

DATAÇÃO DE SEDIMENTOS COSTEIROS E USO DO PIEZOCONO PARA DEFINIR ESTRATIGRAFIA

Dating of coastal sediments and use of piezocone to define stratigraphy

Claudio Renato Rodrigues Dias*

Everaldo Bastos**

RESUMO – O objetivo principal deste trabalho é explorar o uso dos ensaios de piezocone como um método para definir a estratigrafia de seqüências de sedimentos do Quaternário e contribuir para a descrição dos diferentes padrões de flutuação do nível médio do mar e sua influência para a costa sul do Rio Grande do Sul/Brasil. Além disso, pretende-se correlacionar resultados de ensaios de datação por radiocarbono (C^{14}) de amostras retiradas entre as profundidades de 15 e 45 metros em relação ao nível do mar, na área de um estaleiro em Rio Grande, assim como ensaios de datação de solo em outro sítio, como apresentado em estudos de sedimentologia, paleontologia e palinologia.

SYNOPSIS – The main objective of this paper is to explore the use of piezocone tests as a method to define the stratigraphy of Quaternary sediment sequences and to contribute to the description of the different sea level fluctuation patterns and their influence for the south coast of Rio Grande do Sul/Brazil. Moreover, it is intended to correlate radiocarbon (C^{14}) dating test results of samples collected at depths from 15 to 42m below sea level in a shipyard area in Rio Grande, as well as dating tests made in another site, presented in studies of sedimentology, paleontology and palynology.

PALAVRAS CHAVE – Estratigrafia, datação por carbono 14, piezocone, variações do nível do mar.

1 – INTRODUÇÃO

O estudo dos perfis estratigráficos de depósitos sedimentares do Quaternário Recente tem sentido ultimamente uma forte contribuição de geólogos, palinólogos, paleontólogos e arqueólogos. As seqüências de deposição no Quaternário nas regiões costeiras foram fortemente afetadas pelos eventos de regressão e transgressão do nível do mar, principalmente nos chamados ambientes transicionais de lagoas, planícies costeiras e áreas inundáveis. De Mío e Giacheti (2007) sugeriram o uso dos perfis de ensaios de piezocone para definir a estratigrafia de alta resolução de seqüências de sedimentos do Quaternário na costa do Brasil. Baseando-se em ensaios de piezocone, analisaram três pontos da Costa Brasileira: Caravelas (Bahia), Guarujá (São Paulo) e Paranaguá (Paraná). Dos três pontos, há comportamento parecido nos dois primeiros sítios, mas há uma diferença na seqüência de sedimentos no sítio de Paranaguá, relacionada com a curva de flutuação do nível do mar para aquela região. 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 (Massad, 1988). De Mío (2005), em sua tese de doutorado, mostrava

* Engenheiro Civil, Doutor, Professor Colaborador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica/FURG, Rio Grande (RS), Brasil. E-mail: crrd@vetorial.net

** Físico, Mestre, Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica/FURG, Rio Grande (RS), Brasil. E-mail: everaldobastos@furg.br

a alta aplicabilidade dos ensaios de piezocone, uma ferramenta de engenharia geotécnica, para definir a estratigrafia, além da possibilidade de integrar-se com outras técnicas correntes como as usadas nos estudos de paleo-ambientes, como dados da palinologia, bem como com futuros estudos de combinação dos ensaios de piezocone com datação pelo carbono (C^{14}).

O ensaio de penetração de cone, chamado CPT, com uso de células de carga, foi desenvolvido fortemente nos anos 1970, e tem experimentado larga aceitação devido a sua precisão, a aquisição contínua de dados e a natureza detalhada desses dados. Posteriormente, com a introdução de transdutores de pressão, capazes de medir a poro pressão durante a penetração, o ensaio passou a chamar-se CPTu. As principais medidas registradas um computador são: a resistência de ponta (q_c , q_t), a resistência lateral (f_s) e a poro pressão (u_2) (Lunne *et al.*, 1997). Diferentemente dos ensaios tipo SPT, ou ensaios de simples reconhecimento, 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, através de métodos e correlações empíricas apresentados por diversos autores (Douglas e Olsen, 1981; Robertson *et al.*, 1986; Robertson, 1990; Robertson e Campanella, 1988), a possibilidade de classificar o solo e definir parâmetros por seu comportamento no ensaio.

Os ambientes sedimentares e sequências de camadas foram controlados pelas flutuações do nível do mar durante o Quaternário, e podem indicar que cada um tenha características específicas, talvez influenciadas por diferentes taxas de disposição do sedimento. Martin *et al.* (2003) admitem que o padrão geral do nível do mar na costa brasileira é similar em todos os sítios, e indicam que esta costa foi submetida à submersão a partir de cerca de 5100 anos atrás (AP), quando atingiu cerca de 5 metros acima do nível atual, seguido de uma queda progressiva até o presente.

No presente trabalho tem-se por objetivo confirmar a utilidade do ensaio de piezocone como método para definir a estratigrafia do sedimento do Quaternário e contribuir na descrição dos padrões de flutuação do nível do mar e sua influência na costa sul do Rio Grande do Sul. Além disso, relacionar resultados de datação de amostras coletadas em várias profundidades, situadas entre as cotas de -15 metros e -42 metros, na área do Estaleiro Rio Grande (ERG), e comparar com datação em outro sítio, apresentada em estudos de Medeanic *et al.* (2009).

2 – SÍTIO DO SUPERPORTO DO RIO GRANDE

2.1 – Descrição do local

Os ensaios de piezocone 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 (Rio Grande-RS) (Fig. 1). Dos referidos ensaios de piezocone, num total de 23, alguns são usados, nesse trabalho, para comparar com estudos de paleontologia e datação com carbono 14.

2.2 – Geologia do sítio

Segundo estudos geológicos, as diversas camadas de sedimentos da região na Planície Costeira Sul correspondem a materiais depositados em um ambiente altamente influenciado pela maré e pelas correntes de maré de enchente e vazante. Tal ambiente, dito transicional, pode ser relacionado a fácies de canal de maré, que apresentam intercaladas camadas de sedimentos com influência de paleo-rios ou paleo-lagos e camadas com influência do mar.



Fig. 1 – Sítio de estudo no ERG (Bastos *et al.*, 2010).

Os eventos de transgressão e regressão do nível do mar foram muito importantes na construção deste perfil. A Fig. 2 apresenta um perfil longitudinal de 12 km do Superporto de Rio Grande e mais 4 km do Molhe Oeste da Barra do Rio Grande (Dias *et al.*, 2008).

Sondagem profunda, realizada pela Petrobrás na praia do Cassino (7 km do Superporto), confirma sedimentos superficiais da regressão ocorrida de 6000 anos AP até os dias atuais (arenosos) e sedimentos argilo-siltosos da transgressão entre 17 000 anos AP e 6000 anos AP, além da espessura de depósito continental entre 45 e 100 metros de profundidade (Closs, 1970). O substrato rochoso apresenta-se a uma profundidade de 520 m, com pacotes de sedimentos sotopostos, se apresentando como ora argiloso, ora arenoso.

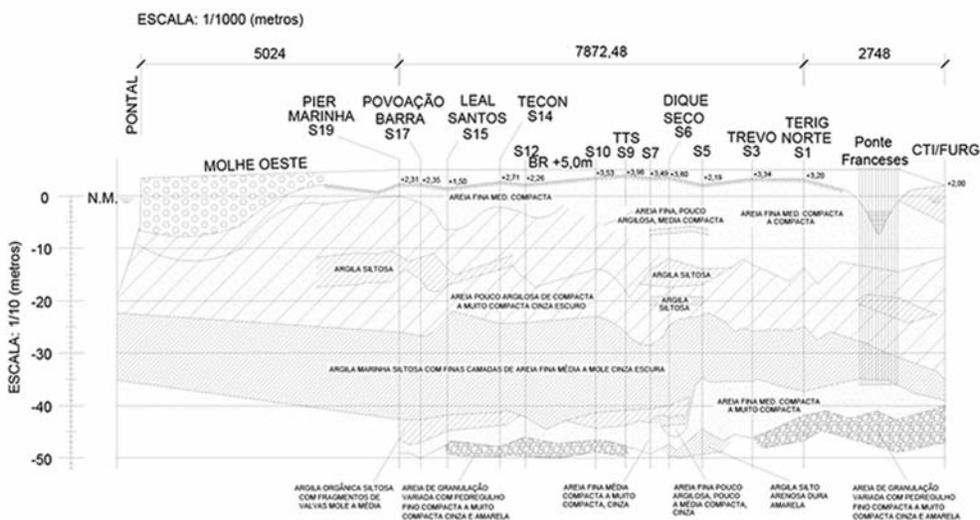


Fig. 2 – Perfil longitudinal no sentido sul-norte desde os Molhes da Barra até o Campus Cidade da FURG (Dias *et al.*, 2008).

Em trabalhos anteriores (Dias, 1979; 1993; 2001) e Dias e Bastos (1997), Dias e Kerstner (2003), Dias *et al.* (2004), discutia-se a formação das camadas arenosas sobre a argila siltosa, que ocorrera no Holoceno, entre 6000 anos AP e o presente, 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 -42m, a 10 000 anos para cota de -30m, dentro da camada de argila siltosa. Como nessas datas o mar estava subindo, após seu recuo máximo (cota: -110 a -120m) há 17 000 anos AP, e pelas evidências obtidas de amostragem em estacas escavadas que atingiram a cota -50m, 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 6000 anos AP.

