

Universidade Federal do Rio Grande  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

**CONSTRUÇÃO E TESTES DE UM PENETRÔMETRO DE QUEDA LIVRE PARA CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS MARINHOS**

ANDERSON LENA BALDEZ

Dissertação apresentada à comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

Rio Grande, Setembro de 2010

**CONSTRUÇÃO E TESTES DE UM PENETRÔMETRO DE QUEDA  
LIVRE PARA CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE  
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS MARINHOS**

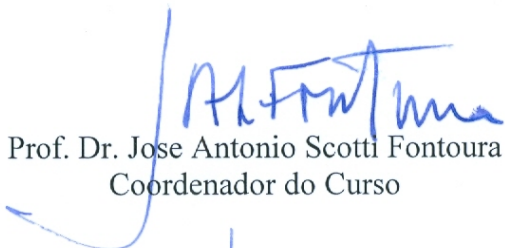
**ANDERSON LENA BALDEZ**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

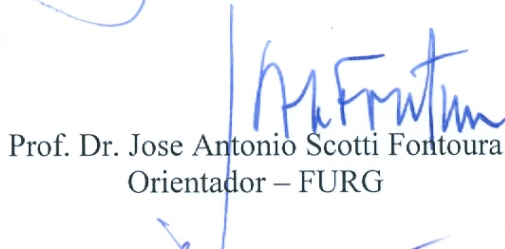
***MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA***

tendo sido aprovada em sua forma final pela Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

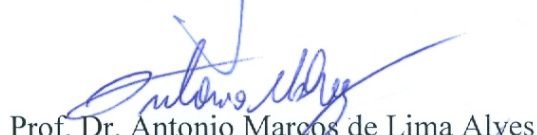
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Jose Antonio Scotti Fontoura  
Coordenador do Curso



Prof. Dr. Jose Antonio Scotti Fontoura  
Orientador – FURG



Prof. Dr. Antonio Marcos de Lima Alyes  
Co-Orientador – FURG



Prof. Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos  
FURG



Prof. Dr. Fernando Arthur Brasil Danziger  
UFRJ

“Imaginação é mais importante que o conhecimento”

Albert Einstein, 1879 - 1955

Físico Teórico; Premio Nobel 1921

“Um homem de sucesso é aquele que consegue  
construir suas fundações com os tijolos que os outros lhe jogam”

Sidney Greenberg, 1918 - 2003

Autor Rabino

## **AGRADECIMENTOS**

Ao realizar este trabalho passei por uma fase de aprendizado e recebi contribuições importantes.

A energia maior que nos rodeia me trazia tranquilidade e paz para enfrentar os desafios.

Aos meus pais (João e Rosa) e ao meu irmão (Alexandre) que sempre me apoiaram durante o desenvolvimento do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura que com sua amizade guiou-me com sabedoria e sempre soube dar dicas para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Marcos pela sua experiência me ensinou e me auxiliou na área de geotecnia marinha e costeira.

A Nilza Ibias, secretária da Comissão de Curso, “a bonitona do curso”, com sua simpatia e carinho sempre se dispôs a ajudar e apoiar as minhas atividades durante o curso.

Sou grato aos irmãos Marcelo Goulart e Ricardo Goulart que desenvolveram todo o trabalho de construção, usinagem e montagem do penetrômetro em sua Oficina J. Goulart Tornearia LTDA. Realizando o trabalho com muito capricho, dedicação, sempre me receberam muito bem e também compartilharam um lanchinho no final do dia em sua oficina.

Ao Paulo Novo e Adolfo Sá, “o baixinho”, técnicos do Laboratório Termofluídico pelos empréstimos de materiais aos quais auxiliaram na montagem e também pela realização da pintura do penetrômetro.

Aos amigos Alfrides Campos, Edilson Torma, Christian Serpa e Felipe Sprovieri pelas dicas e apoios para a realização deste trabalho.

A administração e aos colaboradores do Rio Grande Yacht Club por ceder o espaço das marinas para realização dos testes e coleta de dados com o penetrômetro.

A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro neste trabalho. A CAPES pela minha bolsa de estudo e ao CNPq por financiar a compra dos materiais necessários para construção do penetrômetro de queda livre.

