

ENSAIOS DE PIEZOCONE COMO FERRAMENTA PARA INTERPRETAR A ESTRATIGRAFIA DOS SEDIMENTOS QUATERNÁRIOS NA COSTA SUL BRASILEIRA.

EVERALDO DE BASTOS¹, CLÁUDIO RENATO RODRIGUES DIAS²

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a utilidade do ensaio de piezocone como uma importante ferramenta para definir a estratigrafia de camada dos sedimentos do quaternário, contribuindo na descrição dos padrões de flutuação do nível do mar na Costa Sul do Rio Grande do Sul. Para isso, foram relacionados os resultados de datação radiométrica do isótopo C¹⁴(obtidas por Espectrometria de Massa com Aceleradores- AMS), realizadas em amostras do perfil litológico da região do Superporto de Rio Grande/RS (de -15 a -42 m), com as propriedades geotécnicas obtidas por ensaios de prospecção (SPT e CPTu) e correlações, e que foram influenciadas pela história de tensões durante os eventos de rebaixamento e subidas do nível do mar durante os últimos 18.000 anos. Com esses dados, foi proposto um modelo evolutivo do sítio de deposição que contribui na descrição da estratigrafia das camadas sedimentadas desde a última grande transgressão (Transgressão Flandriana, 18.000 anos A.P.), nesta região específica.

PALAVRAS-CHAVES: ESTRATIGRAFIA. PIEZOCONE. SEDIMENTOS.

PIEZOCONE TESTS AS A TOOL TO INTERPRET THE STRATIGRAPHY OF THE QUATERNARY SEDIMENTS IN THE SOUTHERN BRAZILIAN COAST.

ABSTRACT

The aim of this work is demonstrate the usefulness of the piezocone test as an important tool to define the stratigraphy layer of quaternary sediments, contributing in describing patterns of fluctuating sea levels in the South Coast of Rio Grande do Sul. Thus, were related the results of radiometric dating of the isotope C¹⁴ (obtained by Accelerator Mass Spectrometry- AMS) measurements in samples from lithologic profile of the Superporto of Rio Grande/RS (-15 to -42 m) region with the geotechnical properties obtained prospecting for tests (SPT and CPTu) and correlations, and were influenced by the history of tensions during the events of lowering and rising sea level over the last 18,000 years. With these data, we propose an evolutionary of the deposition site model contributing to the description of the stratigraphy of the sedimented layers since the last major transgression (Flandrian Transgression 18,000 years BP), in this specific region.

KEYWORDS: PIEZOCONE. SEDIMENTS. STRATIGRAPHY.

1. INTRODUÇÃO

Os projetos geotécnicos de qualquer natureza, especialmente os localizados em regiões costeiras, exigem a definição satisfatória da litologia do subsolo e uma estimativa realista das propriedades geomecânicas dos materiais envolvidos. Estas informações são

obtidas principalmente por meio de ensaios geotécnicos de campo. Os testes mais usados são *Standard Penetration Test* (SPT), o *Cone Penetration Test* (CPT) e CPTu ou Piezocone (CPT com transdutores de pressão, capazes de medir a poro-pressão durante o ensaio). Os ensaios de cone e piezocone vêm se caracterizando internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica. Resultados de ensaios podem ser utilizados para determinação de perfis de solos, propriedades dos materiais prospectados (particularmente em depósitos de argilas moles), e previsão da capacidade de carga de fundações [30]. O ensaio de piezocone é o que melhor retrata a litologia das camadas de solo, tornando possível detectar de forma mais precisa, a diferença no comportamento de areias e argilas. No piezocone, as informações qualitativas do CPT são adicionadas às medidas de poro-pressões geradas durante o processo de cravação do cone. As medidas contínuas de resistência ao longo da profundidade, associadas à extrema sensibilidade observada na monitoração das poro-pressões, possibilitam a identificação precisa de camadas de solos, podendo-se por exemplo detectar camadas drenantes delgadas de poucos centímetros de espessura. Diferentemente dos ensaios tipo SPT com medida do número de golpes para penetrar um amostrador padrão, em que é possível a coleta de amostras para classificação do solo em laboratório, o piezocone mede somente tensões. No entanto, os dados obtidos permitem a classificação do solo e a definição de parâmetros por seu comportamento no ensaio, através de métodos e correlações empíricas, apresentados por diversos autores [17,28,29,31].

Alguns autores apresentam resultados e discutem ensaios de piezocone realizados em solo sedimentar da planície costeira [6,7], mostrando individualização clara e as características das transições entre as camadas litológicas em detalhes utilizando a Carta de Classificação de Robertson [29], para interpretar os sedimentos litorâneos do Período Geológico Quaternário (Pleistoceno e Holoceno). O perfil é característico de amplas áreas do litoral brasileiro, onde a formação do perfil litológico (ou estratigráfico, se utilizar datações) está intimamente ligada à história geológica de deposição e às variações do nível médio do mar (NMM) ocorridas durante este período geológico [1]. Os autores revelaram que as transições entre os diferentes pacotes de materiais inconsolidados, representam superfícies de discordâncias e a identificação a partir de ensaios de perfilagem pontuais requer a interpretação da história geológica da área estudada.

Nas superfícies de transição das camadas estudadas, no sítio do Superporto do Rio Grande, verifica-se contraste marcante entre os pacotes sedimentares silto-argilosos e os arenosos, tanto em sondagens SPT como em ensaios CPT. No entanto, frequentemente, ocorrem intercalações centimétricas a decimétricas de materiais com diferentes composições, onde o caráter descontínuo das amostras SPT não permitem interpretações detalhadas do perfil. Com isso os ensaios de piezocone se destacam, pois retrata elevado

nível de sensibilidade na identificação de camadas com tais dimensões, marcadas nos três principais sensores da ponteira cônica (qt, fs, u).

Estes dados são importantes no estudo da estratigrafia dos solos costeiros à luz da geologia regional, e principalmente a partir dos estudos de variação do nível do mar no quaternário [25]. A alta aplicabilidade dos ensaios de piezocone, uma ferramenta de Engenharia Geotécnica, para definir a Estratigrafia das Camadas, quando integrada com outras técnicas correntes como as utilizadas nos estudos de paleoambientes, como dados da palinologia, bem como com estudos de combinação dos ensaios de piezocone com a datação pelo carbono (C^{14}) com o fim de obter as idades das camadas sedimentadas já foi apresentada numa tese de doutorado [6].

No presente trabalho foram feitas datações radiométricas do isótopo C^{14} através da Espectrometria de Massa com Acelerador de Partícula (AMS) de seis amostras de sedimentos, de diferentes profundidades (-15 a -42 m), e discutidos resultados de ensaios de piezocone feitos na mesma região do Superporto de Rio Grande/RS, no dique-seco do Estaleiro Rio Grande ($32^{\circ} 5'S 52^{\circ} 6' W$) de onde as amostras foram obtidas. Desta forma, propõe-se um modelo para explicar a formação das diversas camadas de solo durante os últimos eventos de variações do NMM ocorridas de aproximadamente 18.000 A.P. até hoje, nesta região, avaliando o comportamento de alguns parâmetros geotécnicos que interessam aos projetos de obras costeiras, notadamente aqueles que são influenciados pela história de tensões, e que interessam ao estudo das deformações, principalmente aos recalques de fundações ou de aterros.

