

Construção de um penetrômetro de queda livre para a caracterização de solos marinhos

Anderson L. Baldez¹, José A. S. Fontoura², Antônio M. L. Alves³

¹*Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, Brasil
anderbaldez@gmail.com*

²*Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, Brasil
josefontoura@furg.br*

³*Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, Brasil
antonioalves@furg.br*

RESUMO: Este trabalho trata do projeto, montagem e testes iniciais de um penetrômetro de queda livre, desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O projeto baseia-se no formato do aerofólio Joukowski simétrico, buscando-se a máxima eficiência hidrodinâmica durante o movimento de queda livre. O penetrômetro conta ainda com aletas direcionais, como auxílio na estabilização do equipamento durante seu movimento na água. O instrumento possui um acelerômetro, para registro do seu movimento durante a queda livre, impacto e penetração no solo marinho. Um cabo multiplexado leva o sinal do acelerômetro interno até o sistema de aquisição de dados, e uma corda sintética é utilizada para recuperação do penetrômetro após o lançamento. O penetrômetro foi testado em um depósito de lama muito mole, localizado no Yacht Club de Rio Grande. Os resultados dos testes atestam o bom desempenho do equipamento desenvolvido, o qual constitui-se em uma alternativa para caracterização superficial de solos marinhos ou localizados em ambientes inóspitos.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de Penetração por Queda Livre, Geotecnia Marinha, Resistência ao Cisalhamento, Aerofólio Joukowski simétrico.

ABSTRACT: This paper reports the project, assembly and initial tests of a free fall penetrometer which has been developed at the *Federal University of Rio Grande (FURG)*. The project is based on the design of the symmetric Joukowski airfoil and aims at achieving maximum hydrodynamic efficiency during the free fall movement. The penetrometer has directional fins in order to help the stabilization of the equipment in the water, and an accelerometer to register its movement during the free fall, the impact and the penetration in marine soil. A multiplex cable carries the signal of the internal accelerometer to the data acquisition system and a synthetic rope is used to bring the penetrometer back after launch. The equipment was tested on a very soft mud deposit located at the Yacht Club in Rio Grande, Brazil.

KEY WORDS: Free Fall Penetration Tests; Marine Geotechnics; Shear Strength; Symmetric Joukowski Airfoil.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização geotécnica de solos marinhos para projetos de engenharia costeiros e *offshore* apresenta diversas peculiaridades, em relação à caracterização de depósitos localizados em terra. Agentes ambientais, tais como ondas e ventos podem dificultar ou mesmo impedir a realização de procedimentos usuais de caracterização, tais como amostragem e ensaios *in situ* tradicionais.

No final da década de 1960 e início da década de 1970, surgiu a idéia de correlacionar a desaceleração de um projétil em queda livre com a resistência mobilizada durante o seu impacto e penetração no leito marinho (ref. [7, 8, 10]). Para isso, foi proposta a utilização de um acelerômetro para registrar os sinais de desaceleração durante o movimento do artefato.

Com o passar do tempo, uma série de diferentes tipos de equipamentos de penetração por queda livre passaram a ser desenvolvidos, destinados à medição da resistência do solo *in situ* através da análise da desaceleração imposta após o seu impacto com o fundo, ref.[2]. Os penetrômetros de queda livre têm procedimentos de operação bastante simples, podendo ser lançados de embarcações e até mesmo de aeronaves.

Este trabalho tem por objetivo a descrição do projeto, da montagem e dos resultados dos testes iniciais de um penetrômetro de queda livre, desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O projeto baseia-se no formato do aerofólio Joukowski simétrico, buscando-se a máxima eficiência hidrodinâmica durante o movimento de queda livre. O penetrômetro conta ainda com aletas direcionais, como auxílio na estabilização do equipamento durante o seu deslocamento na água. O acelerômetro e o sistema de aquisição de dados foram adquiridos da empresa *Vernier Software & Technology*. A usinagem das peças foi realizada na *Oficina J. Goulart Tornearia LTDA* (Rio Grande - RS). Um cabo multiplexado leva o sinal do acelerômetro interno até o sistema de aquisição de dados, e uma corda trançada é utilizada para recuperação do penetrômetro após o lançamento. O penetrômetro foi testado em um depósito de lama muito mole localizado no Yatch Club de Rio Grande, o qual está situado na área urbana da cidade de Rio Grande.