**MUITO OBRIGADO A TODOS**

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento, construção e testes preliminares de um penetrômetro de queda livre para a caracterização de solos marinhos. O aparelho tem por finalidade medir as características de resistência do solo oceânico, através da medição e análise da desaceleração imposta ao penetrômetro após o seu impacto com o fundo. Este tipo de equipamento evita os elevados custos envolvidos em outros tipos de ensaios e na obtenção de amostras do fundo em condições de elevado risco e dificuldades naturais impostas pelas condições locais do mar. O dispositivo tem o formato de um aerofólio Joukowski simétrico (formato de gota), que consiste de duas partes: a primeira onde fica o acelerômetro e o chumbo granulado e a segunda onde há um conector que liga o acelerômetro a um cabo de dados e daí a um computador portátil que realiza a aquisição de dados. O penetrômetro pode ser lançado de certa altura acima da superfície da água, entra na água e mobiliza resistência hidrodinâmica durante a queda livre. Após choca-se contra o fundo marinho mobilizando resistências ao cisalhamento do solo sendo desacelerado até o repouso. Para os testes de funcionamento do equipamento foi utilizada a marina do Rio Grande Yacht Club localizado na cidade de Rio Grande - RS. Nos testes foram obtidos sinais de desaceleração registrados pelo acelerômetro que foram integrados numericamente duas vezes, a primeira obtendo dados de velocidade e na segunda dados de deslocamento percorrido pelo penetrômetro. Os dados assim coletados permitiram uma estimativa do perfil de resistência ao cisalhamento do solo marinho ao longo do comprimento penetrado, observando que o penetrômetro adquiriu a velocidade terminal sendo mensurada em torno de 5,7 m/s e o deslocamento máximo registrado obtido na marina foi de 5 metros.

**Palavras-chave:** Penetrômetro; Ensaio de Penetrômetro de Queda Livre; Resistência ao cisalhamento, Geotecnia Marinha, Aerofólio Joukowski simétrico

## ABSTRACT

This study aims at developing, constructing and testing a free fall penetrometer for the characterization of marine soils. The objective of this device is to measure the strength characteristics of the marine soil, through the measurement and the analysis of the deceleration imposed by its impact on the bottom. This kind of equipment reduces high costs involved in other tests and in the collection of samples on the bottom under bad sea conditions regarding risks and natural obstacles. The device was shaped as a symmetric Joukowski airfoil (the shape of a drop) which consists of two parts: one of them holds the accelerometer and the granulated lead and the other one has a connector that links the accelerometer to a data cable, and then, to a portable computer which collects the data. The penetrometer can be launched from a certain height above the water surface, and then penetrates into the water and mobilizes hydrodynamic resistance during the free fall. When it hits the bottom of the sea, it mobilizes shear strength and decelerates until it rests. The tests with the equipment were carried out in the marina at the Rio Grande Yacht Club located in Rio Grande, RS, Brazil. The tests got deceleration signals which were recorded by the accelerometer and were integrated twice numerically in order to collect data on the velocity and on the displacement of the penetrometer. These data enabled the estimate of the shear strength profile of the marine soil along the length in which penetration occurred. The data show that the velocity of the penetrometer reached about 5.7 m/s and that the maximum displacement recorded in the marina was 5 meters.

**Key words:** Penetrometer; Free Fall Penetrometer Test; Shear Strength; Marine Geotechnics; Symmetric Joukowski Airfoil.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	M
LISTA DE SÍMBOLOS.....	N
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Tema de estudo.....	16
1.2. Justificativa do estudo.....	16
1.3. Objetivo Geral.....	17
1.3.1. Objetivo Principal.....	17
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Estado Geral da Arte.....	19
2.2. Alguns Exemplos de Penetrômetros de Queda Livre Encontrados na Literatura.....	23
2.2.1. XBP – <i>Expendable Bottom Penetrometer</i> .....	23
2.2.2. XDP – <i>Expendable Doppler Penetrometer</i> .....	25
2.2.3. FFCPT – <i>Free Fall Cone Penetrometer</i> (Canadense).....	26
2.2.4. FFCPT – <i>Free Fall Cone Penetrometer</i> (Alemão).....	28
2.2.5. STING – <i>Seabed Terminal Impact Newton Gradiometer</i> .....	29
2.2.6. Penetrômetro de queda livre de baixo custo e peso.....	31
2.3. Alguns Exemplos de Usos de Penetrômetros de Queda Livre.....	32
2.4. Modelos para a Estimativa da Resistência do Solo a partir dos Sinais de Desaceleração.....	34
3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TESTES DO PENETRÔMETRO.....	37
4. METODOLOGIA.....	40
4.1. Bases do Projeto.....	40





