling of geotechnical investigations in the region.

**PALAVRAS CHAVE** – Argila siltosa, Superporto de Rio Grande, parâmetros geotécnicos.

---

\* Professora Assistente, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande.

E-mail: cristinagoularte@furg.br

\*\* Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande.

E-mail: cezarbastos@furg.br

\*\*\* Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande.

E-mail: claudiodias@furg.br

## **1 – INTRODUÇÃO**

A retomada em investimentos de infraestrutura do Brasil, ocorrida na última década, tem demandado um maior número de estudos e programas de investigação geotécnica. O setor portuário é um dos quais são noticiados vultosos investimentos em obras para os anos vindouros, como em adequações e construção de novas estruturas de atracação, em instalações para movimentação de cargas, em estruturas de armazenagem e na implantação de estaleiros e de outras indústrias.

O Superporto de Rio Grande, segundo maior porto marítimo do Brasil e único situado no Rio Grande do Sul, vem experimentando esta nova realidade, com a implantação do Pólo Naval de Rio Grande, com a ampliação da capacidade de atracação de vários terminais (com o projetado aumento de calado) e com a implantação de novas indústrias. As obras citadas exigem fundações muito profundas e/ou estruturas de contenção que têm como condicionante de projeto as propriedades geotécnicas referentes à resistência ao cisalhamento e à compressibilidade de uma espessa camada de argila siltosa profunda existente ao longo da região portuária.

Na época de implantação do Superporto e seus terminais, nas décadas de 70 e 80, o solo desta camada foi amplamente investigado e suas propriedades geotécnicas estudadas por ensaios de laboratório, como relatado em Dias (2001). Nos anos 2000, com a supracitada retomada dos investimentos na região, campanhas de investigação possibilitaram obtenção de novos dados sobre o solo em questão. São exemplos as obras do Estaleiro Rio Grande e da ampliação dos Molhes da Barra.

Este artigo apresenta uma compilação de parâmetros geotécnicos do solo da camada de argila siltosa, analisando a variação destes ao longo do canal do Superporto, da chamada Ponte dos Franceses aos Molhes da Barra, e ao longo da profundidade. Dentre os parâmetros investigados tem-se: teor de argila, teor de umidade natural, limites de Atterberg, índice de vazios, índice de compressão e resistência não drenada. Uma análise estatística é realizada com base em modelos de regressão múltipla, relacionando cada parâmetro geotécnico com a localização e profundidade da amostra.

Os dados geotécnicos utilizados foram considerados válidos e representativos nos estudos de origem, portanto discussões sobre a qualidade dos ensaios e das amostras obtidas para tais não fazem parte do escopo deste trabalho.

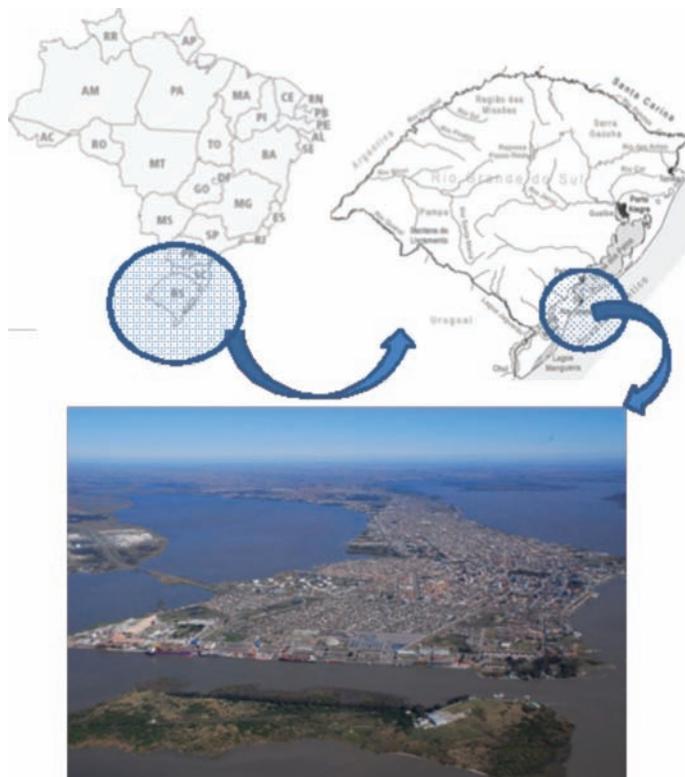
## **2 – ÁREA DE ESTUDO E MATERIAIS - GEOLOGIA E GEOTECNIA DE RIO GRANDE**

A cidade de Rio Grande situa-se na foz da Laguna dos Patos, na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. A Laguna dos Patos liga-se ao Oceano Atlântico pelo Canal do Norte, tendo como finalização os Molhes da Barra do Rio Grande, dois “braços” de pedra que penetram 4 km no mar e possibilitam a fixação da barra e o acesso dos navios ao complexo portuário.

A zona urbana da cidade do Rio Grande está localizada em uma península que se desenvolve na direção leste-oeste, sendo seus limites fixados a leste pelo Porto Novo, junto ao Canal de Rio Grande, pelo Porto Velho ao Norte, pelo Saco da Mangueira ao sul e pelos bairros Parque São Pedro e Parque Marinha a oeste (Fig. 1).