2 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

2.1 Definição do Formato

O corpo do penetrômetro foi construído no formato do aerofólio Joukowski simétrico, cujo desenvolvimento teórico admite escoamento sobre superfícies de corpos submersos em fluidos invíscidos, e estabelece condições de fluxo laminar ao longo da superfície do perfil. Uma das peculiaridades deste formato é a tendência natural de manutenção do seu eixo na direção do movimento. A escolha deste formato teve por objetivo alcançar a máxima eficiência hidrodinâmica durante o movimento de queda livre sob a água, mantendo a verticalidade do equipamento, além de reduzir a força de arrasto hidrodinâmico sobre o penetrômetro.

O aerofólio Joukowski simétrico é apresentado graficamente nas Figuras 1 e 2, onde a primeira figura apresenta o perfil no plano cartesiano e a segunda numa vista isométrica revolucionada.

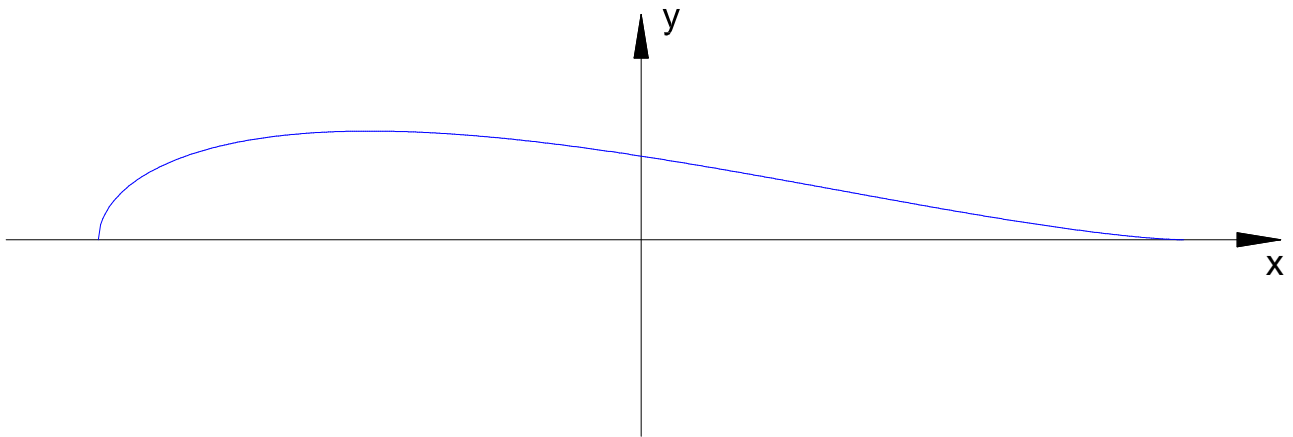


Figura 1. Perfil 2D do aerofólio Joukowski simétrico

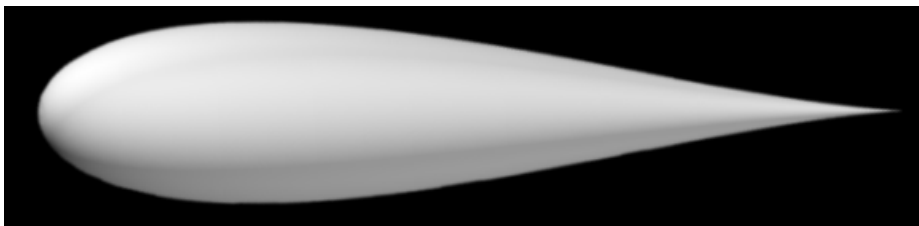


Figura 2. Perfil 3D do aerofólio Joukowski simétrico, revolucionado e renderizado

A geometria do perfil é representada matematicamente pela Equação (1) (ref. [5]):

$$\frac{y}{t} = \pm 0,385 \left(1 - 2 \frac{x}{L} \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{x}{L} \right)^2} \quad (1)$$

onde y representa o eixo no sistema do plano cartesiano referente às ordenadas, t é a largura máxima, x representa o eixo no sistema do plano cartesiano referente às abscissas, e o L é o comprimento.