2. SÍTIO DO SUPERPORTO DO RIO GRANDE

2.1 Descrição do Local

As amostras de sedimentos obtidas nas sondagens foram datadas e os ensaios de piezocone executados na região do Superporto da cidade de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, na Planície Costeira Sul do Brasil ($32^{\circ}5'S 52^{\circ}6'W$), conforme a FIGURA 1.

Os ensaios CPTu foram realizados como ferramenta e suporte para o projeto de um dique seco, pertencente ao Estaleiro Rio Grande (ERG), situado no Superporto, à margem oeste do Canal do Norte (FIGURA 1). Neste trabalho foi utilizado um perfil (CPTu 17a), de um total de 23, que foram realizados para comparar com as datações, tendo o objetivo de definir a estratigrafia das camadas de solo no local do empreendimento e avaliar a história geológica do sítio

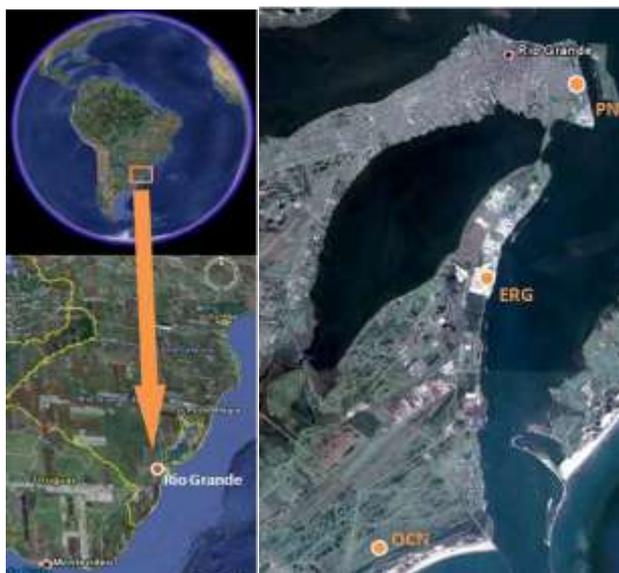


Figura 1: Sítio Estudo ERG

2.2 Geologia do Sítio

Na área de estudo, em Rio Grande, a progradação da Barreira IV [33] se fez através da construção de sete distintos feixes de cordões litorâneos [19]. Os sedimentos acumulados na depressão e nos terraços lagunares são arenosos a areno-siltico-argilosos, muitas vezes ricos em matéria orgânica. Esses depósitos mapeados no Rio Grande como Formação Quinta, são correlacionáveis com os produzidos pela Transgressão Santos ou Última Transgressão [23], nos demais setores da costa. A transgressão do nível do mar no período do Holoceno deslocou a linha de costa por vários quilômetros da posição atual para o interior. Esse fato pode ser notado pela exposição de uma restinga pleistocênica interiorizada cerca de 20 km, fazendo separação entre terrenos pleistocênicos e holocênicos.

Durante os últimos 6.000 anos A.P. até hoje, a linha de costa tem, em média, regredido, com a deposição de um corpo de areias litorâneas. Ao tempo desta regressão o nível do mar tem variado levemente e cada pequena oscilação construiu um depósito de cristas arenosas. As cristas isoladas coalesceram formando uma superfície sulcada. A partir disso, sete séries de feixes de restinga puderam ser identificadas e correspondem aos depósitos das pequenas flutuações do nível do mar que ocorreram durante esse tempo. Os depósitos holocênicos foram analisados em termos de seus ambientes deposicionais e de suas feições geomorfológicas, permitindo que se estabelecessem critérios utilizados para diferenciar as sequências. A morfologia da área em estudo permitiu à Godolphim [19] sugerir uma morfo-estratigrafia do Holoceno para a área de Rio Grande tomando por critério a

ocorrência dos feixes de restinga e a sua correlação com as possíveis oscilações do nível do mar durante essa idade, proposta pela teoria de Fairbridge [18] que sugeriu um comportamento dinâmico e cíclico para o nível do mar. Os feixes de restinga tendem a ser construídos progressivamente na regressão do mar. Concluiu-se que a costa do município de Rio Grande pode ser classificada como costa de emersão

2.3 Variações do Nível do Mar

As descrições morfológicas e sedimentológicas apresentadas evidenciam a grande influência que as variações do nível do mar exerceram sobre a construção e evolução da Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. Foi possível identificar sete oscilações do nível do mar nessa área, durante os últimos 6.000 anos, no Período Quaternário (mais especificamente durante o Holoceno). No conjunto, essas oscilações fazem parte de uma regressão que pode ser confirmada pelas curvas de Fairbridge apud [19], de Corrêa [5] na FIGURA 2, e de Suguio e Tessler [32] na FIGURA 3.

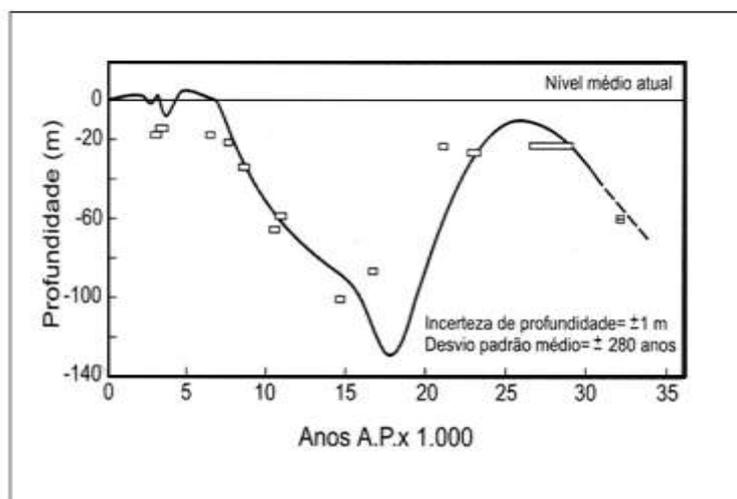


Figura 2: Curva de variações do NMM desde cerca de 30.000 anos A.P. até hoje, segundo dados obtidos na plataforma continental e na planície costeira do Rio Grande do Sul [5].

As flutuações do NMM resultam de variações reais do nível marinho (eustasia) e das modificações dos níveis dos continentes (tectonismo e isostasia) são resultantes de fenômenos gerais (alteração eustática) e locais (alteração não eustática). Portanto, o NMM em um determinado ponto da costa é a resultante momentânea de interações complexas entre a superfície do oceano e do continente. Durante o Período Quaternário houveram variações eustáticas reconstruídas através de várias evidências dessas flutuações, que devem ser reconhecidas no tempo e no espaço. Para se definir a posição de um testemunho

no espaço é necessário conhecer a sua altitude atual em relação á original, isto é, conhecer a sua posição em relação ao nível do mar na época de sua formação ou sedimentação. Para se definir a sua posição no tempo é necessário conhecer a época de sua formação ou sedimentação, utilizando-se para isso de métodos de datação. Se for possível estabelecer um grande número de antigas posições do nível relativo do mar, cobrindo satisfatoriamente um determinado intervalo de tempo, será possível assim construir uma curva de variação para este período. Primeiramente deve-se reconhecer no campo um depósito ou um evento (litologia), depois se tenta atribuir-lhe uma idade (geocronologia, geralmente por datação radiométrica) e então correlacionar ou comparar o testemunho com outros registros locais, regionais ou mundiais (correlação).