O complexo portuário da cidade de Rio Grande, denominado de Superporto de Rio Grande, situa-se ao longo do bordo oeste do canal de desembocadura da Laguna dos Patos no Oceano Atlântico, possuindo 12 km de extensão, desde a ponte dos Franceses sobre o Saco da Mangueira até a raiz do molhe oeste da Barra do Rio Grande, no sentido norte-sul (Fig. 2).

A formação geológica da região, segundo Dias e Bastos (1994), apresenta para a cidade de Rio Grande um subsolo composto por camadas de sedimentos marinhos e lagunares, em um pacote com até 52 m de espessura, descrito como um empacotamento de materiais justapostos em diversas



**Fig. 1** – Localização de Rio Grande/RS (Google Earth, novembro de 2011).



**Fig. 2** – Vista geral do Superporto de Rio Grande.

camadas (areia e argila) depositados em ambiente transicional altamente influenciado pela maré e pelas correntes de maré enchente e vazante. A camada basal deste pacote sedimentar ocorre a partir dos 42 m de profundidade, com a presença de uma camada de areia fina a grossa muito compacta, seguida de estratos de argila silto-arenosa e argila siltosa dura até 63,5 m, profundidade máxima investigada na região (Dias e Bastos, 1997).

Segundo Dias *et al.* (2010) e Dias e Bastos (2015), para análise da estratigrafia da região é extremamente importante considerar as curvas de variações relativas do nível do mar ocorridas na costa brasileira, com grande relevância quando da passagem do Pleistoceno ao Holoceno, representada por uma elevação em nível de aproximadamente 5 m, sendo designada na região de Rio Grande como Transgressão Quinta. Este evento transgressivo é identificado por uma falésia com cerca de 2 m de altura, atualmente interiorizada a 20 km da linha de praia (Godolphin, 1976). Tal falésia constitui o contato entre os terrenos pleistocênicos marinhos e os terrenos holocênicos marinhos e lagunares.

Na década de 70 tiveram início os primeiros estudos em profundidade do solo argiloso no Superporto da cidade de Rio Grande. Os primeiros dados são apresentados em Dias (1979), sendo de estudos destinados ao conhecimento do subsolo para implantação de terminais e indústrias.

Os autores supracitados descrevem desde então o perfil do subsolo do Superporto, destacando uma camada de argila siltosa depositada no Holoceno em ambiente flúvio-lagunar e de baías, presente acima dos 40 m de profundidade, com espessura variável entre 10 e 22 m. Esta argila siltosa é tida como normalmente a levemente pré-adensada, apresentando junto à camada basal um brusco enriquecimento em matéria orgânica. Sobre a camada de argila encontram-se sedimentos de areia fina pouco argilosa com cerca de 10 m de espessura e um manto superficial de areia siltosa, com espessuras até 15 m, dependendo do local, identificadas morfologicamente como pequenas dunas, com cotas entre +4,0 m e +1,5 m em relação ao nível médio do mar atual.

### 3 – MÉTODO DE PESQUISA

O trabalho foi iniciado com um extensivo levantamento de dados de ensaios geotécnicos de laboratório, obtidos para o solo argiloso profundo do Superporto de Rio Grande. Foram pesquisados relatórios, laudos, dissertações e artigos publicados, destacando-se os trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Há que salientar o acréscimo de dados da obra do Estaleiro Rio Grande (Dias *et al.*, 2008) e da ampliação dos Molhes da Barra (Pedreira *et al.*, 2008 e Rabassa, 2010), fruto de programas experimentais que envolveram ensaios de campo e ensaios de laboratório.

No mesmo levantamento de dados foram reunidos perfis de sondagem na área do Superporto de Rio Grande. Estes relatórios estão datados desde a década de 70 até os dias de hoje e serviram como base para análise e aperfeiçoamento do perfil estratigráfico da região em estudo, apresentado anteriormente por Dias *et al.* (2010). O documento mais antigo pesquisado foi um perfil estratigráfico datado de 1971. Já o mais antigo relatório de sondagem geotécnica que integra a pesquisa é do ano de 1975, para a obra de construção do Terminal de Trigo e Soja. Nesta etapa também contribuíram o grande acervo de sondagens e a idealização de um perfil geotécnico típico para a área da obra do Estaleiro Rio Grande, iniciada em 2007 (Dias *et al.*, 2008).

Os principais sítios investigados ao longo do Superporto de Rio Grande são assinalados na Fig. 3, sendo eles: Terminais de Derivados de Petróleo (TERIG); Terminais de Fertilizantes (TREVO); Estaleiro Rio Grande (DIQUE); Terminal de Trigo e Soja (TTS); Terminal de Containers (TECON) e Molhes da Barra.

Na análise espacial dos parâmetros inventariados ao longo do Superporto (localização) e da profundidade, foram utilizados tão somente aqueles associados à camada de argila siltosa profunda. Esta camada possui início em cota variando de - 22 a - 28 m (em relação ao nível do mar) e espessura variando de 10 a 22 m ao longo do perfil longitudinal estudado, sendo identificada sítio a sítio de acordo com a estratigrafia expressa nas sondagens.