É importante que se considere as curvas de variações relativas do nível do mar na costa brasileira, relacionadas aos últimos 7000 anos. Um dos eventos geológicos que marcaram a passagem Pleistoceno-Holoceno foi um aumento do nível do oceano em cerca de 5 metros, que na região de Rio Grande foi designada por Transgressão Quinta, sendo sua ação registrada na construção de uma falésia, com cerca de dois metros de altura, atualmente interiorizada cerca de 20 km da atual linha de praia (Godolphim, 1976). Medeanic *et al.* (2009) apresentam datação por C¹⁴ em amostra tirada à cota -20m, num local em torno de 20km da costa atual da praia do Cassino, que indicou uma idade de 4940 anos AP, num estrato de argila siltosa, que foi definido como transgressivo. Naquele sítio, essa camada chega até a cota -13m. A partir daí, o estrato passa a ser chamado regressivo.

A regressão se deu a partir do nível de mar alto ter baixado e erodido as praias ao longo da planície costeira. Ao longo dos terrenos pleistocênicos marinhos (regionalmente denominados Formação Chui) teria sido construída tal falésia que, portanto, constitui um contato entre os terrenos pleistocênicos marinhos e os holocênicos marinhos e lagunares. Com o retrabalhamento dos terraços marinhos e da praia, e mais material transportado pelas correntes marinhas provenientes do sul (sedimentos do Rio da Prata), a medida que o nível do mar regredia, formavam-se conjuntos de cordões, chamados feixes de restingas. Godolphim (1976) distinguiu sete feixes, construídos ao longo de 6000 anos, sugerindo que se possa considerar sete oscilações no nível do mar, com possibilidade de datação grosseira dos períodos de formação dos feixes (Quadro 1) que permitem reconstituir a evolução holocênica do sistema.

Quadro 1 – Datas e principais fenômenos (no Holoceno) que marcaram a formação sedimentar da região em foco.

Feixe	Período (anos AP)	Fenômenos associados
FR1	6000/ 5200	Nível do mar +5,0 m
FR2	5200/ 4600	Início da formação do pontal de Rio Grande
FR3	3850/ 2800	Cresce pontal, desvio da barra sul da Laguna dos Patos
FR4	2800/ 2400	Elevação do nível do mar em cerca de 2 m
FR5	Não definido	Volta da regressão, com formação de barra mais ao sul
FR6	Não definido	Nova subida do nível do mar, com erosão de feixes anteriores
FR7	Início: 335 AP	Reposição da barra atual, recobrimento por depósitos eólicos

2.3 – Variações do nível do mar

Durante o período regressivo, alguns autores (Corrêa, 1996; Suguio e Tessler, 1984) apontam a descida do nível do mar abaixo do nível atual: cerca de 10 metros há 4200 anos AP e cerca de 2 metros há 2800 AP. Essas subidas e descidas do nível do mar explicariam a sucessão de camadas de areia, depositadas em regressão, e de argila siltosa, depositadas em transgressão (Figs. 3 e 4).

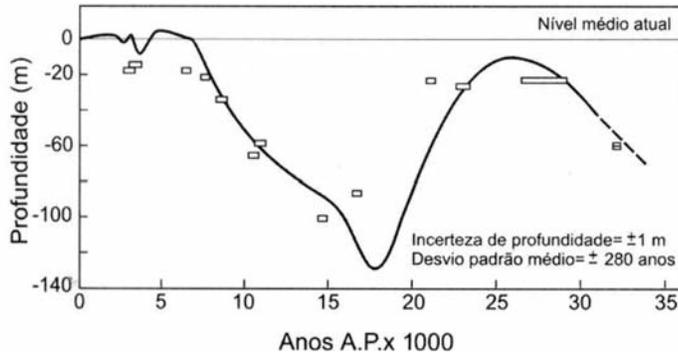


Fig. 3 – Variação dos paleoníveis do mar na Planície Costeira do Rio Grande do Sul (Corrêa, 1996).

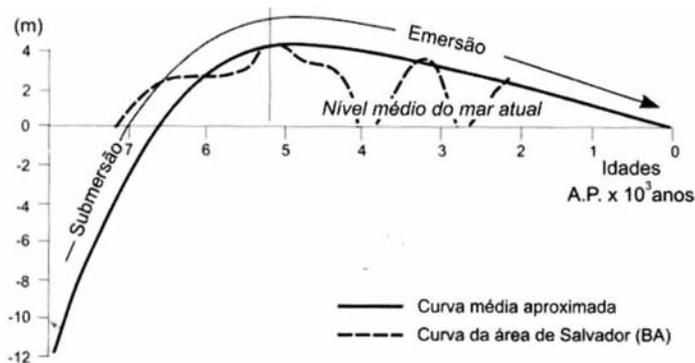


Fig. 4 – Variação do paleonível relativo do mar nos últimos 7000 anos (Suguio e Tessler, 1984).

3 – ENSAIOS DE PIEZOCONE

Durante a escavação interna do dique seco surgiram problemas de diversas ordens, podendo-se apontar como um dos principais o funcionamento deficiente do sistema de rebaixamento do lençol freático do local. Tal fato foi influenciado pelas condições peculiares do solo local, como a presença de camadas de pouca espessura de argila siltosa, entremeadas por subcamadas de areia, nos níveis entre cotas -6 e -8 metros e entre cotas -12 e -20 metros, conforme se pode observar na Fig. 6. Desta forma, houve a necessidade de executar uma campanha de sondagem com piezocones e ensaios dilatométricos. Esta iniciativa propiciou um refinamento no conhecimento dos perfis de solo atravessados, podendo-se assim definir melhor a estratigrafia do sítio e propor explicações para as mudanças no comportamento do solo, tendo em vista seu processo de deposição (sedimentação e adensamento) em diversos tempos geológicos, e influenciado pelas variações do nível do mar entre o pleistoceno e holoceno.

Para tal campanha foram contratadas duas empresas (A e B), sendo que a primeira executou 3 ensaios de piezocone que, inicialmente, permitiram definir parâmetros importantes do local. Essa empresa executou pré-furos até a profundidade de 26 e a partir deste ponto, realizou os ensaios de piezocone. A empresa B executou 20 ensaios de piezocone (CPTu) e 20 ensaios dilatométricos (DMT), ao longo de todo o perfil, que completaram o estudo da estratigrafia e possibilitaram uma melhor definição de parâmetros.

O ensaio de piezocone é o que melhor retrata a estratigrafia das camadas de solo, tornando possível detectar de forma mais precisa as diversas camadas de solo. Tipicamente, a resistência de ponta do cone (q_t) é alta nas areias e baixa nas argilas, e a razão de atrito ($R_f = f_s/q_t$) é baixa nas areias e alta nas argilas. Na realidade não se espera definir o tipo de solo a partir do CPT, mas sim o comportamento do tipo de solo. Outro fator importante que deve ser salientado é a melhor caracterização de camadas de pequena espessura (alguns centímetros), que nem sempre é possível num ensaio do tipo SPT (geralmente as medições e coletas se dão a cada 1 metro de perfuração). Exemplificando 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 -30m, como se pode observar na Fig. 5, que apresenta resultados de ensaios executados pela empresa A.

Analisando os perfis dos ensaios de piezocone CPTu17a, executados pela empresa B (Fig. 6), com cota no nível do terreno de +3,47metros, verifica-se uma camada superficial de areia (peso específico médio de 18 kN/m^3) até a cota -13m, com uma camada de argila siltosa de permeio, entre as cotas -6m e -7m. Esta camada foi classificada por Dias *et al.* (2008) como Camada A. A partir da cota -13 começa uma sucessão de subcamadas com espessuras variando de 20cm a 300cm, sendo classificadas como areia ou argila arenosa. Essa camada foi classificada como Camada B. Deve-se salientar o fato que, ao se retirar blocos indeformados, com dimensões de $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 40\text{cm}$, entre as cotas -13m e -14m, verificou-se maior variabilidade nas subcamadas, detectando-se algumas com espessuras de 2,5cm a 7,0cm, intercalando-se sempre argila e areia, às vezes com muitas conchas. Verificava-se assim uma maior semelhança de comportamento com os perfis apresentados nos ensaios CPTu.

A partir da cota -24m até a cota -41m o comportamento do ensaio apresenta uma camada mais homogênea (na classificação e no comportamento) de argila siltosa, com leve crescimento da resistência não drenada e da razão de sobreadensamento com a profundidade. Essa camada foi denominada de Camada C. O peso específico da argila siltosa em média é 16kN/m^3 . Abaixo (Camada D), aparece a camada basal para efeito de fundações em estacas, que é formada por areia muito compacta.

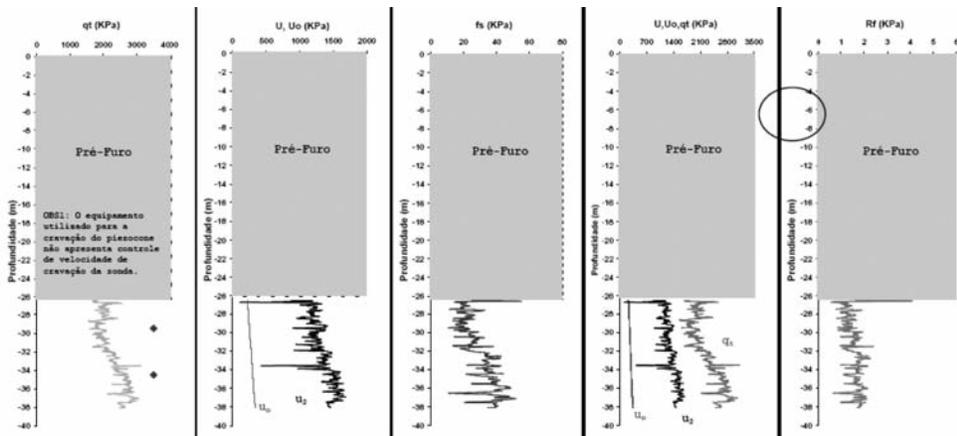


Fig. 5 – Perfil de piezocone na região do dique seco do Estaleiro Rio Grande (Dias *et al.*, 2008).