Além de um formato hidrodinamicamente apropriado, o equipamento foi dotado também de aletas direcionais, como auxílio à manutenção do movimento vertical de queda livre na água.

2.2 Projeto e Montagem do Penetrômetro

O corpo do penetrômetro foi desenvolvido em duas partes. A primeira parte (nariz) abriga o acelerômetro e uma porção de chumbo granulado, incluído para conferir peso ao instrumento; a segunda parte (cauda) é dotada de um conector que liga o acelerômetro a um cabo de dados e daí a um computador portátil, que realiza a aquisição de dados.

O corpo foi construído em alumínio onde foram dispostos (i) o perfil hidrodinâmico (parte externa) para o escoamento do fluxo, (ii) as aletas para direcionamento e estabilidade durante a queda livre, (iii) a estruturação do espaço interno para a colocação do acelerômetro, do chumbo e dos conectores de ligação entre os cabos, (iv) as roscas para inserção de uma haste, para a fixação interna do acelerômetro, para abertura e fechamento para acesso à parte interna e para inserção de um parafuso que sofrerá tração através do cabo de recuperação do instrumento, (v) chanfros no perfil do aparelho, para a utilização de uma chave fixa de forma

a realizar aperto e desaperto da vedação e (vi) a construção do rasgo de posicionamento do anel de vedação (borracha) no corpo do penetrômetro.

Para formar a parte externa do corpo do penetrômetro no formato do aerofólio simétrico de Joukowski, a geometria expressa matematicamente pela equação (1) foi programada em planilha eletrônica, a fim de se obter uma sequência de pontos nos eixos das abscissas e das ordenadas, onde cada par de coordenadas corresponde à posição de um ponto no espaço cartesiano. Com a inserção em série deles no programa de desenvolvimento de desenho técnico, forma-se o perfil em escala podendo-se definir as estruturas do penetrômetro também em escala.

A Figura 3 mostra o desenho para usinagem das peças e também a representação esquemática do penetrômetro, com as posições de cada elemento no aparelho.