6.3.2. Resultados gerados pelo programa FFP.....	114
7. CONCLUSÕES.....	117
8. RECOMENDAÇÕES.....	118
ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ARRASTO NO CORPO DO PENETRÔMETRO.....	119
ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DO PENETRÔMETRO .....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Sinais adquiridos com o penetrômetro de queda livre (adaptado de Scott, 1970)
- Figura 2.2 – MSP (adaptado de Colp *et al.*, 1970)
- Figura 2.3 – Representação em corte do penetrômetro de cone de impacto marinho (ICPT) (adaptado de Dayal *et al.*, 1973)
- Figura 2.4 – XBP diagrama conceitual (adaptado de Akal e Stoll, 1995)
- Figura 2.5 – XBP (adaptado de Aubeny e Shi, 2006)
- Figura 2.6 – XDP (adaptado de Thompson *et al.*, 2002)
- Figura 2.7 – FFCPT (adaptado de Osler *et al.*, 2006)
- Figura 2.8 – FFCPT (adaptado de Stegmann *et al.*, 2006)
- Figura 2.9 – STING (*A.G.O. Environmental Electronics Ltd.*)
- Figura 2.10 – Penetrômetro com cabo de aquisição de dados (Spooner *et al.*, 2004)
- Figura 2.11 – Interpretação do perfil de resistência ao cisalhamento (extraído de Aubeny e Shi, 2006)
- Figura 2.12 – Forças de atuação no projétil
- 
- Figura 3.1 – Localização da área de testes (Adaptado de Google Earth, 2009)
- Figura 3.2 – Mapa textural dos sedimentos de fundo do Saco do Arraial (extraído de Souza, 2002)
- 
- Figura 4.1 – Definição das partes do penetrômetro
- Figura 4.2 – Leme de Oertz (extraído de Fonseca, 1985).
- Figura 4.3 – Formato do aerofólio simétrico de Joukowski, baseado na equação 4.1
- Figura 4.4 – Aerofólio de Joukowski em vista isométrica
- Figura 4.5 – Modelo em escala reduzida do corpo do penetrômetro
- Figura 4.6 – Desenho do nariz em modelo reduzido
- Figura 4.7 – Desenho da cauda do modelo em escala reduzida
- Figura 4.8 – Usinagem da cauda do modelo em poliacetal
- Figura 4.9 – Nariz e cauda do modelo usinados no torno CNC
- Figura 4.10 – Modelo do penetrômetro

- Figura 4.11 – Estruturação das curvas sobre o perfil do nariz
- Figura 4.12 – Montagem das curvas sobre o perfil na cauda do penetrômetro
- Figura 4.13 – Vistas em perspectiva do penetrômetro antes da usinagem
- Figura 4.14 – Operação de corte do tarugo de alumino na serra fita
- Figura 4.15 – Centralização e faceamento da peça
- Figura 4.16 – Usinagem de desbaste e aproximação de medidas
- Figura 4.17 – Operação de usinagem sucessiva para construção da cavidade interna do nariz do penetrômetro
- Figura 4.18 – Conjunto de brocas helicoidais
- Figura 4.19 – Medidas finais da câmara do acelerômetro dadas por ferramenta de corte
- Figura 4.20 – Usinagem externa
- Figura 4.21 – Conclusão da usinagem do nariz do penetrômetro em torno comum
- Figura 4.22 – Fixação do nariz do penetrômetro e posicionamento da ferramenta
- Figura 4.23 – Processo de usinagem no torno CNC do nariz do penetrômetro
- Figura 4.25 – Peça finalizada (nariz do penetrômetro)
- Figura 4.26 – Corte do tarugo de alumínio para construção da cauda
- Figura 4.27 – Operação de limpeza e desbaste da peça
- Figura 4.28 – Operação de usinagem da cavidade interna
- Figura 4.29 – Processo do rosqueamento interno
- Figura 4.30 – Processo de usinagem da cauda no torno CNC
- Figura 4.31 – Cauda do penetrômetro ainda fixada no torno CNC
- Figura 4.32 – Corpo do penetrômetro
- Figura 4.33 – Montagem das aletas direcionais
- Figura 4.35 – Corpo do penetrômetro pintado com tinta para galvanizado e alumínio
- Figura 4.36 – Dimensões e roscas da haste em milímetros
- Figura 4.37 – Desenho com as dimensões das sapatas
- Figura 4.38 – Vista do acelerômetro utilizado neste trabalho
- Figura 4.39 – Interface do *LabPro*®
- Figura 4.40 – Ambiente do Programa *Logger Pro 3*
- Figura 4.41 – Interface de informações
- Figura 4.42 – Fixação do acelerômetro ao nariz do penetrômetro
- Figura 4.43 – Vista da alça de conexão do penetrômetro ao cabo de resgate e a passagem do cabo multiplexado

Figura 4.44 – Desenho completo do corpo do penetrômetro mostrando a disposição dos diferentes componentes internos