A análise estatística dos dados (estatística descritiva básica e regressão múltipla) foi realizada com o emprego dos *softwares* *Statistica* e *Microsoft Office Excel*, buscando analisar a



Fig. 3 – Principais sítios investigados ao longo do Superporto de Rio Grande (Google Earth, 2012).

representatividade da localização e da profundidade na variação dos parâmetros. Detalhes sobre os procedimentos empregados no inventário e análise dos dados são apresentados em Goularte (2012).

#### 4 – RESULTADOS

Os dados obtidos ao longo do canal do Superporto foram reunidos na forma de um perfil longitudinal, sendo analisados os parâmetros da camada de argila siltosa em diversas profundidades e em diversos pontos localizados ao longo da margem deste canal na direção norte-sul (da Ponte dos Franceses em direção aos Molhes da Barra). Foram compilados e analisados estatisticamente dados referentes aos seguintes parâmetros: percentual de argila, teor de umidade natural ( $w_{nat}$ ), limite de liquidez ( $w_L$ ), índice de plasticidade (IP), índice de vazios ( $e_0$ ), índice de compressão ( $C_c$ ), razão de pré-adensamento (OCR) e a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ).

Os dados das sondagens inventariados permitiram refinar e retificar o perfil anteriormente traçado para a região de estudo por Dias *et al.* (2010). Esse novo perfil longitudinal, ilustrando o subsolo ao longo do Superporto de Rio Grande, é apresentado na Fig. 4. Neste perfil é indicada a presença da camada de argila siltosa cujas propriedades geotécnicas são determinantes nos projetos de fundações de várias obras nos terminais e nas demais estruturas desta região portuária. Sobreposta a esta camada, ocorrem pacotes arenosos espessos e outros estratos argilosos intercalados com lentes arenosas. Já abaixo desta encontra-se um pacote arenoso compacto, com características que remetem a sedimentação de origem continental.

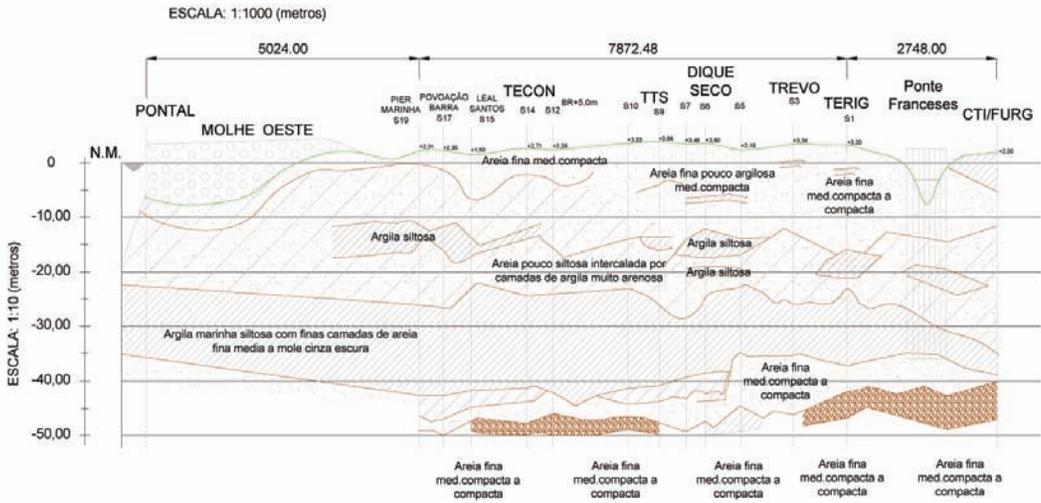


Fig. 4 – Perfil longitudinal ao longo do Superporto de Rio Grande.

A partir dos dados inventariados, para os sítios estudados, foram criados gráficos para a análise de parâmetros na camada de argila siltosa profunda. Os dados que apresentaram variações significativas são apresentados nas figuras 5 a 16. Nos gráficos as variáveis localização e profundidade são analisadas de maneira independente. A análise de todos parâmetros com as variáveis localização e profundidade é apresentada em Goularte (2012).

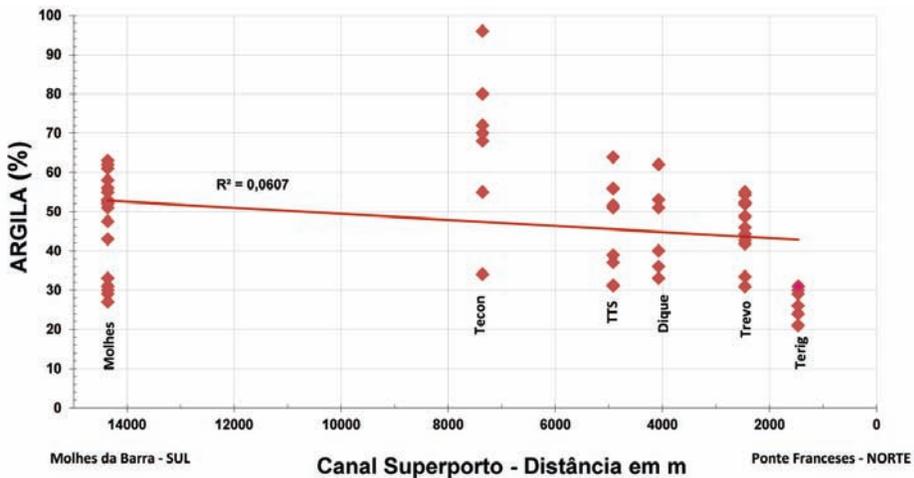


Fig. 5 – Teor de argila vs. localização.