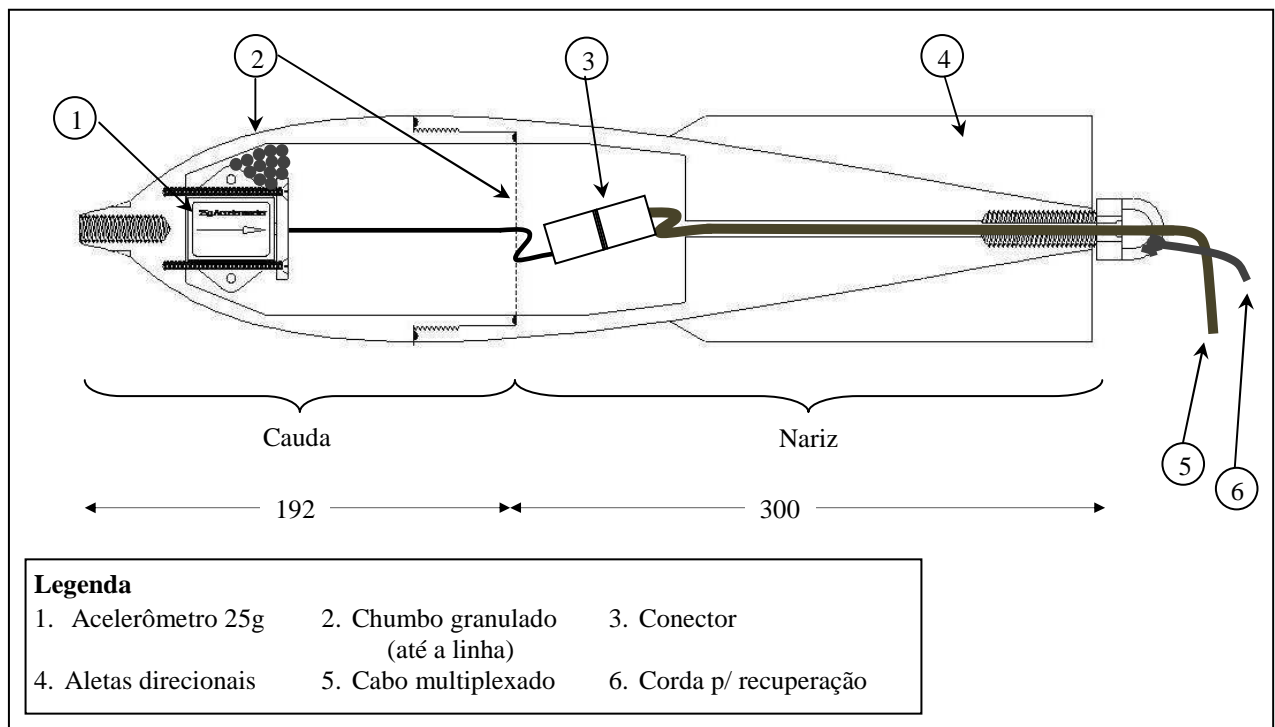


Figura 3. Esquema de disposição interna dos elementos no penetrômetro, dimensões em milímetros (adaptado de ref. [4])

O acelerômetro utilizado foi desenvolvido pela empresa *Vernier Software & Technology*. O acelerômetro registra variações de acelerações entre -25 g ($\cong -250 \text{ m/s}^2$) até $+25 \text{ g}$ ($\cong 250 \text{ m/s}^2$) com uma precisão de $\pm 2,45 \text{ m/s}^2$. O acelerômetro também é capaz de medir a aceleração da gravidade terrestre g (medida estática). Um sensor desta marca também foi utilizado por ref.[9] na construção de um outro modelo de penetrômetro de queda livre, tendo sido obtidos bons resultados.

O acelerômetro é centralizado na parte interna e fixado por uma pequena chapa de alumínio através de dois parafusos de aço inoxidável. O espaço interno restante é preenchido com chumbo granulado. A massa de chumbo inserida é de aproximadamente 4 kilogramas.

Na parte interna acima do nível do chumbo fica o conector, que realiza a ligação do cabo do acelerômetro ao cabo multiplexado de seis condutores o qual leva o sinal do sensor até o sistema de aquisição de dados.

O cabo multiplexado sai pela parte de trás do penetrômetro através de um parafuso inoxidável. Este parafuso está rosqueado e fixado com trava-rosca líquido, com o intuito de evitar a entrada de água nos filetes e também na câmara interna do penetrômetro. Sobre a

cabeça deste parafuso foi soldada uma alça inoxidável, na qual foi amarrada uma corda de fibra sintética para regate do penetrômetro. A abertura por onde passa o cabo multiplexado é selado com silicone a frio para prevenir a entrada de água.

A fotografia da Figura 4 mostra o corpo do equipamento já usinado e com as aletas soldadas na cauda. É possível observar no nariz do equipamento a base para fixação de uma haste rosqueável, também se podem observar os cabos de transmissão de dados e de recuperação do equipamento conectados na extremidade da cauda.

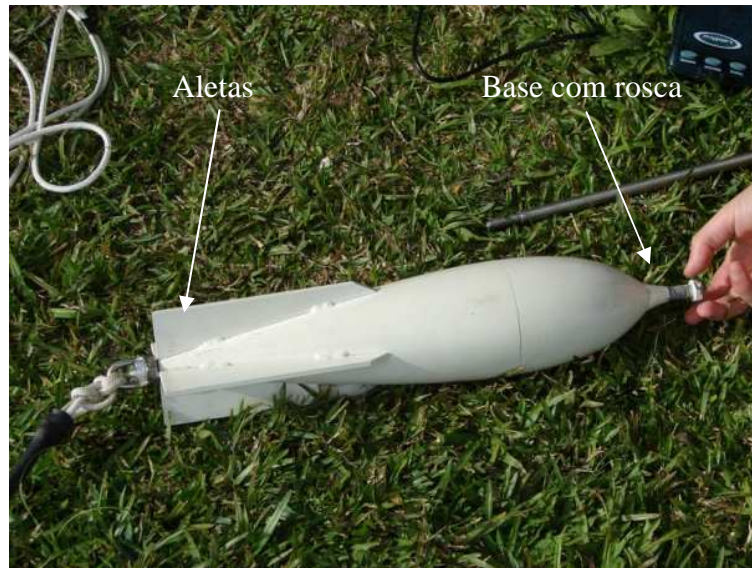


Figura 4. Corpo do penetrômetro pintado e com cabos de dados e de recuperação conectados.