Por volta dos 18.000 anos A.P. o NMM esteve em fase de descida máxima (FIGURA 2), com seu nível médio na isóbata atual aproximada de (-120 m); nesse tempo iniciou-se uma fase transgressiva (Transgressão Flandriana), a qual teve seu máximo por volta dos 5.100 anos atrás. Daí para cá o nível médio do mar tem sofrido pequenas variações eustáticas, com tendência geral para o abaixamento (regressão marinha). Obviamente a dinâmica costeira não será a mesma durante a subida ou descida do nível relativo do mar. Durante os episódios de submersão (subida do nível relativo do mar), sistemas de ilhas/barreiras/lagunas são dominantes e os rios poderiam alcançar áreas protegidas, como lagunas e estuários, para construir deltas (intra-lagunares ou intra-estuarinos). Em contraste, descidas de nível do mar criam condições desfavoráveis á gênese e manutenção de sistemas de ilhas/barreiras/lagunas. As lagunas e baías ficam emersas e planícies de cristas praias (cordões litorâneos ou cordões arenosos) progradam rapidamente, resultando em depósitos regressivos arenosos. Quando cristas fósseis praias estão presentes, a sua geometria reflete os sentidos pretéritos de transporte litorâneo. Isso torna possível determinar a proveniência das antigas ondulações e estabelecer os padrões de ventos do passado. Reconstruções paleogeográficas sustentadas por numerosas datações ao radiocarbono permitiram reconhecer o papel essencial desempenhado pelas mudanças de nível relativo do mar, associadas ao transporte longitudinal de sedimentos e flutuações paleoclimáticas na formação das planícies costeiras do Brasil.

Durante o período regressivo, alguns autores apontam a descida do NMM abaixo do nível atual: há 3.900 anos A.P. e há 2.800 A.P. [5,32]. Essas subidas e descidas do nível do mar (FIGURA 3) explicam a sucessão de camadas de areia, depositadas em regressão, e de argila siltosa, depositadas em transgressão.

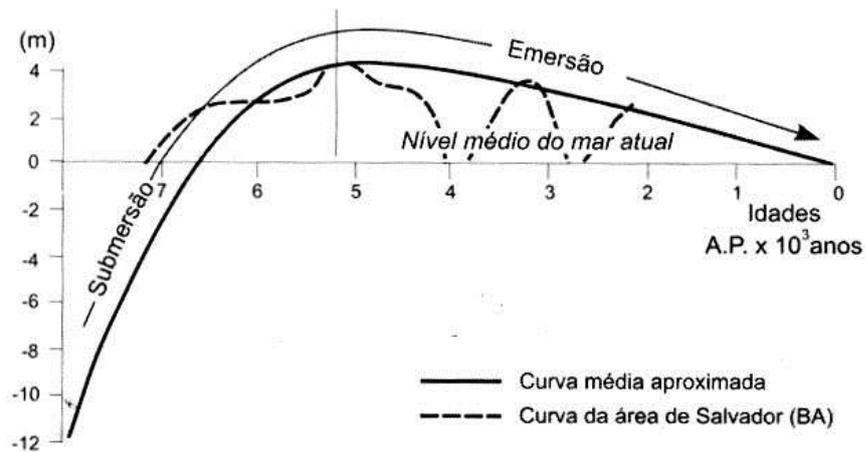


Figura 3: Curva média de variações do paleonível do mar relativo nos últimos 7.000 anos ao longo da costa brasileira em confronto com a curva da área de Salvador [32].

Segundo o modelo de Suguio et al. [32] para o litoral paulista esboçado na FIGURA 3, foi possível constatar que os paleoníveis relativos do mar estiveram situados acima do atual nos últimos 6.500 anos, com algumas seguintes peculiaridades:

I) O nível médio atual do mar foi ultrapassado pela primeira vez no Holoceno entre 7.000 e 6.500 anos A.P.;

II) Há cerca de 5.500 anos A.P., o paleonível do mar subiu entre 3 e 5 m acima do atual;

III) Há aproximadamente 3.900 anos A.P., o paleonível médio relativo do mar deve ter estado entre 1,5 e 2 m abaixo do atual, conforme Massad et al. [26];

IV) Há cerca de 3.000 anos A.P., o paleonível do mar ascendeu entre 2 e 3 m acima do atual;

V) Há cerca de 2.800 anos A.P., ocorreu novamente um pequeno rebaixamento, atingindo provavelmente um nível inferior ao atual;

VI) Há cerca de 2.500 anos A.P., foi atingido um paleonível 1,5 a 2 m acima do atual e, desde então, tem estado em rebaixamento contínuo.

As rápidas oscilações negativas do nível do mar, que ocorreram entre cerca de 3.900 A.P. e 2.700 A.P. somente encontram explicação plausível pelas deformações da superfície do geóide. Essas oscilações negativas do nível do mar foram questionadas por Angulo et al.[2], que admitem apenas uma transgressão do mar no Holoceno para o litoral brasileiro, do nordeste ao sul, cujo máximo teria sido atingido por volta dos 5.000 A.P., seguida de regressão contínua até os dias de hoje. Rejeitaram as oscilações negativas do nível do mar, que segundo Suguio e Tesslerl [32] e Martin et al. [21-24] teriam ocorrido pelo menos uma vez por volta dos 3.900 A.P. no litoral paulista. A polêmica motivou uma interessante pesquisa de De Mio e Giachetti [7] sobre a relação entre os ambientes de

sedimentação e as flutuações do nível do mar. Os autores recorreram ao Ensaio de Piezocone Sísmico (CPTuS), por fornecer perfis estratigráficos contínuos, e concluíram que há diferenças nos padrões sequenciais dos sedimentos entre Paranaguá (PR) e outros locais pesquisados: Guarujá (SP) e Caravelas (BA). Eles sugeriram que para esses dois locais, diferentemente do que foi constatado em Paranaguá (PR), ponto de partida dos ensaios de Angulo et al. [2], há uma correspondência entre a variabilidade dos sedimentos mais superficiais e as rápidas oscilações negativas do nível do mar descritas por Suguio e Martin et al. [23]. Além disso, Massad et al. [26] estudando o adensamento de argilas moles da baixada santista indicam que foi possível a confirmação da oscilação negativa de 3.900 A.P. e indica uma estimativa realista de sua amplitude (entre 1,5 e 2 m abaixo do atual).

As curvas de variações do NMM durante o Holoceno no mundo revelaram o fato de que não se pode pensar em curva única de variação mundial, mesmo em regiões de crostas mais estáveis, como o Brasil. Essa descoberta impulsionou as pesquisas visando à construção dessas curvas em diversas regiões da Terra. O modelo de Suguio (FIGURA 3) foi aceito com certa relutância, pois contrariava a curva correspondente à costa leste dos Estados Unidos, onde o mar estivera em ascensão contínua no mesmo intervalo de tempo. Atualmente essa divergência é aceita pelos especialistas e admite-se que o fenômeno tenha atuado de maneira diferente naquela parte da América do Norte e na costa brasileira. Modelos evolutivos também foram propostos por Dominguez et al. [16] e Dillenburg et al. [15].