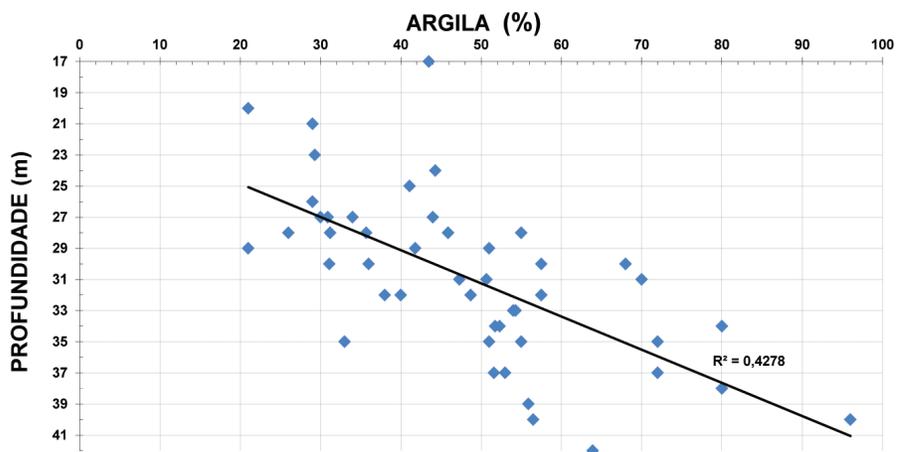


Fig. 6 – Teor de argila vs. profundidade.

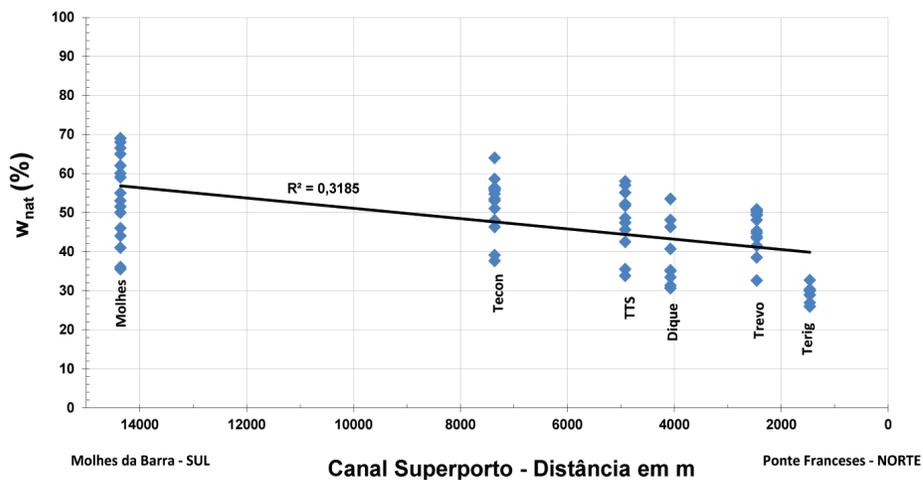


Fig. 7 – Teor de umidade natural vs. localização.

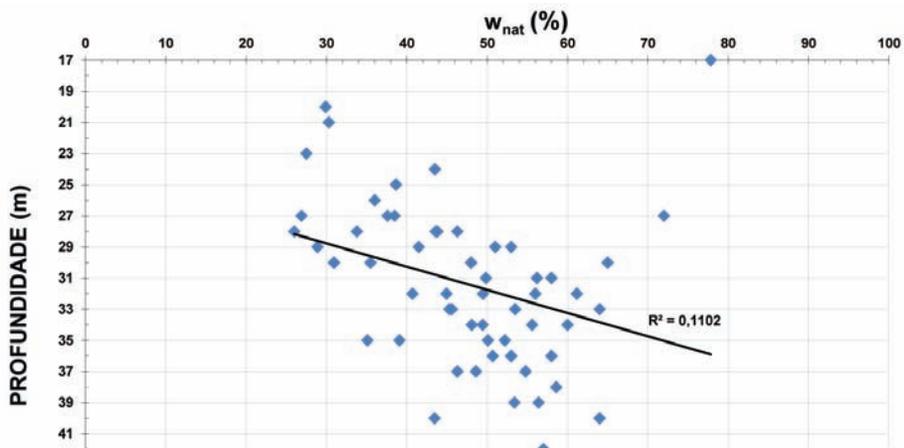


Fig. 8 – Teor de umidade natural vs. profundidade.

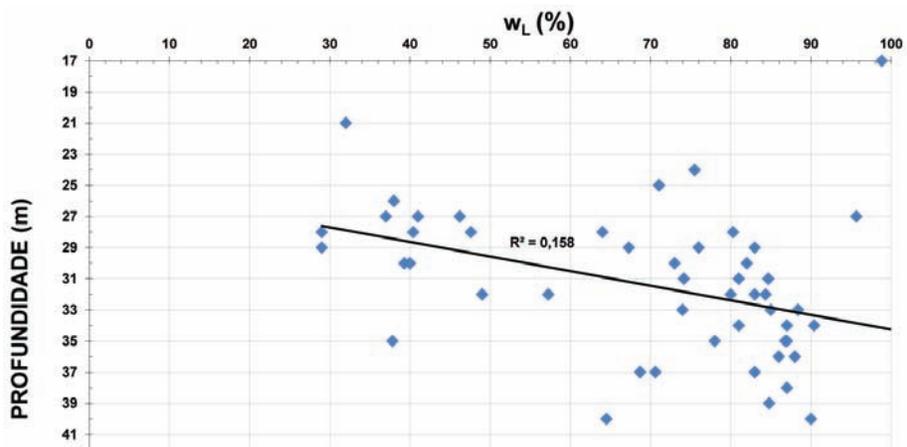


Fig. 9 – Limite de liquidez vs. profundidade.