O equipamento é completado com uma haste cilíndrica inoxidável, com 86 centímetros de comprimento, e uma sapata circular, rosqueável na ponta da haste. O diâmetro da sapata pode variar, de acordo com o tipo de solo a ser caracterizado; sapatas maiores devem ser utilizadas para solos de baixa resistência.

3 OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O sinal provindo do acelerômetro é convertido de um sinal elétrico para um fluxo de dados pelo LabPro®, o sistema de aquisição de dados. O LabPro®, também desenvolvido pela empresa *Vernier Software & Technology*, é um pequeno computador dedicado à tarefa de aquisição de dados e de controle do fluxo de saída deles. Contém um microprocessador capaz de se comunicar com um computador.

O Logger Pro 3, desenvolvido pela mesma empresa, é um programa que adquire e analisa os dados provindos do sistema de aquisição LabPro®. Sua aplicação destina-se à configuração dos parâmetros de aquisição do LabPro®, visualização do gráfico gerado pelo experimento e posteriormente exportação de dados para planilha eletrônica, para análise posterior.

Na Figura 5, pode ser visto o sistema de aquisição de dados e o computador portátil sendo submetidos ao procedimento de inicialização antes de um ensaio.

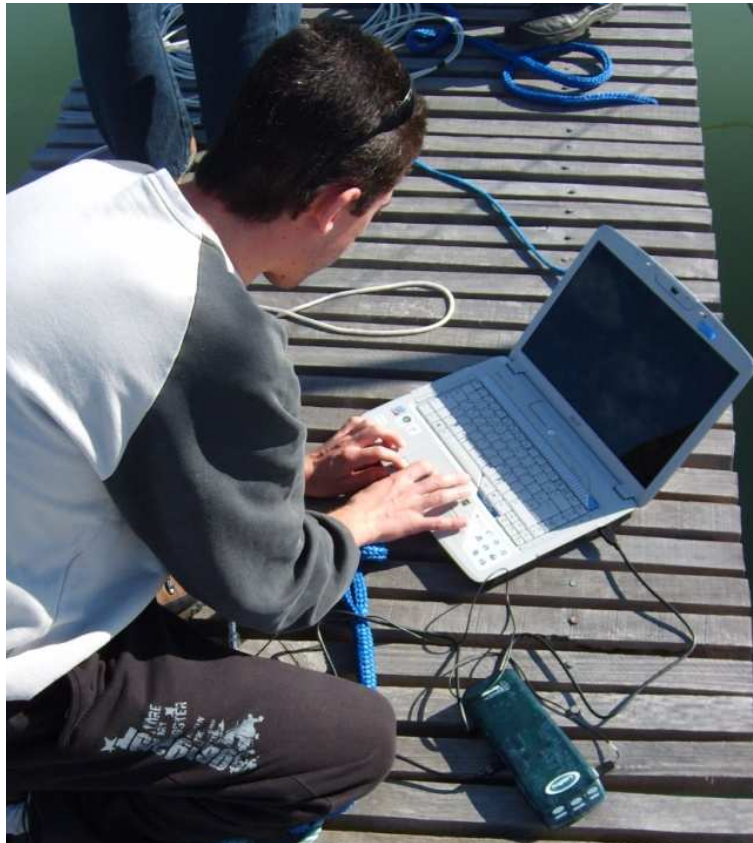


Figura 5. Equipamento sendo inicializado para ensaio.

A fotografia da Figura 6 mostra a operação de lançamento do equipamento em queda livre, em um ensaio.



Figura 6. Testes de lançamento com o penetrômetro construído.

4 RESULTADOS DOS TESTES DO EQUIPAMENTO

O equipamento desenvolvido foi submetido a testes iniciais na marina do Rio Grande Yacht Club, situado na área urbana da cidade de Rio Grande (Figura 7). A marina fica em uma das enseadas pertencentes à zona estuarina da cidade, denominada de Saco do Arraial. O solo encontrado no fundo da marina consiste em uma lama muito mole, conforme constatado no local durante os testes.