De modo geral, as planícies costeiras que se encontram ao longo da costa brasileira podem ser classificadas como costas em avanço associadas a processos de emersão e/ou deposição, quando se considera a evolução geológica de 6.000 anos A.P. até hoje. Os sedimentos quaternários encontrados em Rio Grande são materiais inconsolidados formados por processos sedimentares, predominantemente em meio aquoso, de ambiente marinho ou transicional. Os sedimentos finos (argila e silte) concentram-se em ambiente de pouca energia como as baías fechadas, os sedimentos arenosos predominam em ambientes de maior energia, como os praias e fluviais. Em alguns ambientes de transição, como nas planícies e canais de marés, podem ser formadas finas intercalações de materiais arenosos e silto-argilosos, em função das amplitudes e conseqüentes correntes de marés. Este é o caso específico da região onde se localiza o Superporto. No entanto, as características geotécnicas destes sedimentos não estão vinculadas apenas à sua constituição e, em diversas situações, o comportamento geotécnico está ligado ao nível de pré-adensamento dos mesmos, principalmente dos pacotes argilosos que, no início da diagênese, deveriam apresentar elevados teores de água, mas, em função da granulometria fina, teria sido lentamente expulsa com o aumento do peso pela deposição das sucessivas camadas e pelo processo de adensamento secundário relacionado ao tempo de formação

dessas camadas, e aos processos de regressão marinha. Assim, sedimentos depositados num mesmo ambiente, porém em épocas distintas, podem exibir propriedades geotécnicas distintas, tornando evidente a importância do adequado entendimento da história geológica, conforme mostrado por Massad [25] e Massad et al. [26] em sedimentos do litoral do estado de São Paulo.

Diversos estudos ao longo de todo litoral brasileiro têm mostrado que a formação dos solos do litoral esteve intimamente ligada às flutuações do NMM, que ocorreram de forma particularmente intensa durante o período Quaternário [1,2,21].

De acordo com os estudos geológicos, as diversas camadas de sedimentos da região correspondem a materiais depositados em um ambiente altamente influenciado pela maré e pelas correntes de maré, ora enchente, ora vazante. Tal ambiente, dito transicional, apresenta intercaladas camadas de sedimentos com influência de paleorios ou paleolagos e camadas com influência das variações do nível do mar. Os eventos de transgressão e regressão do nível do mar foram muito importantes na construção deste perfil. Sondagem profunda, realizada pela PETROBRAS na praia do Cassino (7 km do Superporto) confirma sedimentos superficiais da regressão ocorrida de 6.000 anos A.P. até os dias atuais, sedimentos arenosos, além de sedimentos argilo-siltosos provenientes da transgressão entre 18.000 e 6.000 anos A.P. de acordo com Closs [4]. Além disso, este mesmo estudo confirmou que a espessura de depósito continental situa-se entre 45 e 100 m de profundidade. O substrato rochoso apresenta-se a uma profundidade de 520 m, com pacotes de sedimentos sotopostos, se apresentando como: ora argiloso, ora arenoso indicativo da influência das variações do nível médio do mar nestas épocas. Em trabalhos anteriores discutia-se a formação das camadas arenosas sobre a argila siltosa, que ocorrera no Holoceno, entre 6.000 anos A.P. e os dias atuais, segundo as evidências geomorfológicas (feixes de cordões litorâneos e velhos canais).

As datações no presente estudo têm indicado desde valores de 12.000 anos para cota de (-42 m), até 10.000 anos para cota de (-30 m), dentro da camada de argila siltosa. Como nessas datas o mar estava subindo, após seu recuo máximo (cota: - 110 a - 120 m há 18.000 anos A.P.), e pelas evidências obtidas de amostragem em estacas escavadas que atingiram a cota (-50 m), onde se detectou seixos, solo amarelado (laterizado) e pouco acima turfa (fundo de paleolago ou paleocanal), pode-se concluir que o depósito de argila siltosa se formou durante a transgressão (como esperado), entre 12.000 e 6.000 anos A.P.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de piezocone analisados foram realizados como ferramenta e suporte para o projeto geotécnico de um dique seco, pertencente ao Estaleiro Rio Grande que

ocorreu durante o ano de 2007. Dos referidos ensaios, num total de 23, escolhemos o perfil CPTu 17 a, para ser usado, nesse trabalho, a fim de estabelecer a análise e comparar com as datações através do C¹⁴.

As datações dos sedimentos dos furos de sondagem pertencentes à área do Superporto de Rio Grande foram executadas através do método de Espectrometria de Massa com Aceleradores de Partículas (AMS) e, foram realizadas em colaboração com o Laboratório de Cronologia (LACRON) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF). Vários tipos de amostras podem ser utilizados na análise de radiocarbono por AMS, como conchas, carvão, madeira, ossos, amostras de solo, sementes e etc. No final de uma análise por AMS, os dados obtidos incluem não apenas o número de átomos de carbono 14 na amostra, mas também a quantidade de carbono 12 e carbono 13. A partir destes dados, é possível chegar ao índice de concentração dos isótopos, permitindo a avaliação do nível de fracionamento.

A maior vantagem que a datação por radiocarbono pela técnica AMS tem sobre os métodos radiométricos por contagem de decaimentos beta é a quantidade pequena de amostra. Os espectrômetros de massas com aceleradores geralmente precisam de quantidades menores de amostras em relação aos métodos convencionais por um fator de 1.000.

A espectrometria de massas com aceleradores também leva menos tempo para analisar o teor de C¹⁴ em amostras, em comparação com os métodos de datação radiométrica que podem levar até dois dias. Um espectrômetro de massa tem um tempo de execução de poucas horas por amostra. Além disso, deve-se observar que as medições por AMS costumam apresentar mais precisão e fundos mais baixos do que os métodos de datação radiométrica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a escavação interna do dique seco ocorreram alguns problemas, como o não rebaixamento do lençol freático como esperado no local. Tal fato foi influenciado pelas condições peculiares do solo da região, como a presença de camadas de pouca espessura de argila siltosa, entremeadas por subcamadas de areia, nos níveis: entre cotas -6 e -8 m e entre cotas -12 e -20 m, conforme se pode observar no perfil do ensaio e na disposição das camadas (FIGURAS 4 e 5). Desta forma, a necessidade de executar a campanha de sondagem com piezocones e ensaios dilatométricos se tornou imprescindível. Esta iniciativa propiciou um refinamento no conhecimento dos perfis de solo atravessados, podendo-se assim, definir melhor a litologia e estratigrafia do sítio, e propor explicações para as mudanças no comportamento do solo, tendo em vista seu processo de disposição

(sedimentação e adensamento) em diversos tempos geológicos, e influenciados pelas variações do NMM nos últimos 18.000 anos A.P.