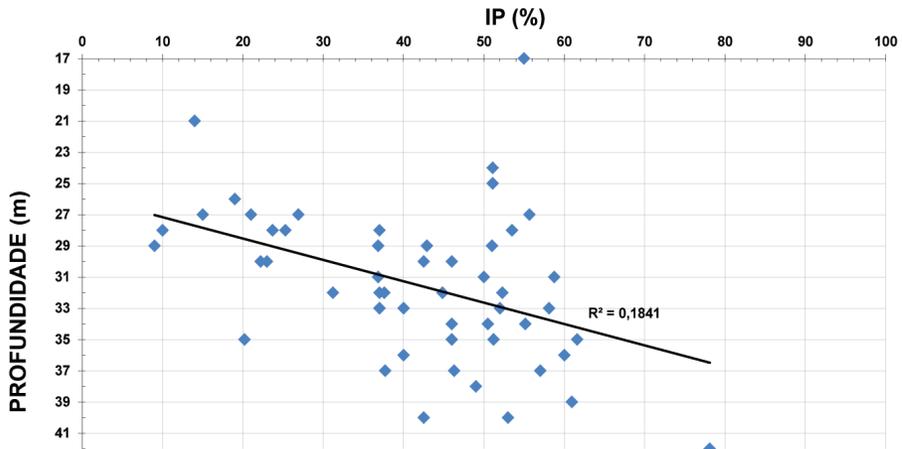


Fig. 10 – Índice de plasticidade vs. profundidade.

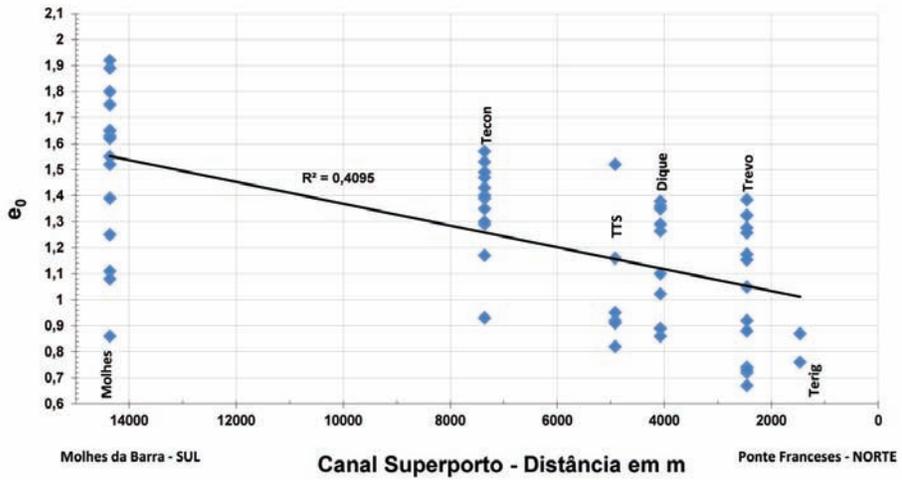
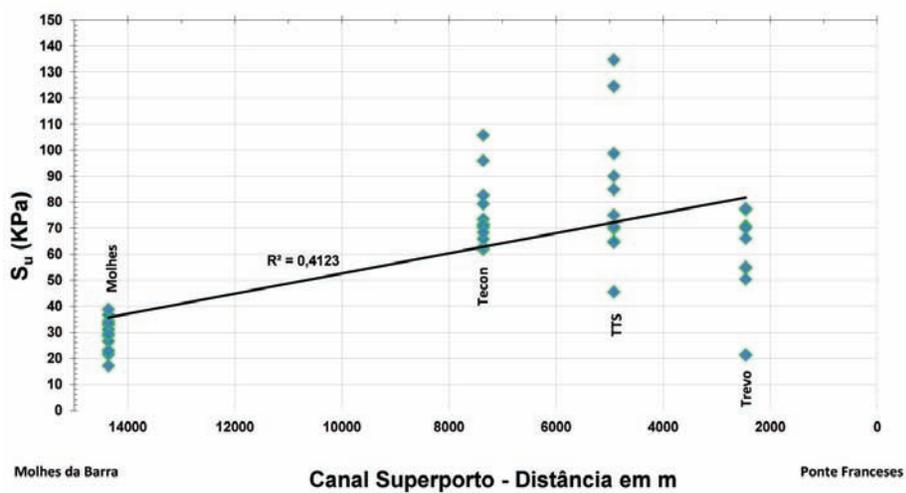
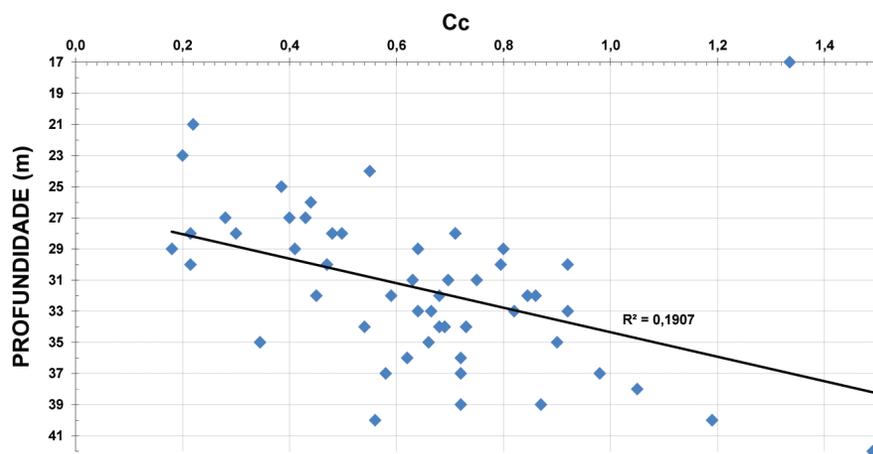