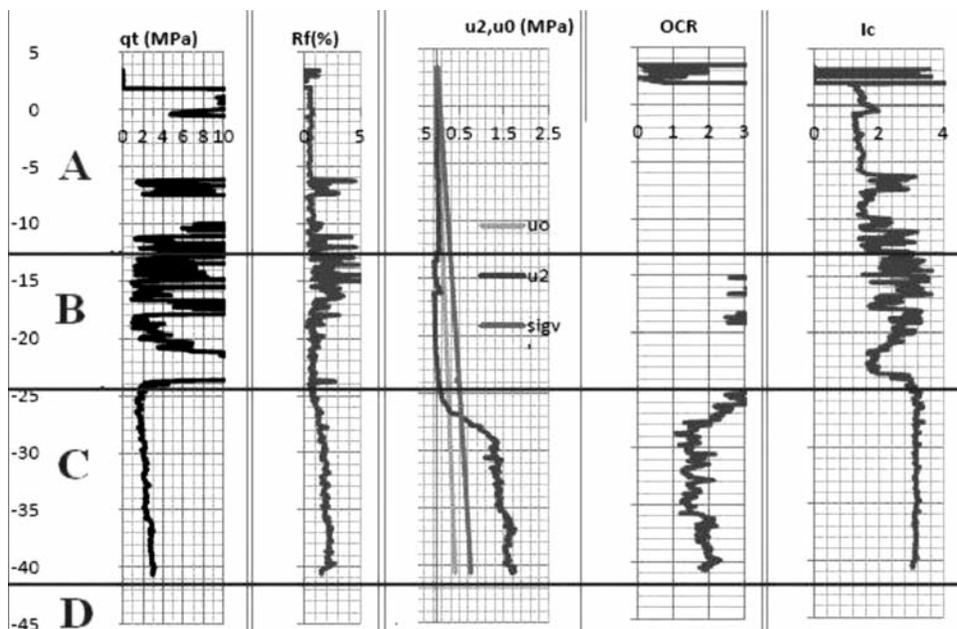


Fig. 6 – Perfis do ensaio CPTU 17a - As camadas descritas por Dias *et al.* (2008) de A até D, para sondagens tipo SPT, estão demarcadas.

3.1 – Cartas de comportamento de solo (SBT_N)

A previsão do tipo de solo baseada no CPT é referida ao tipo de comportamento de solo (SBT – *Soil Behavior Type*), como nos gráficos, sugeridos por Robertson *et al.* (1986), e numa versão mais recente de Robertson (2010), apresentados na Fig. 7.

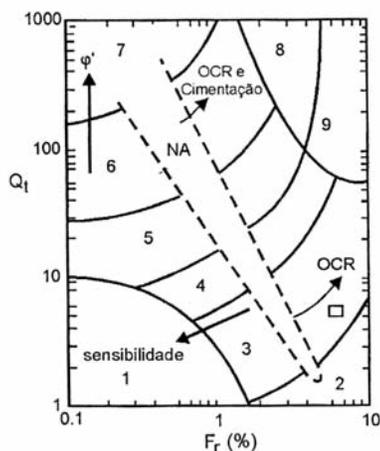


Fig. 7 – Gráfico do SBT (Robertson *et al.*, 1986, revisto por Robertson, 2010).

No gráfico as diversas zonas definem o solo pelo seu comportamento, relacionado à resistência de ponta normalizada (q_t) e à razão de atrito (R_f).

3.2 – Índice de comportamento do solo (Ic)

Através dos resultados do ensaio de piezocone pode-se definir um parâmetro chamado Índice de comportamento do solo. Seu valor pode ser obtido pela equação 1, podendo-se classificar o tipo de solo: areias pedregulhosas $I_c (<1,31 - \text{zona } 7)$; areias a areias siltsas $(1,31 < I_c < 2,05 - \text{zona } 6)$; misturas de areias $(2,05 < I_c < 2,60 - \text{zona } 5)$; misturas de siltes $(2,60 < I_c < 2,95 - \text{zona } 4)$; argilas $(2,95 < I_c < 3,60 - \text{zona } 3)$; solos orgânicos $(I_c > 3,60 - \text{zona } 2)$.

A equação 1 define I_c , e representa essencialmente os raios de círculos concêntricos que representam os limites entre cada zona SBT.

$$I_c = [(a \cdot \log q_n)^2 + (\log f_n + b)^2]^{1/2} \quad (1)$$

$a \approx 3,47$; $b \approx 1,22$;

q_n - resistência à penetração normalizada;

f_n - razão de atrito normalizada, em %.

$$q_n = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (2)$$

$$f_n = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100\% \quad (3)$$

Na Fig. 8 apresenta-se o perfil de I_c para o ensaio CPTu 17a, para o dique seco em Rio Grande.

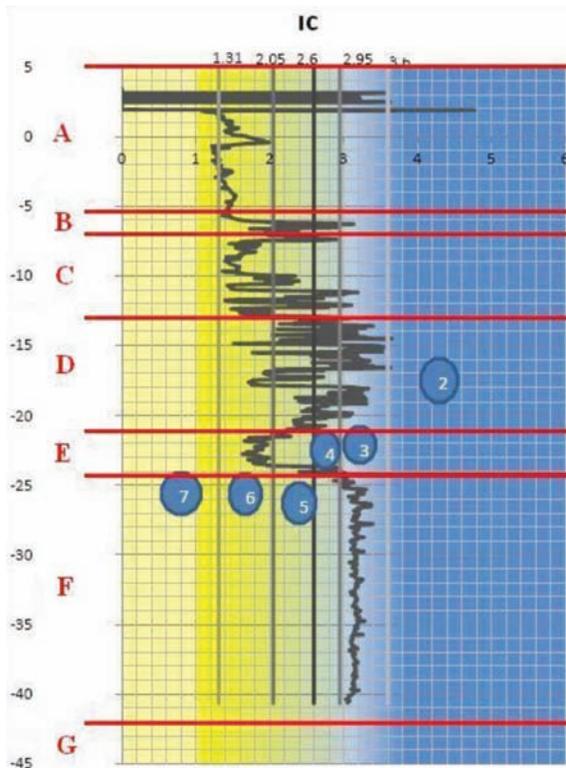


Fig. 8 – Perfil de I_c do ensaio CPTu 17a.

3.3 – Parâmetro de poro pressão B_q

Robertson (1990) apresentou os gráficos da Fig. 9, sendo que o primeiro relaciona resistência de ponta normalizada com razão de atrito normalizada e o outro relaciona a resistência de ponta com o parâmetro B_q , que leva em conta o excesso de poro pressão, onde:

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_n} = \frac{u_2 - u_0}{q_r - \sigma_{v0}} \quad (4)$$

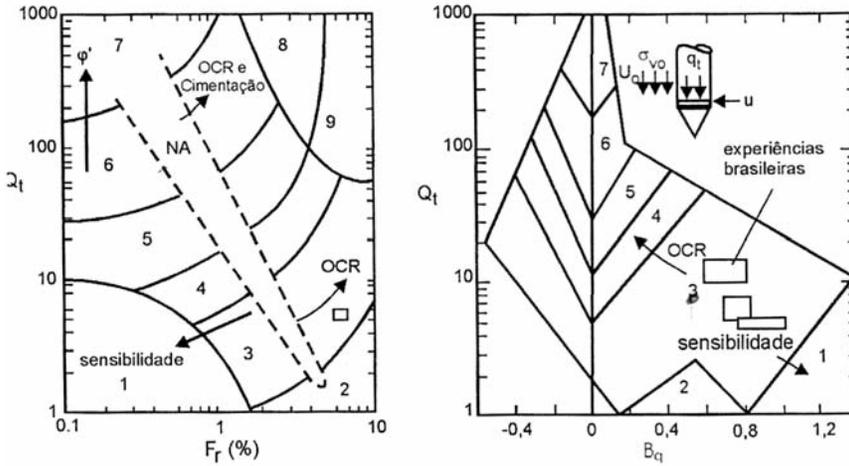


Fig. 9 – Gráficos $Q_t - F_r$ e $Q_t - B_q - SBT_N$ (Robertson, 1990).

Na Fig. 10 apresenta-se o perfil de B_q para o ensaio CPTu 17a, para o dique seco em Rio Grande. Observa-se bem o comportamento argiloso da camada de argila siltosa entre as cotas -24 e -41, e o seu estado levemente pré-adensado. Esse comportamento ficou também bem definido no perfil de I_c .

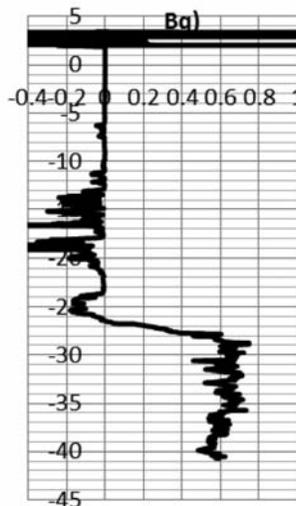


Fig. 10 – Perfil de B_q do ensaio CPTu 17a.

Na Fig. 11 reproduz-se os pontos obtidos do ensaio CPTu 17a para todas as profundidades, podendo-se distinguir bem o comportamento dos solos nas três camadas A, B e C, definidas em Dias *et al.* (2010). A Camada A é predominantemente arenosa (regressiva), a Camada B tem grande variabilidade de camadas (regressão com intercalações de transgressão), e a Camada C é argila siltosa (transgressiva) e fica toda compreendida na área 3 do gráfico, como trata a Fig. 9a (Robertson, 2010).