Figura 7. Localização da cidade do Rio Grande, e da área de testes (Imagens extraídas do Google Earth).

Foram realizados ensaios com o equipamento nas extremidades de três piers da marina, assinalados na Figura 7 com cruzeiros vermelhas. A lâmina d'água nestes locais variava entre 1,5 m e 2,0 m. Em cada ponto (designados por A, B e C), foram efetuados cinco lançamentos do penetrômetro.

Com os dados das variações de aceleração de cada lançamento devido ao impacto do penetrômetro com o leito marinho, são realizadas duas integrações numéricas através da regra dos trapézios. A primeira integração fornece a curva de velocidade no tempo, e a segunda integração resulta na curva de deslocamento do penetrômetro ao longo do tempo.

Nas Figuras 8, 9 e 10 são apresentados os resultados das variações de aceleração adquiridos em cada ponto de ensaio. Os gráficos também mostram a velocidade e o deslocamento do penetrômetro obtidos através da primeira e segunda integrações numéricas. Devido à boa repetitividade nos sinais obtidos nos lançamentos para cada ponto, apresentam-se nas figuras somente as curvas médias.

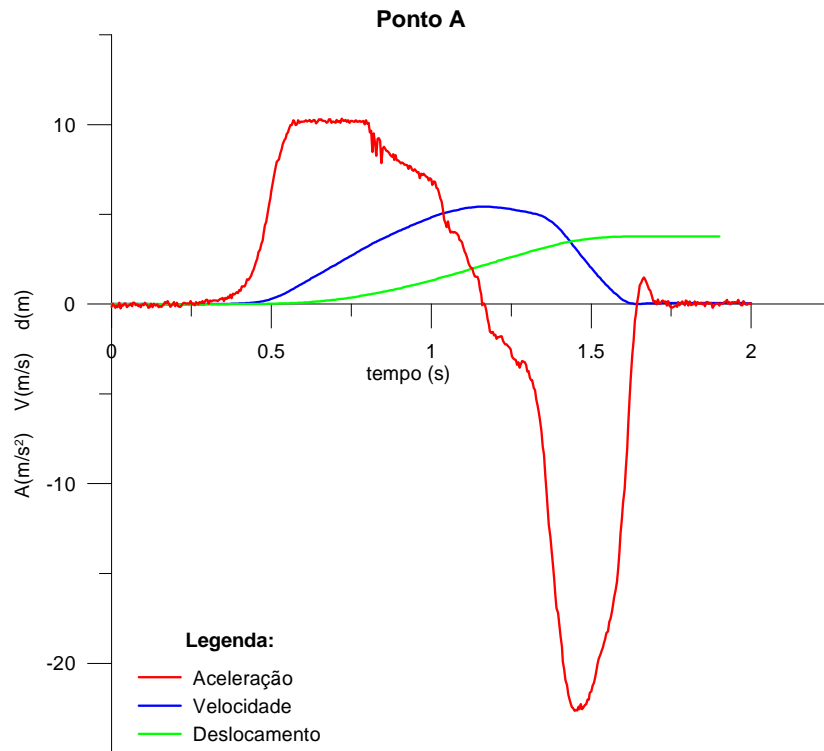


Figura 8. Sinais adquiridos no ponto designado por A (cada linha apresentada representa a média dos cinco lançamentos).