Fig. 11 – Índice de vazios vs. localização.



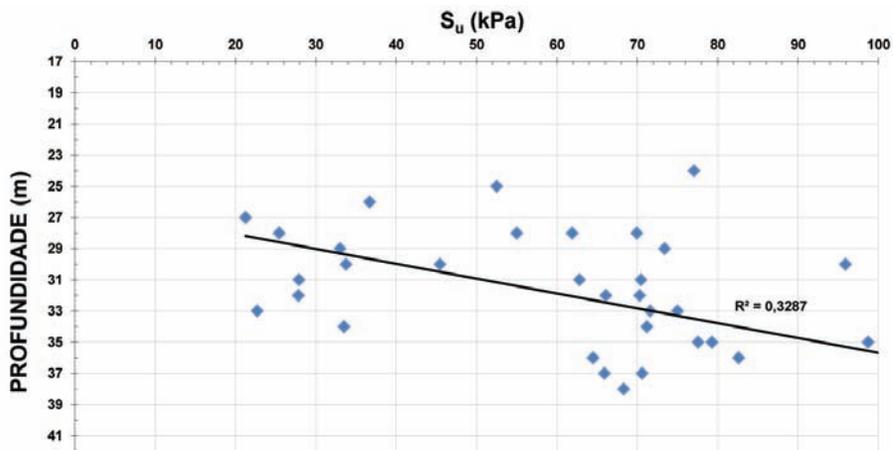


Fig. 14 – Resistência não drenada vs. profundidade.

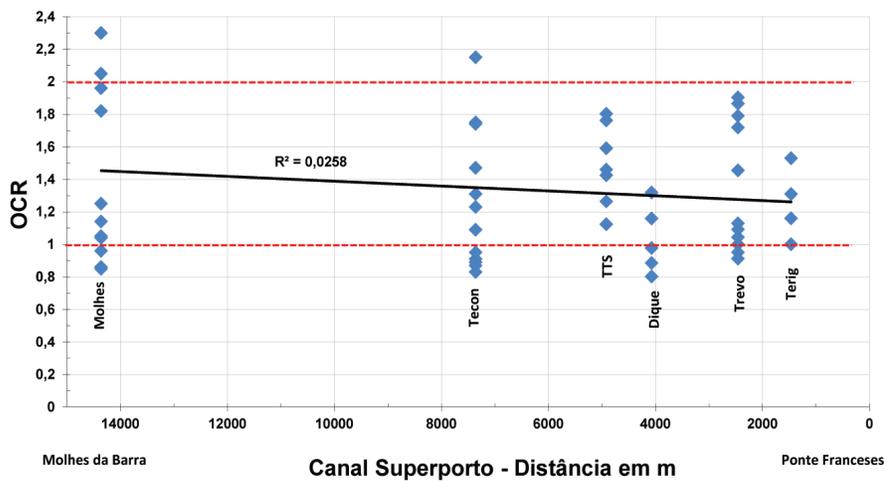


Fig. 15 – OCR vs. localização.

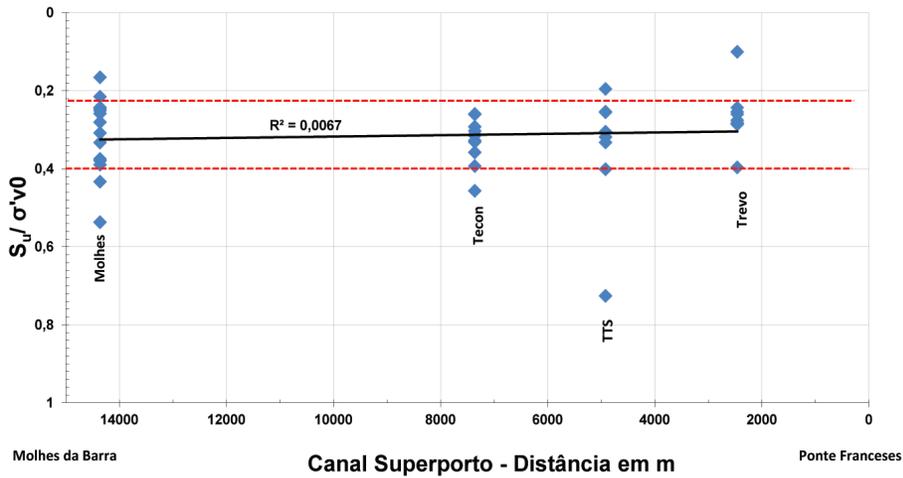


Fig. 16 – Razão de resistência vs. localização.