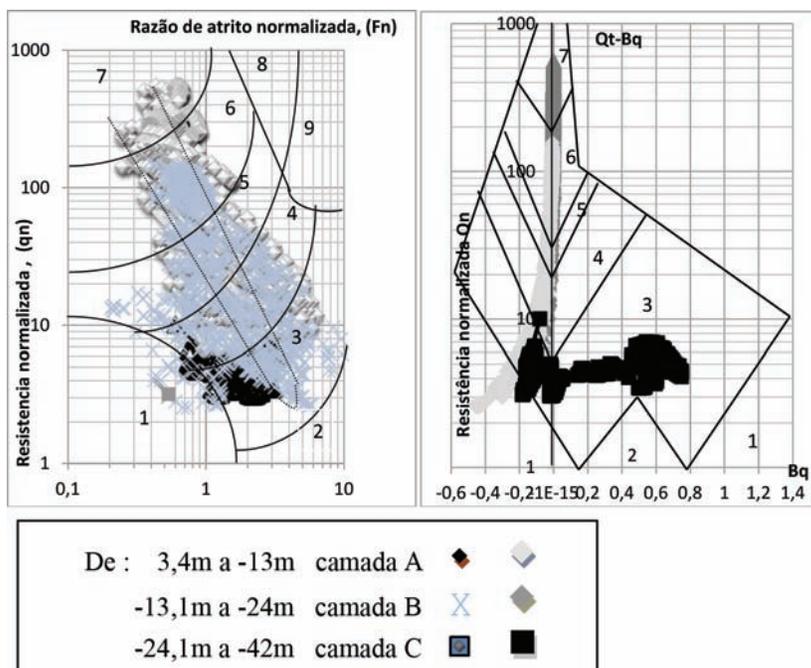


Fig. 11 – Gráficos: a) $Q_t - F_r$; b) $Q_t - B_q - SBT_N$ do ensaio CPTu 17a.

3.4 – Parâmetros indiretos

3.4.1 – OCR

No que importa à geotecnia e aos projetos de obras importantes que estão sendo implantadas na costa e nos portos, por exemplo, a busca da explicação para possível pré-adensamento de algumas camadas tem sido apresentada por Massad (1988). Sabe-se que durante períodos regressivos do nível do mar, a variação deste pode provocar aumento nas pressões efetivas em camadas de argilas que já se encontravam depositadas num local. Posteriormente, com a transgressão e possível elevação do mar, submergindo tais camadas, as pressões efetivas diminuirão e depreende-se que esse solo está pré-adensado. Por outro lado, como a argila siltosa dessa camada tem idades superiores a 6000 anos, certamente o adensamento secundário, que se constitui numa redução do índice de vazios com pressão efetiva constante, pode influir na pressão de pré-adensamento. Tem-se assim um solo envelhecido, que apresenta um comportamento correspondente ao de um solo sobreadensado.

Portanto a pressão de pré-adensamento obtida no ensaio de adensamento não corresponde à pressão de sobreadensamento no campo. Souza Pinto (2000) analisa esse fato e afirma que “*não existem argilas sedimentares normalmente adensadas sob o ponto de vista de comportamento*

tensão-deformação, a não ser argilas que tenham sido carregadas muito recentemente, por exemplo, pela construção de um aterro, e que não tiveram tempo de desenvolver recalques por adensamento secundário”. O mesmo autor ainda afirma que “correlações empíricas mostram que a razão de sobreadensamento dos solos sedimentares é tanto maior quanto mais plástico o solo, sendo da ordem de 1,4 para argilas com índice de plasticidade igual a 20 e de 1,7 para argilas com $IP=60$, para solos que tenham permanecido em repouso por um período de alguns milhares de anos”. Ensaio de laboratório em amostras retiradas de várias profundidades, na região do dique-seco do Estaleiro Rio Grande, podem ser vistos no Quadro 2, que apresenta valores de índice de plasticidade (IP) em várias cotas. Valores de OCR apresentados na tabela seguem ou confirmam a relação, considerada linear, acima referida.

Quadro 2 – Índice de plasticidade da argila siltosa no dique-seco.

Cotas em relação ao NM (m)	Índice de Plasticidade (IP)	OCR
-15,0	68	1,76
-28,2	26	1,44
-30,0	31	1,48
-35,0	41	1,56
-36,5	54	1,66

Tal fato explanado acima está bem caracterizado nas curvas obtidas dos ensaios de piezocone (Fig. 12), e nos triângulos assinalados em função de IP. Dessa forma, quando se compara os valores de razão de sobreadensamento obtidos de ensaios de adensamento de laboratório, que ficaram muito próximos da situação de solo normalmente adensado ($OCR=1$), com os obtidos nos ensaios de piezocone, que classificam o solo como levemente pré-adensado (OCR de 1,5 a 2,0), pode-se concluir que os ensaios de piezocone representam melhor o comportamento tensão-deformação real do solo.

Portanto, ao contrário do ensaio de adensamento em laboratório, que é muito demorado e necessita de amostras de excelente qualidade, o que nem sempre é possível, os ensaios *in situ* com piezocones podem apresentar resultados mais confiáveis e representativos do comportamento de campo.

Nos ensaios de piezocone pode-se obter a razão de sobreadensamento OCR , por exemplo, pela equação sugerida por Kulhawy e Mayne (1990), como na equação 5.

$$OCR = K \frac{q_t \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} = K \cdot Q_t \quad (5)$$

$K = 0,305$ (admitido como médio entre 0,2 e 0,5) – curvas na Fig. 12;

q_t - resistência de ponta do ensaio corrigida;

σ_{v0} - pressão total vertical;

σ'_{v0} - pressão efetiva vertical;

Q_t - q normal.

Na Fig. 12 apresenta-se o perfil de comportamento de OCR para o ensaio CPTu17a.

A análise da curva de variação de B_q com a profundidade também pode dar um excelente indicativo da história de tensões do solo. Isso pode ser visto na Fig. 10, que apresenta B_q da ordem de 0,5 a 0,7 para solos normalmente a levemente pré-adensados e B_q negativo em relação à poro

pressão hidrostática (u_0), como pode ser observado quando se têm argilas fortemente pré-adensadas ou siltes e areias siltosas muito compactas. Pode ser o caso do trecho entre cotas -12 e -22 do perfil analisado, comparando-se o gráfico da Fig. 10 com o da Fig. 12.

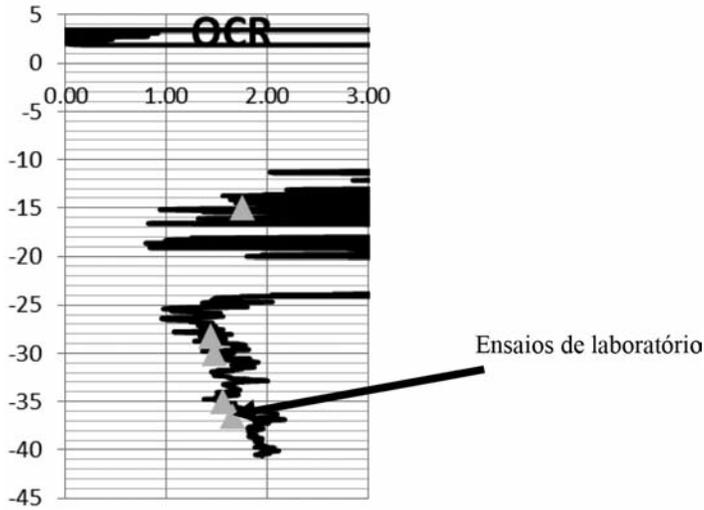


Fig. 12 – Perfil de OCR do ensaio CPTu17a.

3.4.2 – Resistência ao cisalhamento não drenada S_u

Na Fig. 13 vê-se o perfil de S_u , resistência ao cisalhamento não drenada, obtida através da equação 6. No presente caso utilizou-se um valor de N_{kt} igual a 18.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \tag{6}$$

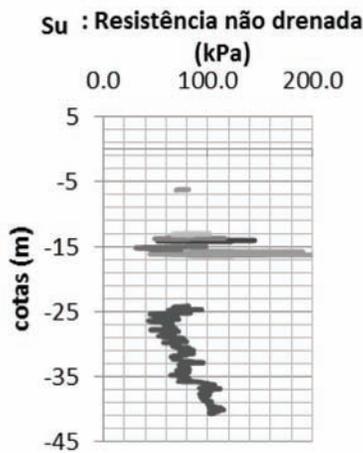


Fig. 13 – Perfil de S_u do ensaio CPTu17a.

Para argilas muito moles, onde se pode ter certa imprecisão na determinação de q_t , pode-se determinar S_u a partir do excesso de poro pressão, medido na gola do cone, e usando-se a expressão:

$$S_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (7)$$

$\Delta u = u_2 - u_0$;

$N_{\Delta u}$ varia entre 4 e 10. (Pode-se usar 10, para estimativas mais conservadoras).

4 – METODOLOGIA UTILIZADA NAS DATAÇÕES – CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

A detecção da atividade do C^{14} em amostras de origem ambiental pode ser realizada por três técnicas analíticas:

- 1) Espectrometria de Cintilação Líquida de Baixo Nível de Radiação de Fundo, em que amostras com aproximadamente 3g de C^{14} são sintetizadas em um sistema de vácuo em CO_2 , C_2H_2 e C_6H_6 e contadas por cintilação líquida;
- 2) Contador Proporcional Gasoso (CPG), em que amostras com aproximadamente 1g de C^{14} são transformadas em CO_2 , CH_4 ou C_2H_2 em sistema de vácuo e posteriormente contadas;
- 3) Acelerador de partículas acoplado a um espectrômetro de massa (*Accelerator Mass Spectrometry* – AMS), onde o carbono da amostra, aproximadamente 300 microgramas, apresenta-se na forma sólida (grafite). Os passos analíticos até a obtenção do CO_2 purificado são idênticos à cintilação líquida. Após, os átomos de carbono são ionizados, acelerados e contados (semelhante ao método aplicado pelo IF-UFF).