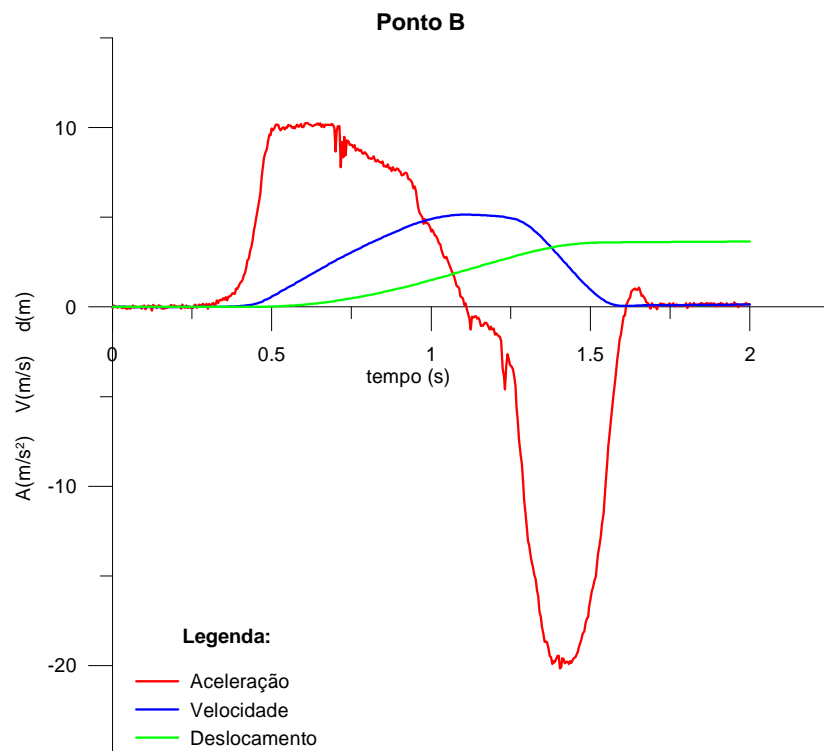


Figura 9. Sinais adquiridos no ponto designado por B (cada linha apresentada representa a média dos cinco lançamentos).

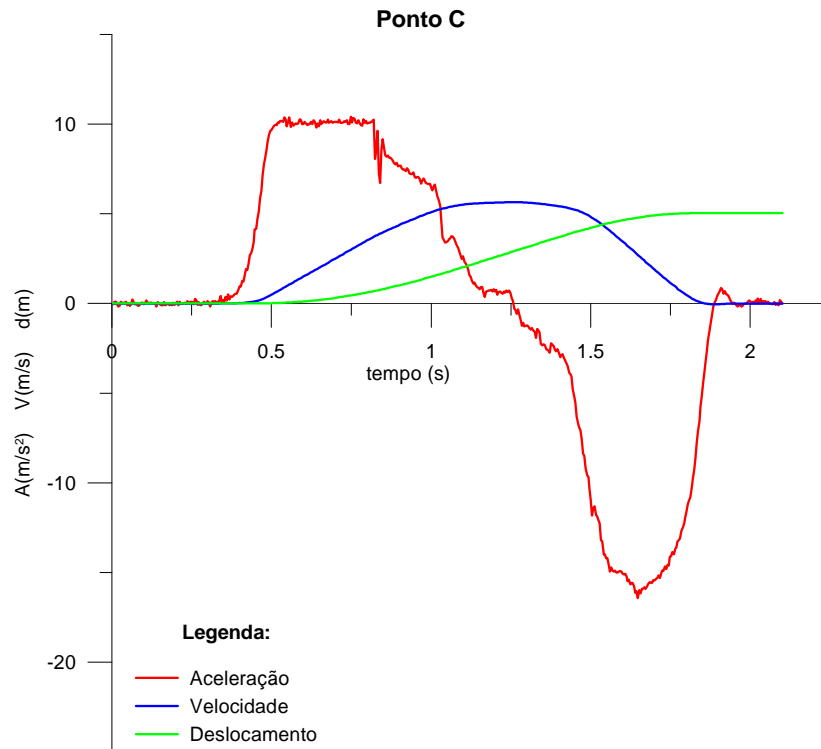


Figura 10. Sinais adquiridos no ponto designado por C (cada linha apresentada representa a média dos cinco lançamentos).

Observa-se que o pico de desaceleração durante a penetração do equipamento no solo atingiu aproximadamente 2,5 g (25 m/s^2) no ponto de ensaio A, tendo sido medidos valores de pico menores nos outros dois pontos de ensaio. Estes valores são relativamente baixos, quando comparados com resultados de equipamentos similares realizados em solos finos mais consistentes (ref.[3]).

No ponto C, devido à maior espessura de lâmina d'água o penetrômetro conseguiu atingir a sua velocidade terminal, que fica em torno de 5,7 m/s.