O Quadro 1 apresenta uma síntese da análise estatística da variação com a localização e profundidade dos parâmetros geotécnicos avaliados. A análise de significância foi associada a um índice (p-nível) de 6%. Se o índice for inferior a 6%, considerou-se que a variável tem significativa influência no parâmetro analisado. O valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), apresentado no quadro, indica a correlação do parâmetro simultaneamente às variáveis localização e profundidade (Goularte, 2012).

Quadro 1 – Variação dos parâmetros com a localização e a profundidade ao longo do Superporto.

Parâmetros	Varição estatisticamente significativa com a localização	Varição estatisticamente significativa com a profundidade	$R^2$ Modelo de regressão múltipla
Teor de argila	SIM	SIM	44,13%
$w_{nat}$	SIM	SIM	24,02%
$w_L$	NÃO	SIM	12,40%
IP	NÃO	SIM	15,25%
$e_0$	SIM	NÃO	30,53%
Cc	NÃO	SIM	22,06%
OCR	NÃO	NÃO	-
$S_u$	SIM	SIM	26,55%

## 5 – DISCUSSÕES

Pode-se observar que os parâmetros que apresentaram sua variação explicada pela profundidade e localização foram o teor de argila, teor de umidade natural e resistência ao cisalhamento não drenada. O teor de argila teve seu melhor ajuste para o modelo de regressão múltipla, com melhor coeficiente de determinação, indicando maior correlação simultânea com a localização e profundidade na camada. Pode-se comprovar, com base estatística, que o solo da camada profunda torna-se mais argiloso à medida que se aproxima da costa e se aprofunda na camada (Figs. 5 e 6). Cabe destacar que a mudança textural para a camada de areia basal se dá de forma abrupta e não resulta em acréscimo de areia na camada de argila siltosa. O teor de umidade natural demonstra a mesma tendência que o teor de argila, aumentando à medida que se aproxima da costa e se aprofunda na camada (Figs. 7 e 8).

Quanto aos parâmetros de plasticidade, definidos pelos limites de Atterberg, conclui-se por um aumento da plasticidade do solo ao longo da profundidade na camada de argila siltosa profunda (Figs. 9 e 10).

Em relação ao índice de vazios, pode-se afirmar tão somente que ocorre um aumento na porosidade dos solos à medida que a camada se aproxima da costa. Há de se destacar que este parâmetro foi o único a apresentar esta tendência de relação significativa somente com a localização (Fig. 11).

Observa-se a tendência de acréscimo no índice de compressão tanto em direção aos Molhes da Barra como em profundidade, apesar de somente esta última variável mostrar significância estatística. A relação existente do índice de compressão com o teor de argila poderia explicar este comportamento (Fig. 12).

Uma tendência de acréscimo na resistência ao cisalhamento não drenada com a profundidade foi observada. Apesar da dispersão dos resultados de  $S_u$ , com base na análise estatística, é possível afirmar que o solo mostra maior resistência ao cisalhamento não drenada à medida que se aproxima da costa e se aprofunda na camada (Figs. 13 e 14).

Apesar de não mostrar relação significativa com as variáveis espaciais analisadas, o estudo mostrou que 74,5% dos resultados de OCR encontram-se entre 1 e 2, indicando que, de maneira geral, a argila siltosa profunda do Superporto de Rio Grande pode ser caracterizada como normalmente adensada a levemente pré-adensada, corroborando com conclusões de outros estudos (Fig. 15).

Analisando a normalização dos resultados de  $S_u$  em função da tensão efetiva *in situ* (razão de resistência), observa-se que 81,4% dos resultados encontram-se na faixa de razão de resistência de 0,23 a 0,40 (Fig. 16), correspondendo a valores de OCR entre 1 e 2, segundo equação 1.

$$S_u/\sigma'_{v0} = (0,23 \pm 0,04).OCR^{0,8} \quad (1)$$

$S_u/\sigma'_{v0}$  – resistência não drenada normalizada;  
OCR – razão de pré-adensamento.

Dias e Bastos (2015) abordam o uso dos ensaios de piezocone e a datação de amostras pelo Carbono 14 para definir a estratigrafia do solo do local Dique. No que se refere à resistência ao cisalhamento não drenada, os autores usaram a formulação sugerida por Kulhawy e Maine (1990) para definir  $S_u$  e comparam valores de OCR estimados a partir de dados de piezocone com os resultados de ensaios de laboratório em amostras retiradas de várias profundidades (Figura 17). Destaca-se a concordância entre os dados de campo e laboratório na camada de argila abaixo da cota -25 m.