Figura 4.45 – Sapata de 50 milímetros de diâmetro fixada na ponta da haste

Figura 4.46 – Fixação do conjunto haste-sapata ao corpo do penetrômetro

Figura 4.47 – Penetrômetro montado e pronto para utilização

Figura 4.48 – Inicialização dos sistemas e conexão do *LabPro*® ao computador

Figura 4.49 – Barra de ferramentas do programa *Logger Pro 3*

Figura 4.50 – Janela de configuração do *Logger Pro 3*

Figura 4.51 – Configuração dos parâmetros para coleta de dados

Figura 4.52 – Posicionamento para o lançamento

Figura 4.53 – Medição manual do deslocamento vertical do penetrômetro

Figura 4.54 – Medição do deslocamento com a trena

Figura 4.55 – Penetrômetro lavado com água doce

Figura 5.1 – Resultado do trabalho de construção do penetrômetro

Figura 5.2 – Representação gráfica da integração por meio da regra dos trapézios

Figura 5.3 – Registros da variação da aceleração obtidos no ponto A

Figura 5.4 – Valores de velocidade obtidos no ponto A por meio da primeira integração numérica

Figura 5.5 – Valores de distância total percorrida pelo penetrômetro obtido no ponto A por meio da segunda integração numérica

Figura 5.6 – Registros da variação da aceleração obtidos no ponto B

Figura 5.7 – Valores de velocidade obtidos no ponto B por meio da primeira integração numérica

Figura 5.8 – Valores de distância total percorrida pelo penetrômetro obtido no ponto B por meio da segunda integração numérica

Figura 5.9 – Registros da variação da aceleração obtidos no ponto C

Figura 5.10 – Valores de velocidade obtidos no ponto C por meio da primeira integração numérica

Figura 5.11 – Valores de distância total percorrida pelo penetrômetro obtido no ponto C por meio da segunda integração numérica

Figura 5.12 – Sinais de desaceleração pela profundidade de penetração no solo obtidos no ponto A

Figura 5.13 – Sinais de desaceleração pela profundidade de penetração no solo obtidos no ponto B

Figura 5.14 – Sinais de desaceleração pela profundidade de penetração no solo obtidos no ponto C

Figura 6.1 – Posicionamento do penetrômetro ao longo do tempo para o lançamento 1 no ponto C

Figura 6.2 – Interface de utilização do programa

Figura 6.3 – Arquivo de entrada no programa

Figura 6.4 – Arquivo de velocidade medida

Figura 6.5 – Resistência ao cisalhamento dos sedimentos na marina do Rio Grande Yacht Club

Figura 6.6 – Resistência ao cisalhamento na lama da Praia do Cassino

(extraído de Reed *et. al*, 2009)

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 – Tabela com pontos a serem utilizados na programação do torno CNC para construção do modelo reduzido

Tabela 4.2 – Pontos a serem utilizados na programação do torno CNC para construção do nariz do penetrômetro

Tabela 4.3 – Pontos a serem utilizados na programação do torno CNC para construção da cauda do penetrômetro

Tabela 6.1 – Valores (em metro) referentes ao nível da água em relação ao atracadouro

Tabela 6.2 – Valores (em metro) referentes ao deslocamento do penetrômetro em relação ao comprimento da haste em consideração ao nível da água.

Tabela 6.3 – Valores (em metro) correspondentes à profundidade do leito marinho em relação ao atracadouro

Tabela 6.4 – Valores (em metro) correspondentes ao deslocamento da sapata no solo em relação ao corpo do penetrômetro na água

Tabela 6.5 – Valores (em metro) referentes à distância máxima percorrida pelo penetrômetro

Tabela 6.6 – Valores recomendados para sensibilidade dos sedimentos

(adaptado de Beard, 1981)

Tabela 6.7 – Valores das constantes usadas para o modelo de True, 1976

(adaptado de Rocker, 1985)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – área