Tipicamente, a resistência de ponta no ensaio de cone (q_c) é alta nas areias e baixa nas argilas e, por consequência disso, a razão de atrito ($R_f = f_s/q_c$) se torna baixa nas areias e alta nas argilas, fornecendo um parâmetro importante na definição das camadas e subcamadas penetradas pelo cone. Para os perfis do dique seco, no interior da camada de argila siltosa, pode ser apontada a presença de veios de areia de pequena espessura, em cota de -30 m.

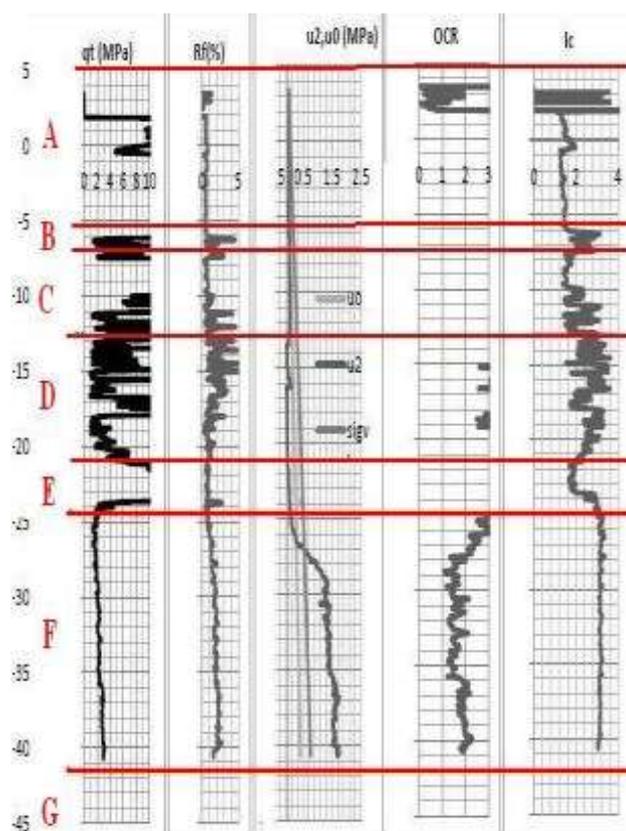


Figura 4: Perfil (CPTu 17 a) com subdivisão de camadas proposta neste trabalho

Analisando os perfis dos ensaios de piezocone apresentados nas FIGURAS 4 e 5, com cota no nível do terreno de + 3,47 m, verifica-se uma camada superficial de areia até a cota -13 m, com uma camada de argila siltosa de permeio, entre as cotas -6 e -7 m. Esta camada foi classificada por Dias et. al. [13] como camada A. A partir da cota -13 m começa uma sucessão de subcamadas com espessuras variando de 0,2 a 3 m, sendo classificadas como areia ou argila arenosa. Essa camada foi classificada por Dias et al. [13] como camada B. Deve-se salientar o fato que, ao se retirar blocos indeformados com dimensões de (40 cm x 40 cm x 40 cm), entre as cotas -13 e -14 m, ocorreu uma variabilidade, ainda maior, detectando-se subcamadas de 2,5 a 7,0 cm de espessura, intercalando-se sempre

argila e areia, às vezes com muitas conchas. A partir da cota -24 até a cota -41 m, o comportamento do ensaio apresenta uma camada mais homogênea, tanto na classificação como no comportamento, de argila siltosa, com leve crescimento da resistência não drenada (S_u) e da razão de sobre adensamento (OCR) com a profundidade. Essa camada foi denominada de camada C por Dias et al.[13]. Abaixo de -42 m encontra-se a denominada camada D, considerada como a camada basal para efeito de fundações em estacas, que é formada por areia muito compacta.

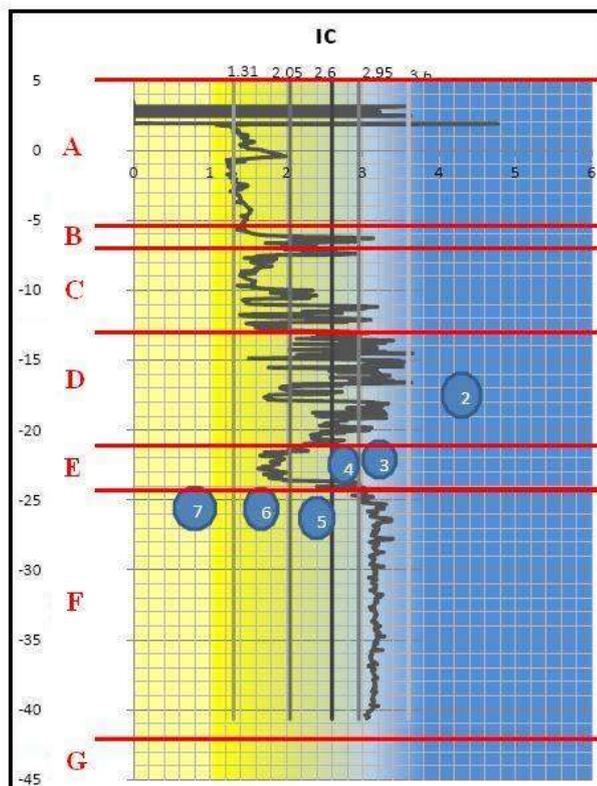


Figura 5: Perfil de I_c do ensaio (CPTU 17 a), obtido através do Gráfico de Robertson (1990) com as subcamadas propostas neste trabalho.

De Mio et al. [7] apresentaram, para o sítio de Caravelas (BA), um perfil composto por sete camadas, denominadas de A a G, sendo a camada A a mais superficial e a camada G a mais profunda. O estudo geológico forneceu as informações necessárias para interpretação da estratigrafia a partir do resultado do ensaio de piezocone. Alguns aspectos importantes discutidos por De Mio et al. [7], são ressaltados para se comparar com os resultados obtidos em Rio Grande.

Dias et al.[13] dividiram o perfil da área do dique seco no Superporto do Rio Grande em quatro camadas de A a D, baseados nos ensaios de simples reconhecimento SPT. A tendência no presente trabalho é ampliar essa divisão, baseando-se nos resultados de ensaios de piezocone, que são mais indicados para definição da estratigrafia, em

concordância com os estudos de De Mio [7]. Desta forma, após analisar os perfis de Caravelas, e por comparar os perfis de Rio Grande, obtemos os seguintes resultados:

Camada G: Em Rio Grande ela situa-se abaixo das cotas -42 m (profundidade de 45 m). Os ensaios de piezocone atingiram somente a cota de -42 m, no entanto, usando-se perfis de SPT mais profundos, da cota -42 até -60 m, encontram-se camadas de areia entre -42 e -48 m e sucessão de camadas de argilas siltosas duras (indicativo de fortemente pré-adensadas), de areias siltosas e novas camadas de argilas arenosas sotopostas. Além disso, diversas sondagens de simples reconhecimento tem indicado a presença de solo turfoso entre -40 m e -44 m, ou mesmo a presença de seixos e areias grossas, de cor amarelada, em cotas em torno de -48 a -50 m. Na datação por C^{14} em amostra retirada a -42m, a idade aproximadamente obtida foi de 12.000 anos A.P.