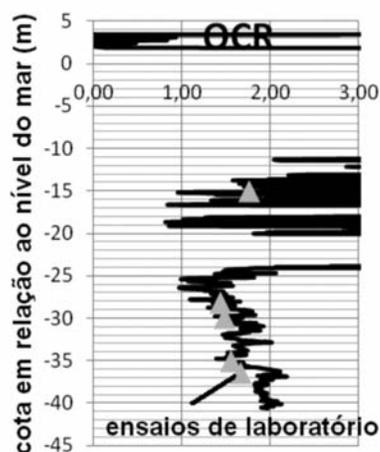


Fig. 17 – Perfil de OCR do ensaio CPTu 17a (Dias e Bastos, 2015).

Em particular no local Molhes, as amostras pertencem a um perfil dentro do mar, com 10 m de coluna d'água, sob tensão efetiva da ordem de 90 a 100 kPa. Um valor de  $S_u$  mínimo de 17 kPa para o local confere  $S_u/\sigma'_{vo}$  igual a 0,19, compatível com solos normalmente adensados (Mesri, 1975).

Logo, os dados de resistência ao cisalhamento corroboram que a argila siltosa profunda do Superporto de Rio Grande pode ser tratada como um solo de comportamento normalmente adensado a levemente pré-adensado.

Em relação à análise estatística, pode-se observar que, dos oito parâmetros analisados, apenas quatro mostraram variação explicada pela localização ao longo do canal. Já a profundidade explica a variação de seis destes. Somente três parâmetros têm sua variação explicada por ambas variáveis.

## 6 – CONCLUSÕES

O estudo conduzido busca contribuir no entendimento do comportamento geotécnico do solo argiloso presente no subsolo do Superporto de Rio Grande, imprescindível na fase dos anteprojetos e programação de investigações geotécnicas, assim como na comparação com as propriedades de solos de outros estratos argilosos ao longo da costa brasileira.

Os resultados da análise estatística, com base em modelos de regressão múltipla, mostram que importantes parâmetros geotécnicos têm variação explicada pela localização ao longo do Superporto, assim como pela profundidade dentro da camada de argila siltosa profunda. O teor de argila, o teor de umidade natural e a plasticidade tendem a crescer com a profundidade. A mesma tendência é apresentada pelo índice de compressão e resistência não drenada. Já o teor de argila, o teor de umidade, o índice de vazios e a resistência não drenada mostram acréscimo em direção aos Molhes da Barra.

O inventário de dados também confirma os estudos anteriores, que pontualmente caracterizam a argila siltosa profunda da região do Superporto de Rio Grande como normalmente adensada a levemente pré-adensada.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dias, C.R.R. (1979). *Comportamento de estacas de fundação dos silos do terminal de Trigo e Soja do Superporto de Rio Grande*. Solos e Rochas, São Paulo, v.2, n.2, pp. 27-37.
- Dias, C.R.R. (2001). *Os parâmetros geotécnicos e a influência dos eventos geológicos – argilas moles de Rio Grande/RS*. Anais do Encontro Propriedades de Argilas Moles Brasileiras, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, pp. 29-49.
- Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B. (1994). *Propriedades geotécnicas da argila siltosa marinha de Rio Grande/RS: uma interpretação a luz da história geológica recente da região*. Anais do X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 1994, Foz do Iguaçu/PR, Rio de Janeiro: ABMS, v.2, pp. 555-562.
- Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B. (1997). *Argila siltosa marinha de Rio Grande/RS – Análise dos dados geotécnicos aplicados às obras portuárias*. Anais do VI Congresso Brasileiro da ABEQUA, Curitiba: ABEQUA, pp. 53-57.
- Dias, C.R.R.; Bastos, E. (2015). *Datação de sedimentos costeiros e uso do piezocone para definir estratigrafia*. Revista Geotecnia, Lisboa, Portugal, nº.134, pp. 61-86.
- Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B.; Pedreira, C.L.S.; Schuler, A.R.; Schmitt, L.A. (2008). *Caracterização do subsolo do Superporto de Rio Grande a partir de novas investigações geotécnicas para obras portuárias*. IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, SPG, Coimbra, Vol. 1, pp. 375-382.
- Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B.; Pedreira, C.L.S. (2010). *Variações no comportamento geotécnico da camada argilosa profunda ao longo do Porto de Rio Grande: Influência da energia durante o processo sedimentar*. Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado. Porto Alegre:ABMS (CD-ROM).
- Godolphin, M.F. (1976). *Geologia do Holoceno costeiro do município de Rio Grande*. Porto Alegre, Dissertação de Mestrado, UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 146p.
- Goularte, C.L. (2012). *Inventário e análise dos parâmetros geotécnicos da argila siltosa profunda da região portuária de Rio Grande*. Rio Grande, Dissertação de Mestrado, FURG – Universidade Federal do Rio Grande, 171p.
- Kulhawy, F.H.; Mayne, P.W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto. 306p. Disponível em [www.epri.com](http://www.epri.com).
- Mesri, G. (1975). *New Design Procedure for Stability of Soft Clays*. Discussion, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101, GT4: pp. 409-412.
- Pedreira, C.L.S.; Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B.; Fagundes, D.F.; Schnaid, F. (2008). *Argilas moles de Rio Grande: Estudo de sítios de investigação*. Anais do IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Coimbra. SPG/ABMS: Coimbra-PT, pp. 303-310.
- Rabassa, C.M. (2010). *Monitoramento Geotécnico da obra de ampliação dos molhes do Rio Grande, Brasil*. Porto Alegre, Dissertação de Mestrado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 103p.