Embora esses métodos de datação por radiocarbono sejam capazes de gerar resultados de alta qualidade, eles são fundamentalmente diferentes em princípio. Os métodos de datação radiométrica detectam partículas beta da desintegração do C^{14} , enquanto que os espectrômetros de massas com aceleradores contam o número de átomos de C^{14} presentes na amostra.

Quaisquer destes métodos de datação por carbono têm vantagens e desvantagens. Os espectrômetros de massas detectam átomos de elementos específicos, de acordo com seus pesos atômicos. No entanto, os mesmos não têm a sensibilidade necessária para distinguir a linha isobárica atômica (átomos de elementos distintos com o mesmo peso atômico, tais como o C^{14} e o N^{14} - o isótopo mais comum do nitrogênio). Graças à física nuclear, os espectrômetros de massas foram aperfeiçoados para separar um isótopo raro de uma massa vizinha abundante, possibilitando o surgimento da Espectrometria de Massas com Aceleradores (AMS). O método foi desenvolvido para detectar C^{14} em uma determinada amostra e ignorar os isótopos mais abundantes que inundam o sinal do carbono 14. Há essencialmente duas partes no processo de datação por radiocarbono através de espectrometria de massas com aceleradores. A primeira delas inclui a aceleração de íon a energias cinéticas extremamente altas e, em seguida, realiza-se a análise da massa.

Vários tipos de amostras podem ser usadas na análise de radiocarbono por AMS, como conchas, carvão, madeira, ossos, amostras de solo, sementes e etc., mas para serem levadas ao acelerador é preciso que sejam convertidas a grafite de modo a produzir um feixe de íons. A produção de grafite de alta qualidade e uniforme é essencial para o melhor desempenho de qualquer sistema AMS. Antes do processo de grafitização, no entanto, a amostra deve passar por um tratamento químico para desprezar átomos de carbono que tenham aderido à amostra posteriormente e cuja idade não represente sua idade real ou ainda outros materiais que tenham aderido à amostra ao longo do tempo ou frações da própria amostra que podem interferir no

resultado (Santos *et al.*, 1999). O grau de contaminação afeta a acurácia dos resultados da datação por radiocarbono. Em geral, contaminação com material mais antigo pode fazer uma amostra parecer consideravelmente mais velha, enquanto a contaminação moderna pode fazer a amostra parecer significativamente mais jovem que a sua verdadeira idade. Assim, o pré-tratamento químico tem objetivo de isolar o carbono original em cada material.

Após o pré-tratamento, as amostras são preparadas para serem colocadas em um espectrômetro de massas com aceleradores, convertendo-as em grafite sólida pela conversão de dióxido de carbono com a grafitização imediata, na presença de um catalisador de metal. Quando as amostras tiverem sido convertidas em poucos miligramas de grafite, elas são pressionadas contra discos de metal. Os mesmos são montados em uma roda de comando para que possam ser analisados em sequência.

Íons de uma arma de cézio passam a ser disparados na roda de comando, produzindo átomos de carbono negativamente ionizados. Os mesmos passam através de dispositivos de enfoque, e de um ímã de injeção antes de alcançar o acelerador, onde são acelerados para o terminal positivo por uma diferença de voltagem de 250 kV.

Os átomos de carbono com carga positiva distanciam-se ainda mais do terminal positivo e passam por outro conjunto de dispositivos de enfoque, onde a massa é analisada. Na análise de massa um campo magnético é aplicado a essas partículas carregadas em movimento, o que faz com que as partículas se desviem do caminho que estão percorrendo. Se as partículas carregadas têm a mesma velocidade, mas massas diferentes, como no caso dos isótopos de carbono, as partículas mais pesadas são menos desviadas. Em seguida, detectores em diferentes ângulos de deflexão contam as partículas.

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 1000.

A espectrometria de massas com aceleradores também leva menos tempo para analisar o teor de carbono 14 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.

A AMS pode ser utilizada para determinar os níveis de abundância natural de carbono 14 em oceanos e também para determinar a idade de carbono de depósitos sedimentares, como foi o caso deste trabalho.

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste ítem são discutidos os dados da datação dos sedimentos e avaliados segundo uma hipótese para a interpretação da formação geológica do terreno. Também são traçadas comparações com pesquisas anteriores, em outro sítio da costa brasileira, em Caravelas-BA, um sítio litorâneo com características sedimentológicas quaternárias semelhantes ao da Planície Costeira no sul do Rio Grande do Sul, descritos na tese de doutorado de De Mio (2005). Ainda analisam-se os resultados dos ensaios de piezocone que foram efetuados no Superporto de Rio Grande/RS à luz da formação geológica local, e traça-se comparações com as datações efetuadas por Medeanic *et al.* (2000; 2001) para a região.

5.1 – Piezocone e estratigrafia

Como já mencionado, De Mío e Giacheti (2007) sugeriram o uso dos perfis de ensaios de piezocone para definir a estratigrafia de alta resolução de sequências de sedimentos do Quaternário na costa do Brasil. Baseando-se em ensaios de piezocone, analisaram três pontos da costa brasileira: Caravelas (Bahia), Guarujá (São Paulo) e Paranaguá (Paraná). Dos três pontos, há comportamento parecido nos dois primeiros sítios, mas há uma diferença na sequência de sedimentos no sítio de Paranaguá, relacionada com a curva de flutuação do nível do mar para aquela região.

Diante disso, passa-se a comparar os sítios cujo comportamento se aproxima mais do observado em Rio Grande, na região do Superporto: Caravelas na Bahia e Guarujá em São Paulo. Em ambos, de forma semelhante ao de Rio Grande, nota-se a formação de um estuário e de feixes de restinga influenciando a morfologia da costa. Em Rio Grande esses efeitos são mais pronunciados, visto que a Planície Costeira na região é muito ampla, bem como o embasamento cristalino só aparecendo em grande profundidade (cerca de 520 m). Além do fato de que o afloramento do cristalino está a mais de 60 km da costa, com um plano de mergulho de mais leve inclinação, propiciando um pacote de sedimentos sotopostos da ordem de 500 metros.

Desta forma, após analisar os perfis de Caravelas, Guarujá e Paranaguá, optou-se por comparar os perfis de Rio Grande com os de Caravelas.

De Mío *et al.* (2007) apresentaram, para o sítio de Caravelas, 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.

A região de Caravelas situa-se no litoral sul do estado da Bahia, instalada sobre sedimentos litorâneos. A formação dos sedimentos que constituem o perfil está intimamente ligada à história geológica de deposição e às variações do nível médio do mar (NMM) durante o Quaternário, conforme Andrade *et al.* (2003). É típico de extensas regiões da costa brasileira e corrobora os resultados de Martin e Suguio (1986) e Ângulo e Lessa (1997).

Andrade *et al.* (2003) caracterizam os sedimentos da região de Caravelas-BA, propondo um modelo evolutivo para formação da planície litorânea. O resultado de um ensaio de piezocone foi analisado considerando estas informações geológicas. As variações do NMM controlaram a formação dos ambientes de sedimentação. Tendo por base conceitos de interpretação geológica, pode-se afirmar que as unidades de mapeamento identificadas em superfície também devem ocorrer ao longo da secção vertical, refletindo as mudanças de posição dos ambientes de deposição em função das flutuações do NMM.

Em torno de 18 000 anos atrás, coincidindo com o U.M.G. (Último Máximo Glacial), o NMM encontrava-se a cerca de 120 m abaixo do nível atual, no máximo de fase regressiva marinha. A partir deste ponto, o NMM subiu continuamente até um máximo de aproximadamente 5 m acima do nível atual, há cerca de 5500 anos. Iniciou-se a partir deste ponto um rebaixamento do NMM até a cota atual, existindo evidências de rebaixamentos bruscos e novas elevações há cerca de 2800 e 4000 anos atrás. As variações hidrodinâmicas associadas às modificações do NMM alteram os ambientes de sedimentação e refletem-se nas características dos sedimentos.

O estudo geológico forneceu as informações necessárias para interpretação da estratigrafia a partir do resultado do ensaio de piezocone. Na Fig. 14 é apresentada a classificação dos sedimentos com base no resultado do ensaio de piezocone, abrangendo a identificação das transições, classificação segundo a proposta de Robertson *et al.* (1986).