Camada F: Argila siltosa com comportamento não drenado no piezocone, muito homogênea, semelhantemente ao transcrito para o sítio Caravelas (BA), diferindo na profundidade e espessura da camada (de -24 a -42 m). Nota-se também nos perfis uma passagem brusca para a camada E, com mudança radical em todos os parâmetros. Datações com C^{14} foram feitas em amostras colhidas em três profundidades dentro desta camada: cota -40 m com idade 8.841 anos A.P.; cota -36 m com idade de 10.433 anos A.P. e cota -29 m e idade aproximada de 10.000 anos A.P. Há certa divergência nesses resultados, pois os materiais mais antigos não poderiam estar depositados acima de materiais mais jovens, a não ser que aqueles materiais tenham sido retrabalhados pelas correntes ou que tenha havido a contaminação da amostra.

Camada E (-21 a -24 m): Composta por areia muito compacta. Esta camada pode ter sido depositada a partir da regressão holocênica a partir de 6.000 A.P.

Camada D (-13 a -21 m): A partir de uma nova transgressão, sedimentaram-se argilas siltosas entremeadas por camadas de areia, com grande variabilidade nos perfis, ora indicando condição não drenada, ora condição drenada, provavelmente por alternâncias de processos transgressivos e regressivos, e por grande variabilidade do nível do mar, ora subindo, ora descendo. Amostra colhida na cota -15 m indicou idade de 5.206 anos A.P. Resultado muito parecido de datação é encontrado em Medeanic et al. [27], que apresentam datação por C^{14} em amostra tirada à cota -20 m, num local em torno de 20 km da costa atual da praia do Cassino, e a idade da amostra é de 4.940 anos A.P. num estrato que foi definido como transgressivo de argila siltosa.

Camada C (-7 a -13 m): Areia medianamente compacta a compacta, com lentes de argila siltosa próximas á base da camada, provavelmente esta camada é regressiva entre o período que vai de 3.200 a 2.800 anos A.P. A partir daí começa nova transgressão até cerca de 2.200 anos A.P.

Camada B: de argila siltosa, intercalada por centimétricas camadas de areia (cota - 5,5 a -7 m).

Camada A: areia regressiva medianamente compacta, que atingiu cotas em torno de +3,8 m, com formação de pequenas dunas.

A seguir são apresentados na TABELA 1 os resultados das datações realizadas.

Tabela 1: Resultados das datações (C¹⁴)

Amostra/ Material	1	2	3	4	5	6
Prof. (m)	45,2	43,2	43,2	39,2	32,2	18,2
Cota (m)	-42	-40	-40	-36	-29	-15
Idade (anos)	11753	8441	6612	10433	10006	5206
Incerteza (anos)	77	37	141	196	55	32

Na FIGURA 6 apresenta-se a proposta de modelo para disposição das diversas camadas de solo que ocorreram durante o Holoceno, sendo considerado como o resultado final deste trabalho.

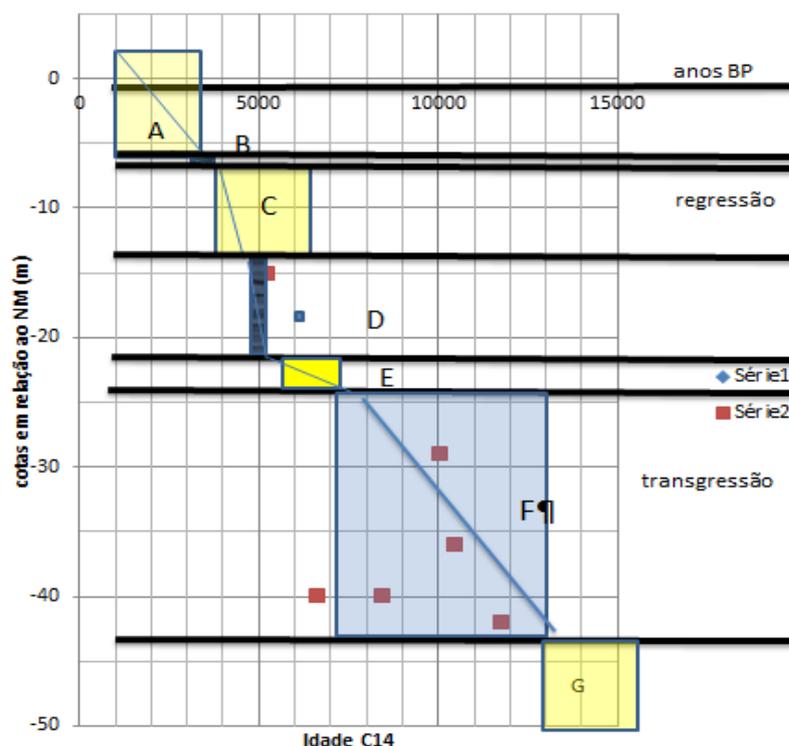


Figura 6: Modelo proposto para explicar as sedimentações em função das variações do NMM com as datações das amostras de sedimentos inclusas.

Na FIGURA 7 mostra-se a tentativa de modelar nesse trabalho as curvas de variação do nível do mar, conforme Corrêa [5] e Angulo [2], (ver FIGURAS 2 e 3), e as datações obtidas no presente trabalho e em Medeanic et al. [27].

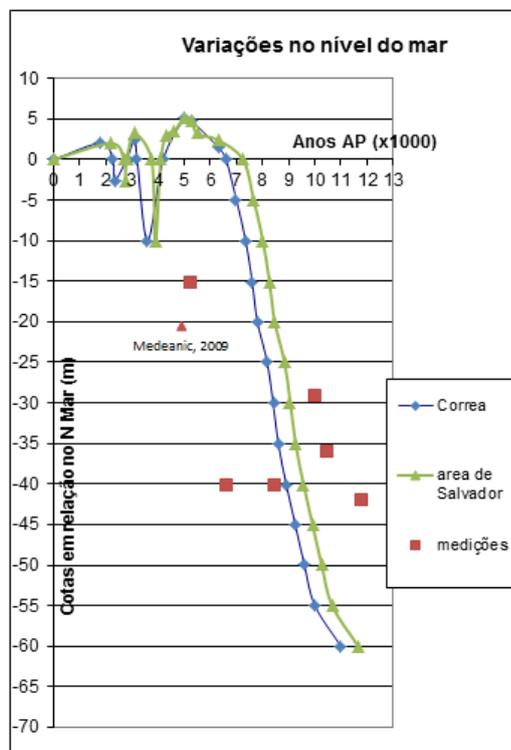


Figura 7: Flutuações do nível médio do mar, descritas por diversos autores, e datações de sedimentos para o Superporto de Rio Grande.

Os perfis do subsolo estavam divididos nas camadas A, B, C, D propostas por Dias et al. [13] e que foram definidas baseadas na análise do ensaio SPT. Fica evidente naqueles perfis, agora obtidos com maior detalhe pelo piezocone, uma necessidade de ampliação desta divisão. Portanto, em analogia ao resultado proposto por De Mio [7] para Caravelas (BA) e com base no maior detalhamento dos perfis CPTu do sítio, aliado ainda aos resultados de datação obtidos, é proposto um modelo evolutivo para a região e apresenta-se os perfis agora subdivididos nas sete camadas (A até G). Desta forma, o perfil longitudinal para o Superporto de Rio Grande, apresentado em Dias et al [7-14] e Goulart [20] subdividido nas camadas propostas neste trabalho pode ser visualizado na FIGURA 8 incluindo as datações realizadas.