$A_B$  – área da base

$A_S$  – área lateral

$C_0$  – constante empírica de taxa de deformação

$C_e$  – coeficiente empírico da taxa de deformação

$C_D$  – coeficiente de arrasto

$\frac{d^2z}{dt^2}$  – desaceleração no projétil

$D$  – diâmetro

$E$  – empuxo

$e$  – espessura

$F$  – força de resistência do solo

$F_B$  – força de resistência dinâmica de ponta

$F_C$  – força elástica no cabo de recuperação

$F_D$  – força de arrasto

$F_L$  – força lateral

$F_P$  – força de ponta

$F_S$  – força de resistência dinâmica lateral

$f_v$  – fator de velocidade de deformação

$g$  – aceleração de gravidade

$K_L$  – coeficiente genérico de viscosidade

$L$  – comprimento

$m$  – massa

$N_c$  – fator de capacidade de carga

$\rho$  – densidade

$S$  – sensibilidade do solo

$S_e$  – máximo fator tensão de taxa de deformação

$s_u$  – resistência ao cisalhamento não drenado do solo

$v$  – velocidade

$v_o$  – velocidade inicial

$V$  – volume

$w_b$  – peso submerso

$w_p$  – peso do penetrômetro

$x$  – eixo das abscissas no plano cartesiano

$y$  – eixo das ordenadas no plano cartesiano

$z$  – eixo das cotas no plano cartesiano



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Tema de estudo

A caracterização de solos marinhos traz peculiaridades que a distinguem enormemente da caracterização de depósitos localizados em terra. A realização dos ensaios tradicionais ou procedimentos de amostragem podem apresentar dificuldades relativas à logística e operação devido à profundidade da lamina de água e as condições ambientais como ondas e ventos (Alves e Danziger, 2008). Se necessário retirar uma amostra indeformada de solo em uma determinada região e o solo apresentar baixa resistência ao cisalhamento como lamas muito moles ou areias fofas não haverá como manter o solo no interior de um amostrador sem alterar suas características geomecânicas para realização de teste em laboratório.

Nestas condições, há outros métodos alternativos de ensaio para a caracterização de solos marinhos.

Scott (1967) foi o primeiro pesquisador que relacionou a desaceleração de um amostrador de queda livre, utilizando um acelerômetro, com as variações das características sedimentares marinhas durante o impacto e penetração do mesmo no solo.

Os penetrômetros de queda livre são equipamentos destinados a realizar medições das propriedades físicas do solo *in situ* (Dayal *et al.*, 1975). São instrumentos que em seu interior possuem um acelerômetro e através da integração dos sinais de desaceleração no tempo obtêm as curvas de velocidade e deslocamento indicando a profundidade de penetração e por correlação permite estimar os parâmetros de resistência do solo.

## 1.2. Justificativa do estudo

A utilização de penetrômetros de queda livre facilita as operações de campo por tratar-se de um instrumento de pequeno porte quando comparado com técnicas tradicionais de medição das características de resistência ao cisalhamento do solo oceânico, por ser estanque

e construído em material inoxidável e por evitar os elevados custos na obtenção de amostras do fundo em condições de elevado risco devido às dificuldades naturais impostas pelas condições locais do mar.

Com o uso desse instrumento de medição há a possibilidade de caracterizar os solos oceânicos superficiais para diversas aplicações, tais como: (i) a instalação de cabos submarinos entrancheirados como proteção para o caso de atividades pesqueiras e ancoragem; (ii) projetos de fundações superficiais de cais de atracação e dragagens de canais de acesso em portos; (iii) plataformas de petróleo, no caso das amarrações das plataformas fixas e flutuantes e também na perfuração de poços; (iv) na análise da movimentação de sedimentos para determinação de parâmetros na proteção e erosão costeira; (v) no projeto de instalação de âncoras e (vi) de artefatos militares.

O projeto, construção e montagem de um penetrômetro de queda livre será importante se essas informações contribuírem para melhoria da qualidade, segurança e custo das obras de engenharia no mar e também auxiliarem no entendimento da intervenção humana nos fenômenos e processos que acontecem na costa.

### **1.3. Objetivo Geral**

Contribuir para o desenvolvimento de tecnologia nacional de caracterização geotécnica de solos marítimos e oceânicos com a utilização de penetrômetro de queda livre.

#### **1.3.1. Objetivo Principal**

Projeto, construção e teste de um penetrômetro de queda livre para a caracterização de solos oceânicos.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Projetar o formato do penetrômetro em formato de “gota”, utilizando a teoria do aerofólio Joukowski simétrico;
- Determinar os parâmetros de processo para usinagem do corpo de penetrômetro utilizando um torno de comando numérico – CNC;
- Fazer a usinagem de um modelo em plástico em pequena escala para a verificação do formato;
- Fazer a usinagem do protótipo em alumínio em todos os seus detalhes projetados
- Montar o sistema eletrônico embarcado no corpo do penetrômetro e realizar pequenos testes para verificação dos sinais gerados em conexão com o sistema de armazenamento de dados.
- Testar *in situ* o penetrômetro e comparar os sinais obtidos para verificar se estão condizentes com as teorias existentes.
- Estimativa do perfil de resistência do solo ensaiado ao longo da profundidade

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Estado Geral da Arte

O problema do impacto de penetração nos materiais é tratado classicamente na teoria de balística. Historicamente o problema se apresenta desde o início do século 15 e desde muito uma grande quantidade de dados, informações e trabalhos de pesquisa tem sido publicados na literatura abordando aspectos teóricos e experimentais. O objetivo principal destes trabalhos tem sido determinar a profundidade de penetração de um projétil para prover a proteção passiva ou bombardear abrigos de pessoal e instalações subterrâneas (Robertson, 1941).