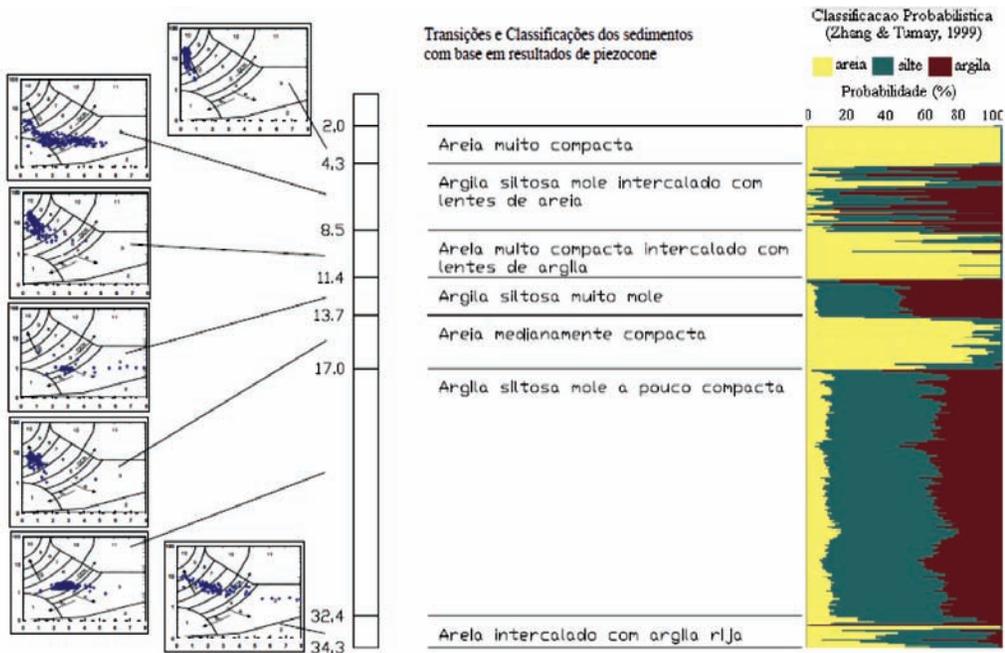


Fig. 14 – Perfil do subsolo de Caravelas-BA (extraída de De Mío e Giacheti, 2007).

A interpretação do ensaio de piezocone para a região de Caravelas-BA foi feita até a profundidade de 35 m, com o objetivo de identificar os sedimentos e testar as possíveis correlações com os ambientes e fácies mapeados por Andrade *et al.* (2003). A Fig. 15, a seguir, mostra o resultado do ensaio de piezocone, com os gráficos representando a resistência de ponta corrigida (q_t), o atrito lateral local (f_s), a poro-pressão (u), a razão de atrito ($R_f = f_s/q_t * 100$) e a razão de poro-pressão (B_q) que representa a poro-pressão com a remoção dos efeitos da coluna de água. São estabelecidas sete camadas.

As informações obtidas a partir da interpretação do ensaio de piezocone foram confrontadas com aquelas obtidas dos mapeamentos de superfície, sendo identificadas muitas correspondências. São reconhecidas três etapas distintas em correspondência às camadas identificadas a partir do ensaio. Cada conjunto, representado pelas Camadas (F, E), (D, C), (B, A), é composto por sequências transgressivas (sedimentos finos) e regressivas (sedimentos arenosos) em três ciclos que têm semelhanças com as variações do NMM, na região, durante o Quaternário. Conclusões mais detalhadas podem ser obtidas com amostragens e datações. O registro estratigráfico demonstra que ocorreram variações bruscas no NMM, com possibilidade de estarem ligadas às reduções do NMM há 4000 e 2500 anos A.P., corroborando a hipótese de Martin *et al.* (2003), em detrimento da hipótese de Ângulo e Lessa (1997).

Resumidamente, passa-se a apresentar cada uma das camadas, com algumas indicações sobre seus aspectos.

- **Camada G** – Constituída de sedimentos heterogêneos, com argilas siltosas com algumas lentes de areia. Seria indicativo de rápidas mudanças no ambiente, provavelmente por rápidas variações do nível do mar no fim da era da última regressão interglacial (cerca de 20 000 anos A.P.).
- **Camada F** – Argila siltosa, depositada em ambiente calmo e de baixa energia, provavelmente em lagos fechados.

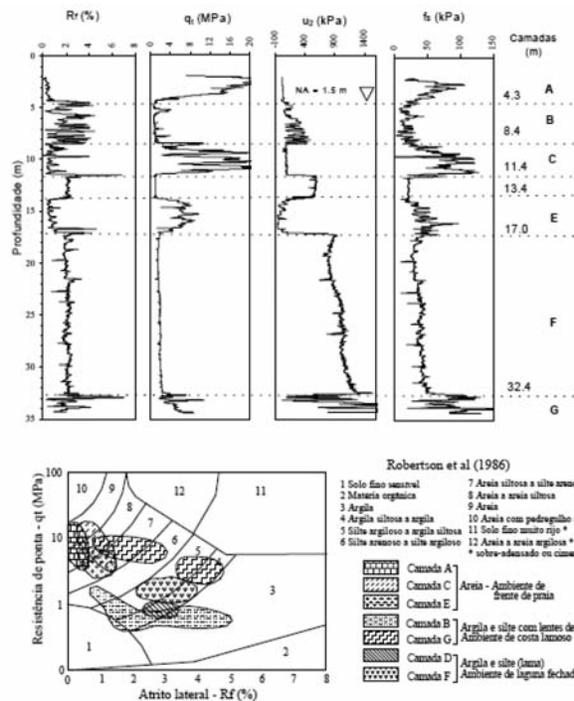


Fig. 15 – Resultado dos ensaios de piezocone e ábaco de Robertson (1990) para Caravelas-BA (De Mio e Giacheti, 2007).

- **Transição para camada E** – Marca um contato erosional bem definido pelos gráficos de poro pressão e razão de atrito. Para os autores, provavelmente ocorreu uma parcial erosão da camada F, relacionado com a descida do nível do mar a cerca de 4000 anos A.P.
- **Camada E** (-13,1 a -17m) – Composta por areia compacta que certamente se depositou por ocasião dessa descida do nível do mar.
- **Camada D** – Com a ocorrência de nova transgressão, sedimentaram-se argilas siltsosas, em ambiente calmo e são mais ou menos relacionadas ao fim de 3500 anos A.P.
- **Camada C** (-8,4 a -11,4m) – Composta de areias com finas lentes de materiais moles, denotando-se um ambiente praial, com detritos de materiais orgânicos.
- **Camada B** (-4,3 a -8,4m) – Composta de camadas de argilas siltsosas intercaladas por centimétricas (finas) camadas de areia.
- **Camada A** (2 a -4,3m) – Areia medianamente compacta.

Alguns aspectos importantes discutidos por De Mio e Giacheti (2007) são ressaltados para se comparar com os resultados obtidos em Rio Grande. Nas conclusões, aqueles autores confirmam as conclusões de Bezerra *et al.* (2003), que afirmam que variações na flutuação do nível do mar podem ser significativamente influenciadas por causas locais, principalmente por causa de histórias tectônicas diferentes. Por outro lado, variações de espessuras de camadas podem indicar que os agentes causadores foram os mesmos em duas regiões, mas o aporte de sedimento muda, possivelmente de acordo com diferenças na morfologia da costa, resultando numa sequência de sedimentos de fácies marcadas pelas flutuações do nível do mar.

Dias *et al.* (2008) 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, de acordo com o esquema mostrado na Fig. 16.

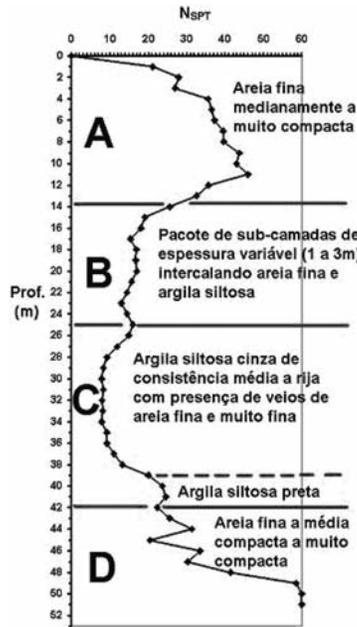


Fig. 16 – Perfil geotécnico representativo do terreno do Estaleiro Rio Grande no Superporto do Rio Grande obtido por SPT (Dias *et al.*, 2008).

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 (2005). Desta forma, após analisar os perfis de Caravelas, e por comparar os perfis de Rio Grande, obtém-se os seguintes resultados, como também pode ser observado na Figura 17.

- **Camada G** – Em Rio Grande situa-se abaixo das cotas -42m (profundidade de 45m). Os ensaios de piezocone atingiram somente a cota de -42m, no entanto, usando-se perfis de SPT mais profundos, da cota -42 até cota -60m, tem-se encontrado camadas de areia entre -42 e -48m e sucessão de camadas de argila siltosas duras (indicativo de fortemente pré-adensadas), de areias siltosas, novas camadas de argilas arenosas, sucessivamente. Além disso, diversas sondagens de simples reconhecimento têm indicado 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 metros. Na datação por C¹⁴ em amostra retirada a -42m, a idade foi de -12 000 anos A.P.

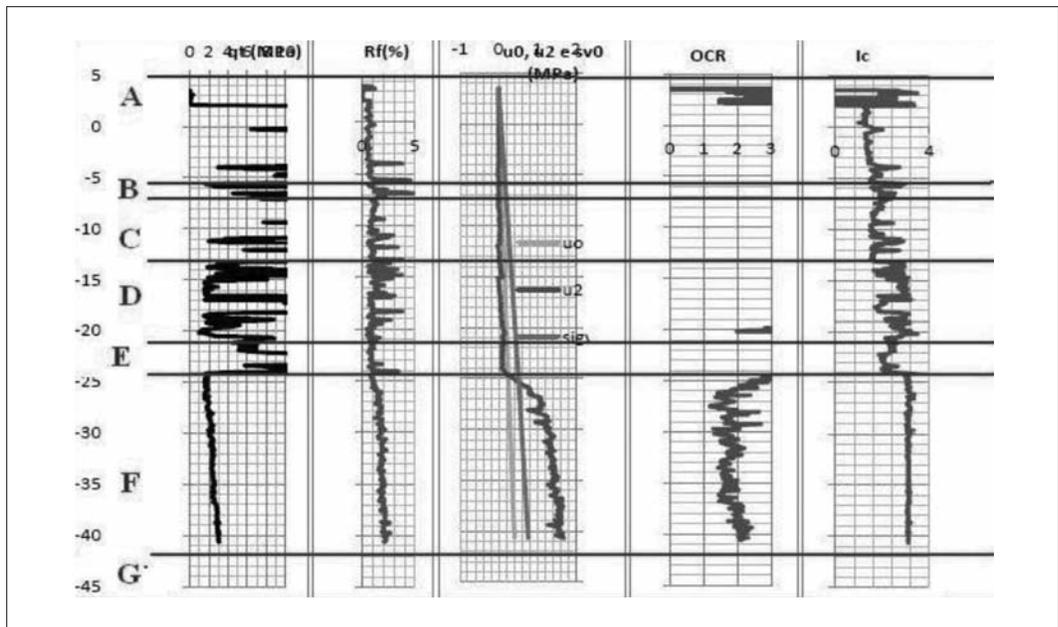


Fig. 17 – Nova divisão de camadas em função dos resultados de ensaios de piezocone para a sondagem CPTu 18.