Em todos os ensaios nota-se uma oscilação no sinal de aceleração após o repouso do penetrômetro. Esta oscilação é uma consequência das propriedades elásticas dos sedimentos e pode ser usada para quantificar o módulo de elasticidade transversal do solo (ref.[1,6, 9]).

Os deslocamentos totais do penetrômetro após o repouso completo do equipamento foram medidos no momento dos ensaios, através da distância entre a base da sapata circular e a beirada dos piers, utilizando-se o cabo de recuperação como escala. Verificou-se uma boa concordância entre estas medidas e os valores obtidos na integração numérica, com erros inferiores a 3,5 %.

5 CONCLUSÕES

Descrevem-se neste artigo o projeto, a construção e os resultados dos testes iniciais de um penetrômetro de queda livre, dotado de instrumentação para medidas de aceleração. O equipamento desenvolvido constitui-se em excelente alternativa para aplicações na caracterização superficial de solos marinhos, por tratar-se de um instrumento de pequeno porte, leve e de fácil operação. Este tipo de equipamento reduz sobremaneira as dificuldades de logística e operação, enfrentadas na realização de procedimentos tradicionais de amostragem e de outros tipos de ensaios *in situ* em ambiente marinho.

O equipamento construído apresentou algumas inovações em relação ao estado atual da arte como, por exemplo, o formato do corpo (dimensionado de acordo com o aerofólio simétrico de Joukowski), o qual favorece a estabilidade do mesmo em torno do seu eixo vertical durante o processo de queda na coluna d'água. Isto permitiu uma significativa diminuição no tamanho das aletas direcionais e portanto no peso final do equipamento, uma vez que a responsabilidade pela estabilidade vertical passou a ser dividida entre as aletas e o novo formato do corpo.

Os testes preliminares demonstraram um bom comportamento das curvas indicativas da aceleração principalmente quando foram comparados os resultados medidos manualmente das distancias percorridas pelo penetrômetro e os valores posteriormente calculados a partir das citadas curvas.

6 AGRADECIMENTOS

Aos irmãos Marcelo Goulart e Ricardo Goulart pela execução do trabalho de construção, usinagem e montagem do penetrômetro em sua *Oficina J. Goulart Tornearia LTDA*.

À administração e aos colaboradores do *Rio Grande Yacht Club* por ceder o espaço das marinas para realização da pesquisa de campo com o penetrômetro.

A *CAPES* e ao *CNPq* pelo apoio financeiro.

7 REFERÊNCIAS

1. AKAL, T., STOLL, R.D. (1995). An expendable penetrometer for rapid assessment of seafloor parameters. Proceedings, Oceans '95 Conference, IEEE, 1822-1826.
2. ALVES, A.M.L. E DANZIGER, F.A.B. (2008). Geotechnical Characterization of Marine Soils by Means of Free-fall Penetration Tests - An Overview, 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, p. 351-358.
3. AUBENY, C. P.; SHI, H. (2006). Interpretation of impact penetration measurements in soft clay. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (6), 770-777.
4. BALDEZ, A.L. (2010). Construção e Testes de um Penetrômetro de Queda Livre para Caracterização do Perfil de Resistência ao Cisalhamento de Solos Marinhos, Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio Grande (FURG) [no prelo].
5. CURRIE, I.G. (2003). Fundamental Mechanics of Fluids. Third Edition, New York, USA, Marcel Dekker, Inc, 525 p.
6. DAYAL, U., ALLEN, J.H. (1973). Instrumented impact cone penetrometer. Canadian Geotechnical Journal, 10, 397-409.
7. PRESLAN, W.L. (1970). Accelerometer-Monitored Coring, Civil Engineering in the Oceans II, ASCE, p. 637-641.
8. SCOTT, R.F. (1970). In-place Ocean Soil Strength by Accelerometer, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, p. 199-211.
9. SPOONER, I.S., WILLIAMS, P. E MARTIN, K. (2004). Construction and Use of an Inexpensive, Lightweight Free-fall Penetrometer: Applications to Paleolimnological Research, Journal of Paleolimnology, Vol. 32, p. 305-310.
10. THOMPSON, L.J. E COLP, J.L. (1970). Application of Earth Penetration Technology to Ocean Bottom Penetration, 2nd Offshore Technology Conference, OTC 1203, Vol. 1, p. 511-576.