Com o avanço dos estudos se verificou a importância deste tipo de ciência nas técnicas de engenharia, principalmente com aplicações *in situ*, para determinação das características do solo como em depósitos sedimentares localizados em locais de difícil acesso, por exemplo, em solos lunares, selvas e ambientes marinhos (Dayal e Allen, 1973).

A utilização de artefatos de queda livre dotados de instrumentação para determinação das características mecânicas do solo data o final da década de 1960. Scott (1967) sugeriu a instalação de um acelerômetro unidirecional em um amostrador de queda livre de forma a medir a desaceleração durante o movimento de cravação do equipamento no solo. Com a aquisição do sinal de desaceleração no tempo era possível pela primeira integração obter a curva de velocidade e integrando novamente adquirir a curva de deslocamento no tempo. Assim determinando, por medição indireta, a profundidade de penetração do amostrador no solo do fundo oceânico. A partir dos sinais de desaceleração foi proposto pelo autor um método de análise para estimar a resistência do solo. A figura 2.1 apresenta as curvas de aceleração, de velocidade e de deslocamento em uma medição realizada pelo próprio autor utilizando um amostrador de queda livre com 6,93 metros de altura e com 7,3 centímetros de diâmetro externo.

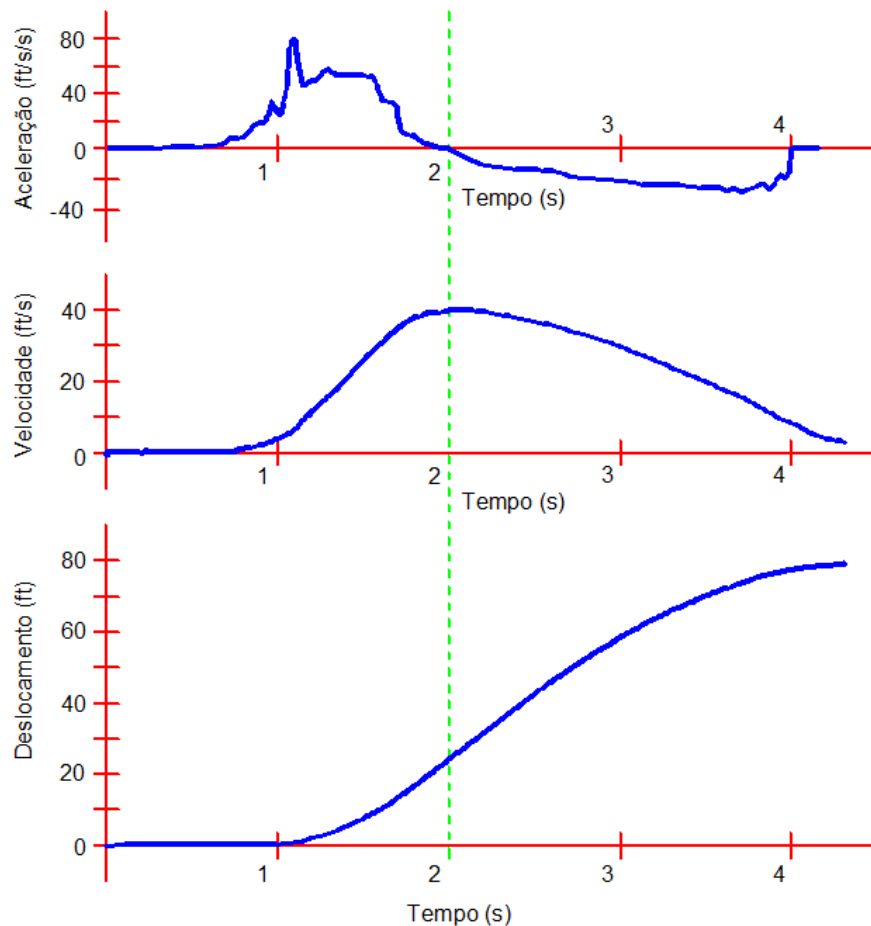


Figura 2.1 – Sinais adquiridos com o penetrômetro de queda livre (adaptado de Scott, 1970)

Observa-se que nos primeiros dois segundos o amostrador ganha velocidade sob a influência da gravidade, quando então toca no leito marinho. Na medida em que ocorre o surgimento das forças hidrodinâmicas a aceleração diminui gradualmente. Se o amostrador continuasse caindo durante um longo intervalo de tempo a aceleração tenderia a zero, equilibrada pelo surgimento das forças hidrodinâmicas de arraste contrárias ao sentido do movimento e a velocidade do mesmo passaria a ser constante conhecida como a velocidade terminal. Porém neste caso o amostrador atinge o fundo antes de alcançar a velocidade terminal. Quando atinge o fundo do oceano o amostrador começa a desacelerar sob a influência das forças de resistência do solo. A aceleração que era positiva torna-se a partir desse ponto negativa reduzindo a velocidade do amostrador até atingir o repouso e cessar a penetração.