- **Camada F** – Argila siltosa com comportamento não drenado no piezocone, muito homogênea, semelhantemente ao transcrito para o sítio Caravelas, diferindo na profundidade e espessura da camada (de -24 a -42m). 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: cota -40m – idade 8.841 anos A.P.; cota -36m - idade de 10 433 anos A.P. e cota -29m – 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.
- **Camada E** (-21m a -24m) – Composta por areia muito compacta. Esta camada pode ter surgido com mar descendo, a partir de 6000 A.P.
- **Camada D** (-13 a -21m): 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 – 15m indicou idade de 5206 anos A.P no ensaio do C^{14} .* Resultado muito parecido de datação é encontrado em Medeanic *et al.* (2009), que apresentam datação por C^{14} em amostra tirada à cota -20 m, num local em torno de 20km da costa atual da praia do Cassino, e a idade da amostra é de 4940 anos A.P.
- **Camada C** (-7 m a -13 m) – Areia medianamente compacta a compacta, com lentes de argila siltosa próximas à base da camada. Provavelmente esta camada é regressiva entre o período que vai de 3200 anos A.P. e 2800 anos A.P. A partir daí começa nova transgressão até cerca de 2200 anos A.P., formando-se a camada B de argila siltosa, intercalada por centimétricas camadas de areia (cota -5,5 m a cota -7 m).
- **Camada A:** areia regressiva medianamente compacta, que atingiu cotas em torno de +3,8 m, com formação de pequenas dunas.

5.2 – Resultados e discussões das datações por C^{14} para o sítio do Superporto de Rio Grande

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, e foram realizadas em colaboração com o Laboratório de Cronologia (LACRON) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF).

A seguir são apresentados dois quadros. O Quadro 3, revelando características das amostras de sedimento, dos furos de sondagem, e das profundidades e cotas por ocasião dos ensaios SPT realizados no dique seco do ERG no Superporto de Rio Grande. Além disso, o Quadro 3 apresenta os resultados das datações realizadas.

No Quadro 4 são apresentados os resultados das datações dessas seis amostras, indicando-se as respectivas profundidades e cotas.

Quadro 3 – Características das amostras do dique seco do ERG, no Superporto de Rio Grande dos ensaios SPT (Bastos, 2014).

Amostra	Furo	Prof. da amostra (m)	Cota (m)	N _{spt}	Descrição da amostra
1	SP 67	43,00 a 43,45	-39,85 a -40,30	10	Argila siltosa cinza de consistência média com presença de veios de areia branca muito fina e poucos fragmentos de concha
2	SP 67	43,00 a 43,45	-39,85 a -40,30	10	Argila siltosa cinza de consistência média com presença de veios de areia branca muito fina e poucos fragmentos de concha
3	SP 67	39,00 a 39,45	-35,85 a -36,30	8	Argila siltosa cinza de consistência média com presença de veios de areia branca muito fina
4	SP 68	18,00 a 18,45	-14,70 a -15,15	6	Argila siltosa cinza escura de consistência média com presença de veios de areia fina
5	SP 67	32,00 a 32,45	-28,85 a -29,30	9	Argila siltosa cinza de consistência média com presença de veios de areia branca muito fina
6	SP 68	45,00 a 45,45	-41,70 a -42,15	13	Argila siltosa preta rija com presença de muitos fragmentos de concha em decomposição e areia fina de cor preta

*Data das perfurações: SP 67 de 06/07/2007 a 20/07/2007; SP 68 de 28/08/2007 a 06/09/2007

Quadro 4 – Resultados das datações por carbono 14 (C¹⁴) (Bastos, 2014).

RESULTADOS DA DATAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARGILA DO SUPERPORTO DO RIO GRANDE						
AMOSTRA	1	2	3	4	5	6
IDENTIFIF LACUFF	12028	12041	12042	12062	12063	12064
IDADE	8441	6612	10433	5206	10006	11753
INCERTEZA	37	141	196	32	55	77
N. DA AMOSTRA	12P01A04A	12P01A04B	12P01A03	12P01A01	12P01A02	12P01A05B
PROFUNDIDADE (m)	43,2	43,2	39,2	18,2	32,2	45,2
COTA(m)	-40	-40	-36	-15	-29	-42
MATERIAL USADO	CONCHA	ARGILA	ARGILA	ARGILA	ARGILA	ARGILA

Medeanic *et al.* (2009) apresentam o furo de sondagem FS-20, situado na direção da Vila da Quinta (cerca de 20km da praia do Cassino), cujo perfil stratigráfico é apresentado na Fig. 18. O referido perfil foi estudado por meio de datação e demais estudos de paleontologia, e concluiu-se que sua formação se deu em ambiente de baía ou paleolaguna. Há evidências que tal perfil se deu durante a formação dos feixes de restinga (talvez o feixe 2 de Godolphim (Figura 19a). Na figura 19b é mostrada uma comparação com a situação atual.

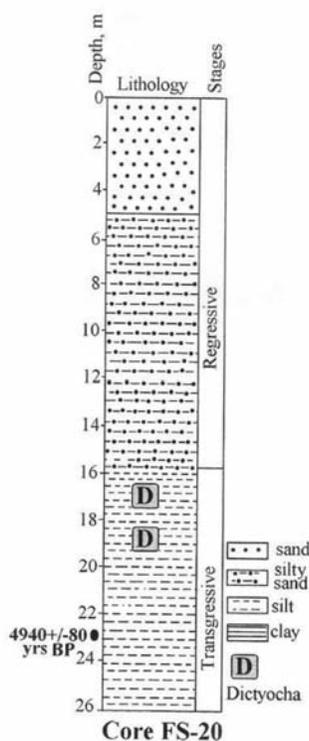


Fig. 18 – Perfil do furo FS-20 de Medeanic *et al.* (2009).



Fig. 19a – Situações de baía ou paleolaguna (\pm 5000 anos AP) (FS 20, de Meadenic).



Fig. 19b – Situação atual.

De Mio *et al.* (2007) mostraram uma tentativa de relacionar as diversas variações relativas do nível do mar no Holoceno com as idades de disposição dos sedimentos. Assim, é possível verificar, como Andrade *et al.* (2003), que teriam ocorrido duas reduções importantes no nível do mar: em 4000 anos AP e em 2500 anos AP, também já indicados em Martin *et al.* (2003). Apesar de verificarem-se divergências com outras correntes de pesquisadores, como em Ângulo e Lessa (1997), tem-se um entendimento que as hipóteses das reduções do nível do mar entre 5000 anos atrás e os dias atuais não se verificaram, pelos resultados do presente trabalho de datação, bem como em evidências de comportamento geotécnico de solos (principalmente por sua história de tensões), como se nota nas interpretações dos ensaios de piezocones e em análises de sondagens de SPT anteriores.

Na Fig. 20 mostra-se a tentativa de modelar nesse trabalho as curvas de variação do nível do mar, conforme Corrêa (1996) e Ângulo e Lessa (1997) (ver Figs. 3 e 4), e representar pontos referentes aos resultados de datações obtida no presente trabalho e por Meadenic *et al.* (2009). Na Fig. 21 apresenta-se a proposta de modelo para disposição das diversas camadas de solo que ocorreram durante o Holoceno.

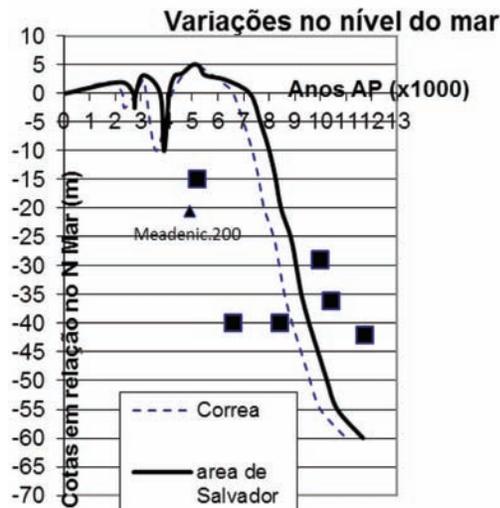


Fig. 20 – Flutuações do nível médio do mar.