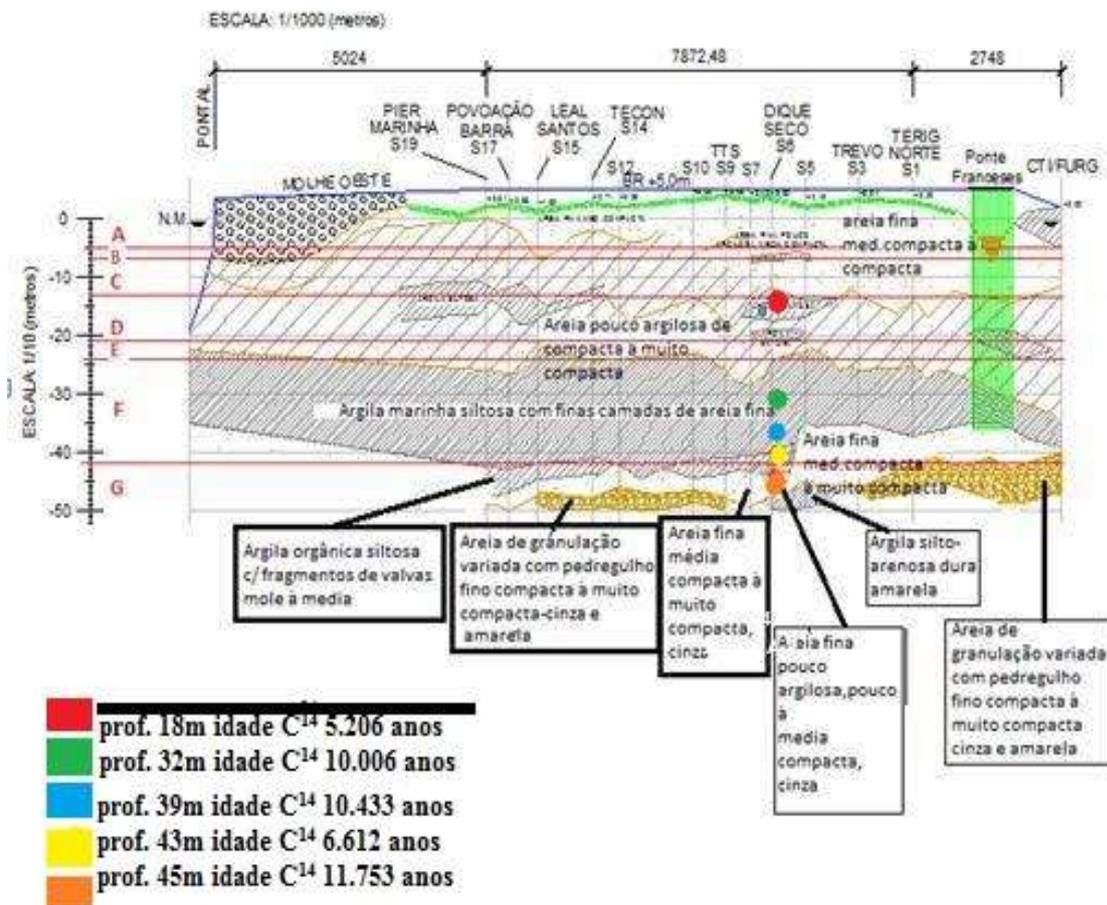


Figura 8 – Perfil longitudinal de Sul a Norte do Superporto de Rio Grande subdividido nas camadas propostas neste trabalho e apresentando os pontos de onde foram retiradas as amostras para datação com as respectivas idades C¹⁴.

6. CONCLUSÕES

Na análise estratigráfica das camadas de sedimentos quaternários, uma ferramenta extremamente importante é a descrição detalhada do perfil, com classificação do material, identificação de estruturas e datações, em observações realizadas em afloramentos do terreno ou em sondagem com amostragem integral. Esta abordagem de estudo integrada normalmente é cara e exige profissionais qualificados para interpretação e integração das informações. O resultado do ensaio de piezocone não fornece amostras, porém a interpretação integrada dos registros dos três sensores (q_c ; f_s ; u) pode fornecer informações que contribuem para um melhor entendimento do perfil estratigráfico e geotécnico de regiões sedimentares.

Este trabalho relacionou resultados de datação radiométrica do isótopo C^{14} , realizadas em amostras do perfil estratigráfico da região do Superporto de Rio Grande/RS com um modelo evolutivo que buscou explicar a formação quaternária das diferentes camadas sedimentares.

O estudo teve o objetivo de avaliar a história geológica com a interpretação dos ensaios de piezocone e a datação radiométrica para a identificação estratigráfica. Os resultados dos ensaios de piezocone foram eficazes na caracterização litológica de alta resolução e na classificação dos sedimentos. Com isso, foi reafirmada a utilidade de usar o ensaio de prospecção geotécnica de cone com medida de pressão neutra como método para definir a estratigrafia do sedimento do Quaternário quando conjugado com o adequado conhecimento geológico do sítio e corroborado pelas datações radiométricas das amostras, contribuindo na descrição dos padrões de flutuações do nível médio do mar para a região da Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul mais especificamente para a área do Superporto de Rio Grande/RS, e auxiliando os projetistas de fundações a conhecer melhor a história geológica deste sítio em futuras campanhas geotécnicas. Deve-se ressaltar a importância do conhecimento geológico na interpretação dos resultados dos ensaios de campo, principalmente quando amostras não são disponíveis, como em ensaios de piezocone.

Nos sedimentos quaternários o resultado dos ensaios de piezocone mostra-se muito adequado, pois fornece elevado detalhamento da sequência litológica que, quando adequadamente calibrado com a interpretação geológica, pode ser utilizado para diversos estudos de estratigrafia de alta resolução. Sendo assim, a elevada precisão e frequência de registro dos sensores tornam o piezocone um ensaio adequado a estudos de variabilidade dos materiais inconsolidados.

Este trabalho contribuiu com a melhor identificação de cada camada sedimentar da região, ampliando a subdivisão proposta por Dias et al. [13], em sete diferentes pacotes sedimentares (camadas de A até G) em analogia com um sítio do litoral do Estado da Bahia (Caravelas-BA) analisado por De Mio e Giachetti [7]. Estes dados são importantes quando se estuda a estratigrafia dos solos costeiros à luz da geologia regional, e principalmente a partir dos estudos de variação do nível do mar no Quaternário. Com este conhecimento sobre a disposição dos pacotes e datação das camadas de argila este trabalho contribui para o melhor entendimento do subsolo do Superporto de Rio Grande, principalmente no que se refere à camada de argila siltosa profunda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANDRADE, A. C. S.; DOMINGUEZ, J. M. L.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P. Quaternary evolution of the caravelas strandplain – southern Bahia State – Brazil – **Anais**

Academia Brasileira de Ciências, n.75 v. 3, p. 357-382, 2003.

[2] ANGULO, R. J.; LESSA, G. C., The brazilian sea level curves: a critical review with emphasis on the curves from Paranaguá and Cananéia regions. **Marine Geology**, v.140, p.141-166, 1997.