Em Thompson e Colp (1970) apresentam o Penetrômetro de Sedimento Marinho (MSP). O MSP foi desenvolvido para ter um bom desempenho hidrodinâmico durante a queda livre, sendo composto por um corpo cilíndrico, uma ponteira cônica e dotado de aletas direcionais. A figura 2.2 apresenta a segunda geração desse tipo de penetrômetro, com peso

máximo de 450N, atingindo velocidade terminal de 30m/s e tendo sua instrumentação composta por um acelerômetro tri-axial cujos dados são transmitidos para uma fita de gravação, abordo de um navio, por um cabo de arrasto preso atrás do penetrômetro.

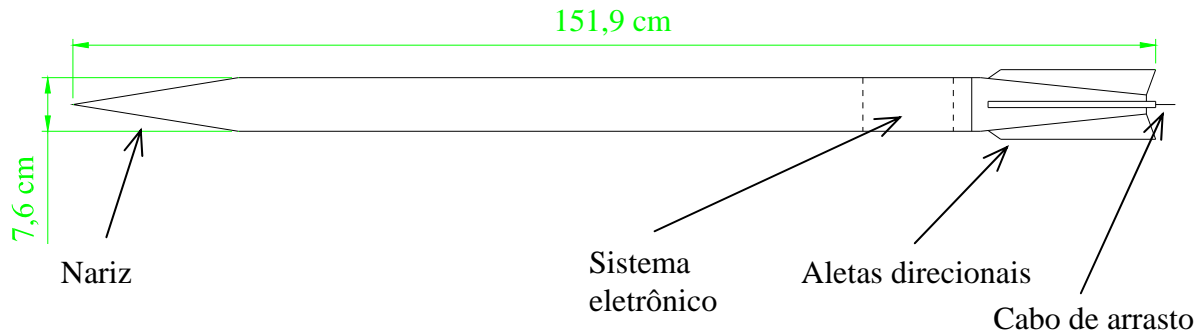


Figura 2.2 – MSP (adaptado de Colp *et al.*, 1970)

Procurando refinar as estimativas visando uma determinação direta da resistência do solo Dayal e Allen (1973) propuseram além do uso dos acelerômetros a utilização de um cone de penetração de queda livre dotado com uma célula de carga para medição da resistência de ponta e de fuste. A figura 2.3 apresenta uma representação do penetrômetro de cone de impacto marinho (ICPT) proposto por Dayal e Allen (1973), onde a velocidade de impacto varia entre 4,57m/s a 6,10 m/s e podendo atingir profundidades de até 6 metros.