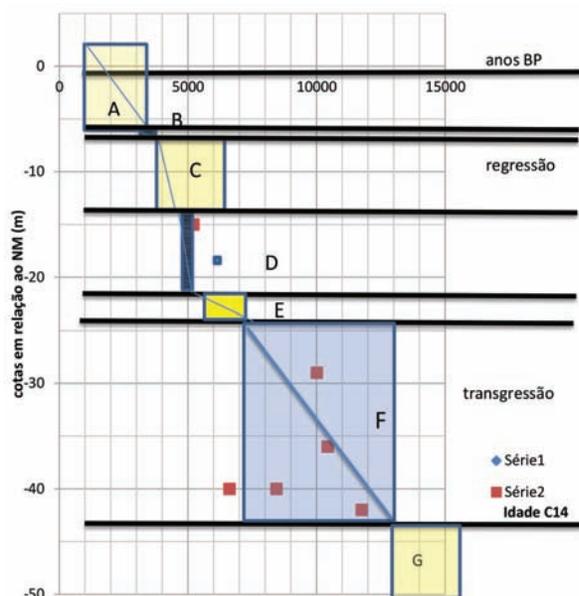


Fig. 21 – Modelo proposto para explicar as sedimentações em função das variações do NMM com as datações das amostras de sedimentos inclusas.

6 – CONCLUSÕES

Na análise estratigráfica de sedimentos, uma abordagem 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.

Nessa pesquisa relacionaram-se resultados de datação radiométrica do isótopo C^{14} , realizadas em amostras do perfil estratigráfico da região do Superporto de Rio Grande/RS que foram coletadas em várias profundidades (entre cotas -15 e -42m), na área do Estaleiro Rio Grande, usando o método de Espectrometria de Massa com Acelerador de Partículas (AMS), executado através de colaboração com o Laboratório de Cronologia (LACRON) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF), com um modelo teórico que buscou explicar a formação quaternária das diferentes camadas sedimentares.

Os estudos realizados tiveram como objetivo avaliar a influência da história geológica na interpretação dos ensaios de piezocone para identificação estratigráfica. Nos sedimentos, os resultados dos ensaios de piezocone foram eficazes na caracterização estratigráfica, na classificação dos mesmos e na estimativa de parâmetros de projeto a partir de correlações (Robertson, 1990; Douglas e Olsen, 1981). Nestes sedimentos foram observadas relações consistentes entre a história geológica de formação do perfil e as propriedades geotécnicas estimadas a partir da interpretação dos ensaios SPT e CPTu. Com isso, foi reafirmada a utilidade de usar o ensaio de prospecção geotécnica de cone com medida de poro pressão como método para definir a estratigrafia do sedimento do Quaternário conjugado com o adequado conhecimento

geológico do sítio e corroborado pelas datações radiométrica dos sedimentos, 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 estratigráfica 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.

Desta forma, conclui-se que o perfil é característico de amplas áreas do litoral brasileiro, em que a sua formação estratigráfica está intimamente ligada à história geológica de deposição e às variações do nível médio do mar, ocorridas durante o Quaternário. Nas superfícies de transição, no interior dos sedimentos, verifica-se contraste marcante entre as camadas silto-argilosas e camadas arenosas, tanto em sondagens SPT como em ensaios CPTu. 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 prescindem, pois se observa elevado nível de sensibilidade na identificação de camadas com essas dimensões, marcadas nos três principais sensores da ponteira cônica (q_c , f_{cs} , u). 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.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Cronologia (LACRON) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF), especialmente à Prof^a. Kita Macário, pela realização dos ensaios de datação, gratuitamente. O segundo autor agradece à CAPES, pelo suporte da bolsa de mestrado entre agosto de 2011 e julho de 2013.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A.C.S.; Dominguez, J.M.L.; Martin, L.; Bittencourt, A.C.S.P. (2003). *Quaternary evolution of the Caravelas strandplain – Southern Bahia State – Brazil*. Anais Acad. Bras. de Ciências, n. 75, v. 3, pp. 357-382.
- Ângulo, R.J.; Lessa, G.C. (1997). *The Brazilian sea level curves: a critical review with emphasis on the curves from Paranaguá and Cananéia regions*. Marine Geology, v.140, pp.141-166.
- Bastos, C.A.B.; Dias, C.R.R.; Goularte, C.L. (2010). *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.
- Bastos, E (2014). *Evolução e estratigrafia do terreno na região do superporto de Rio Grande/RS: análise com base em propriedades geotécnicas e variações do nível médio do mar*. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Eng. Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.

- Closs, D. (1970). *Estratigrafia da Bacia de Pelotas, Rio Grande do Sul*. Iheringia (Série Geologia), Porto Alegre, Brasil, n. 3, pp. 3-37.
- Corrêa, I.C.S. (1996). *Les Variations du Niveau de la Mer durant les Derniers 17.500 Ans BP: L'exemple de la Plateforme Continentale du Rio Grande do Sul, Brésil*. Marine Geology, v. 130, pp.163-178.
- De Mio, G.; Giacheti, H.L. (2007). *The use of piezocone tests for high-resolution stratigraphy of Quaternary sediment sequences in the Brazilian coast*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 79(1), pp. 153-170.
- De Mio, G. (2005). *Condicionantes Geológicas na Interpretação de Ensaio de Piezocone para Identificação Estratigráfica nas Investigações Geotécnicas e Ambientais*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 359p.
- 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, ABMS, São Paulo, v. 2, n. 2, pp. 27-37.
- Dias, C.R.R. (1993). *Parâmetros Geotécnicos da Argila Siltosa Mole da Cidade de Rio Grande – Região do Superporto*. Vetor, FURG, Rio Grande, v. 3, pp.19-34.
- Dias, C.R.R. (2001). *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, 29-49.
- Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B. (1997). *Argila Siltosa Marinha de Rio Grande/RS – Análise dos Dados Geotécnicos Aplicados às Obras Portuárias*, VI Congresso Brasileiro da ABEQUA, ABEQUA, Curitiba, pp. 53-57.
- 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/PT, Vol. 1, pp.375-382.
- Dias, C.R.R.; Bastos, C.A.B.; Pedreira, C.L.S.; Alves, A.M.L.; Schuler, A.R. (2008). *Avaliação da estratigrafia do subsolo do Superporto de Rio Grande/RS aplicada a obras geotécnicas*. 12^o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Anais ABGE, Porto de Galinhas, PE (meio digital).
- Dias, C.R.R.; Kerstner, V.W.T. (2003). *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, pp. 81-91.
- Dias, C.R.R.; Pedreira, C.L.S.; Lobo, B.O. (2004). *Previsão e Observação de Comportamento das Estacas de Mar da Obra de Remodelação do Porto Novo de Rio Grande*. SEFE V - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, ABEF/ABMS, São Paulo, v. 2, pp. 104-115.
- Douglas, B.J.; Olsen, R.S. (1981). *Soil classification using electric cone penetrometer*. Cone Penetration Testing and Experience. Proc. ASCE, St Louis, pp. 209-227.
- Godolphim, M. (1976). *Geologia do Holoceno Costeiro do Município de Rio Grande*. Dissertação de Mestrado. IG/UFRGS, Porto Alegre. 146p.

- 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. www.epri.com.
- Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. London: Blackie Academic & Professional.
- Martin, L.; Suguio, K. (1986). *Coastal Quaternary Deposits of the states of Paraná and Santa Catarina*. In: International Symposium on Sea Level changes and quaternary shorelines. São Paulo, 1986 Special Publication, v. 1, 124 p.
- Martin, L.; Dominguez, J.M.L.; Bittencourt, A.C.S.P. (2003). *Fluctuating Holocene sea level in eastern and southeastern Brazil: Evidence from multiple fossil and geometric indicators*. Journal of Coastal Research, 19 (1), pp. 101-124.
- Massad, F. (1988). *História Geológica e Propriedades dos Solos das Baixadas: Comparação entre Diferentes Locais da Costa Brasileira*. Simpósio sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras. ABMS/ABGE/IPR/CE, R.J., pp 3.1-3.34.
- Medeanic, S.; Marques-Toigo, M.; Toldo Junior, E.E. (2000). *The use of fossil algae for paleoenvironmental bioreconstruction during the Late Holocene in the Maquiné river valley, RS, Brazil*. Geociências, v. V, n. especial, pp. 168-172.
- Medeanic, S.; Dillenburg, S. (2001). *Novos dados palinológicos da transgressão marinha pós glacial em sedimentos da Laguna dos Patos, RS, Brasil*. Geociências, v. VI, n. 6, pp. 64-76.
- Medeanic, S.; Torgan, L.C.; Clerot, L.C.P.; Santos, C.B. (2009). *Holocene Marine Transgression in the coastal plain of Rio Grande do Sul, Brazil: palynomorph and diatom evidence*. Journal of Coastal Research, 25, 1, pp. 224-233.
- Robertson, P.K. (1990). *Soil classification using the cone penetration test*. Can. Geotech. J., 27, pp. 151-158.
- Robertson P.K.; Campanella, R.G.; Gillespie, D.; Greig J. (1986). *Use of piezometer cone data*, Proc. In-Situ-86, ASCE Specialty Conference, pp. 1263-1280.
- Robertson, P.K.; Campanella, R.G. (1988). *Guidelines for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for geotechnical design*. Report n. FHWA-PA-87-023-84-24, Federal Highway Administration. Washington.
- Robertson, P.K. (2010). *Soil behaviour type from the CPT: an update*. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, Vol. 2, pp. 575-583.
- Santos, G.M.; Gomes, P.R.S.; Yokoyama, Y.; Tada, M.L. di; Cresswell, R.G., Fifield, L.K. (1999). *Datação por ¹⁴C utilizando espectrograma de massas com aceleradores de partículas*. Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 14, n.1, pp. 18-26.
- Souza Pinto, C. (2000). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos. São Paulo.
- Suguio, K.; Tessler, M.G. (1984). *Planície de Cordões Litorâneos Quaternários do Brasil: Origem e Nomenclatura*. Restingas: Origem, Estrutura e Processos. Lacerda, L.D.; Araújo, D.S.D.; Turcq, B. (Eds.). Niterói, pp.15-25.