[3] BASTOS, C. A. B.; DIAS, C. R. R.; GOULARTE, C. L. Investigação dos parâmetros geotécnicos de uma camada sedimentar muito estratificada na região do Superporto do Rio Grande. **XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, ABMS, Gramado/RS. 2010.

[4] CLOSS, D. **Estratigrafia da Bacia de Pelotas, Rio Grande do Sul**. Ilheringia, Geologia, Porto Alegre, v. 3, p. 3-76, 1970.

[5] CORREA, I. C. S. **Analyse morphostructurale et évolution paléogéographique de la plate-forme continentale Atlantique Sud Brésilienne (Rio Grande do Sul, Brésil)** . 314p. Thèse (Doctorat) Université de Bordeaux I. France, 1990.

[6] DE MIO, G. ; MONDELLI, G.; GIACHETTI, H. L. **Ensaio de piezocone com filtro de cavidade na investigação de solos tropicais**. 5 nsat, São Carlos, p. 31-38. 2005.

[7] DE MIO, G.; GIACHETTI, H. L. The usefulness of piezocone tests for high-resolution stratigraphy on quaternary sediment sequences of the Brazilian Coast. **Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro**, v. 79, p. 153-170, 2007.

[8] DIAS, C. R. R. Comportamento de estacas de fundação dos silos do terminal de trigo e soja do superporto de Rio Grande, **Solos e Rochas, ABMS**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 27-37, 1979.

[9] DIAS, C. R. R. Parâmetros geotécnicos da argila siltosa mole da Cidade de Rio Grande – região do Superporto, **Vetor**, FURG, Rio Grande, v.3, p.19-34, 1993.

[10] DIAS, C. R. R. Os parâmetros geotécnicos e a Influência dos eventos geológicos – argilas moles de Rio Grande/RS, **Encontro sobre Propriedades de Argilas Moles Brasileiras**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, p. 29-49, 2001.

[11] DIAS, C. R. R.; BASTOS, C. A. B. Argila siltosa marinha de Rio Grande/RS – Análise dos dados geotécnicos aplicados às obras portuárias, **VI Congresso Brasileiro da ABEQUA**, ABEQUA, Curitiba, p. 53-57, 1997.

[12] DIAS, C. R. R.; KERSTNER, V. W. T. Argila siltosa orgânica do Porto de Rio Grande/RS: parâmetros de laboratório e correlações. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Ed. Dunas, Rio Grande, v. 3, p. 81-91, 2003.

[13] DIAS, C. R. R.; BASTOS, C. A. B.; PEDREIRA, C. L. S.; SCHULER, A. R. E SCHMITT, L. A. Caracterização do subsolo do superporto de Rio Grande a partir de novas investigações geotécnicas para obras portuárias. In: **IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia**, SPG, Coimbra, Portugal, v. 1, p.375-382, 2008.

[14] DIAS, C. R. R.; PEDREIRA, C. L. S.; LOBO, B. O. Previsão e observação de comportamento das estacas de mar da obra de remodelação do Porto Novo de Rio Grande. Sefe V – In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia**, ABEF/ABMS, São Paulo, Brasil, v. 2, p. 104-115, 2004.

[15] DILLENBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. Influence of the

antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, v. 16, p. 71-81, 2000.

[16] DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; MARTIN, L. Esquema evolutivo da sedimentação quaternária nas feições deltaicas dos rios São Francisco, Jequitinhonha, Doce e Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 11, n. 4, p. 227-237, 1981.

[17] DOUGLAS, B. J.; OLSEN, R. S. Soil Classification using electric cone penetrometer. Cone penetration testing and experience. **Proc. ASCE**, St Louis, USA, 209-227, 1981.

[18] FAIRBRIDGE, R. W. Eustatic changes in sea level. **Physics and chemistry of the Earth**, v. 4, p. 99-185, 1961.

[19] GODOLPHIM, M. **Geologia do holoceno costeiro do município de Rio Grande**, 146p. Dissertação (Mestrado), IG, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1976.

[20] GOULART, C. L. **Inventário e análise dos parâmetros da argila siltosa profunda da região portuária de Rio Grande**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande; 2012.

[21] MARTIN, L.; SUGUIO, K. Coastal quaternary deposits of the states of Paraná and Santa Catarina. In: **International Symposium on Sea Level Changes and Quaternary Shorelines**. São Paulo, Brasil, Special Publication, v. 1, 124p, 1986.

[22] MARTIN, L.; MÖRNER, N. A.; FLEXOR, J. M.; SUGUIO, K.. Fundamentos e reconstrução de antigos níveis marinhos do quaternário. **Boletim IG-USP**, Publicação Especial, v. 4, p. 1-161, 1986a.

[23] MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M. Shell middens as a source for additional information in Holocene shoreline and sea-level reconstruction: Examples from the costal of Brazil. In: VAN PLASSCHE, O. (Ed.). **Sea-level research: A manual for the collection and evaluation of data**. Norwich, Geobooks, p. 503-521, 1986b.

[24] MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M.; DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P. Quaternary sea level history and variation in dynamics along the Central Brazilian coast: Consequences on coastal plain construction. **Anais da academia Brasileira de Ciências**, v. 68, p. 303-354, 1996.

[25] MASSAD, F. História geológica e propriedades dos solos de baixadas: comparações entre diferentes locais da costa brasileira. In: **Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras**, Rio de Janeiro, Brasil, p 3.1-3.34, 1988.

[26] MASSAD, F.; SUGUIO, K.; PEREZ, F.S. Propriedades geotécnicas de sedimentos argilosos como evidencia de variações do nível relativo do mar em Santos. **8º CBGE**, Rio de Janeiro, Brasil, p. 163-177, 1996.

[27] MEDEANIC, S. L. C.; et al. Holocene marine transgression in the coastal plain of Rio Grande do Sul, Brazil: palynomorph and diatom evidence. **Journal of Coastal Research**, v. 25, n.1 p. 224-233, 2009.

[28] ROBERTSON P. K., CAMPANELLA, R. G., GILLESPIE D.; GREIG J. Use of piezometer cone data, **Proc. In-Situ-86, ASCE Specialty Conference**, p. 1263-1280, 1986.

[29] ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. **Canadian**

Geotechnical Journal, v. 27, p. 151-158, 1990.

[30] SCHNAID, F. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. **Oficina de Textos**, São Paulo, 189p, 2000.

[31] SENNESET, K.; JAMBU, N. Shear strenght parameters obtained from static cone penetration tests. **ASTM**, STP v. 883, p. 41-45, 1988.

[32] SUGUIO, K.; TESSLER, M. G. Planície de cordões litorâneos quaternários do Brasil: origem e nomenclatura. In: LACERDA, L. D.; ARAÚJO, D. S. D.; TURCQ, B. (Eds). **Restingas: Origem, Estrutura e Processos**, Niterói, Brasil, p.15-25, 1984.

[33] VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J.; LOSS, E. L.; DEHHARDT, E. A.; HORN FILHO, N. O.; BACHI, F. A.; DEHNHARDT, B. A. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. In: RABASSA, J. (Ed.), **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**, v. 4, p. 79-97, 1986.