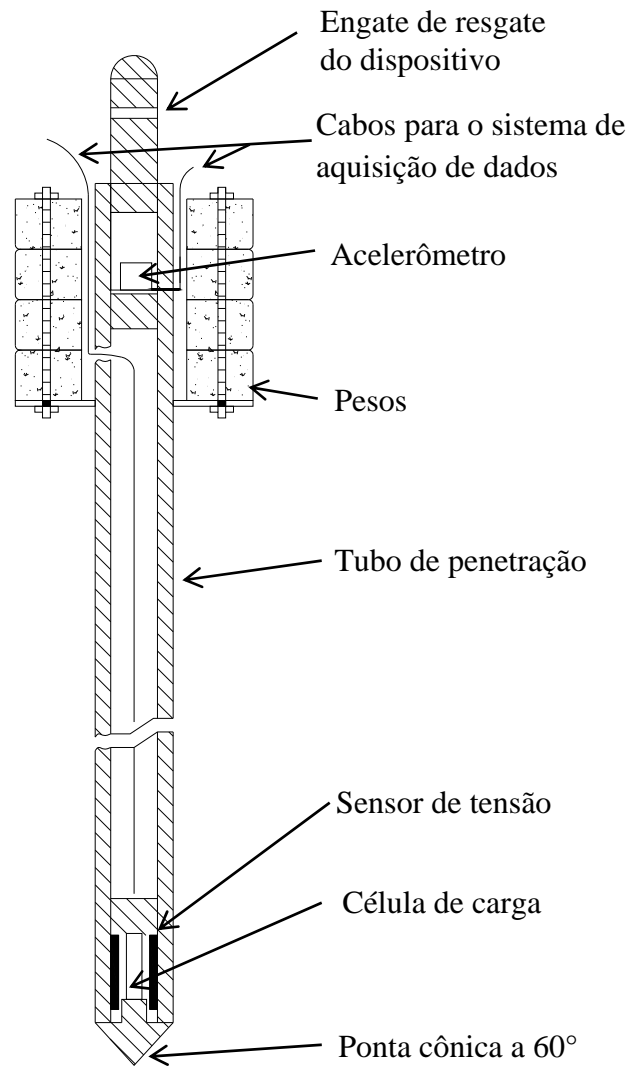


Figura 2.3 – Representação em corte do penetrômetro de cone de impacto marinho (ICPT)  
(adaptado de Dayal e Allen, 1973)

Baseado em vários testes de laboratório os autores apresentaram os resultados com um penetrômetro de pequenas dimensões. As principais conclusões foram:

- O penetrômetro continua acelerado por algum tempo mesmo após o impacto no solo. Tal aceleração se mantém até que a resistência do solo passe a ser maior do que o peso do penetrômetro.
- O penetrômetro então começa a desacelerar, até que atinja a máxima profundidade de penetração; a desaceleração é mais repentina em solos grossos do que em solos finos.

- Ao final da penetração, o penetrômetro continua oscilando verticalmente por um determinado período de tempo, até que o amortecimento do solo leve-o ao repouso definitivo.

A partir da década de 1980, diversos tipos de penetrômetros de queda livre instrumentados foram desenvolvidos, tendo sido alguns inclusive lançados comercialmente. A compreensão do mecanismo hidrodinâmico de queda livre do penetrômetro e do processo dinâmico de interação com o solo durante a penetração também evoluíram, permitindo a estimativa da resistência dinâmica do solo a partir unicamente da desaceleração do penetrômetro (Alves e Danziger, 2008).

## **2.2. Alguns Exemplos de Penetrômetros de Queda Livre Encontrados na Literatura**

### **2.2.1. XBP – *Expendable Bottom Penetrometer***

Este penetrômetro é dotado de um acelerômetro, que mede a desaceleração durante a penetração no subsolo marinho. Neste sistema, os sinais são transmitidos via rádio para uma embarcação ou avião de onde o equipamento foi lançado (figura 2.4). Como o próprio nome ressalta o penetrômetro não é recuperado após o seu lançamento.

A penetração máxima deste equipamento é da ordem de 25 centímetros, servindo apenas para caracterização superficial do substrato marinho, seu peso é da ordem de 6,91N podendo atingir uma velocidade terminal de 7 m/s.





Figura 2.4 – XBP diagrama conceitual (adaptado de Akal e Stoll, 1995)

A figura 2.5 mostra o XBD desenvolvido em cooperação entre o *Saclant Undersea Research Center* e o *Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO)* da Universidade de Columbia, Estados Unidos (Akal e Stoll, 1995; Aubeny e Shi, 2006).

Akal e Stoll (1995) com base em resultados de laboratório e testes no mar sugerem duas análises distintas a partir dos resultados obtidos com XBP:

- O sinal de desaceleração, durante a penetração, pode ser utilizado para uma estimativa da resistência à ruptura por cisalhamento do solo, para grandes deformações;
- A oscilação do instrumento após a penetração pode indicar parâmetros de rigidez dinâmica, a pequenas deformações, especialmente o módulo elástico de cisalhamento.

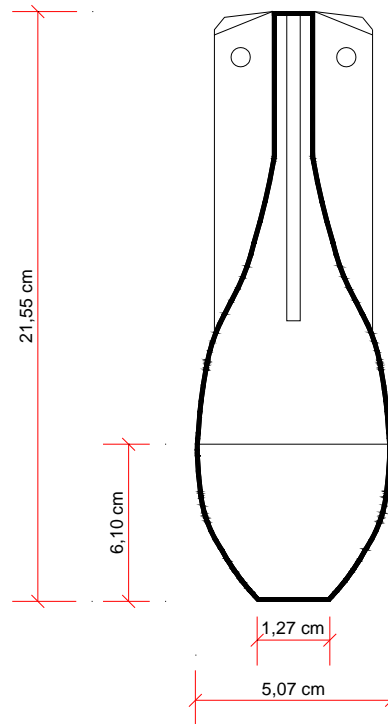


Figura 2.5 – XBP (adaptado de Aubeny e Shi, 2006)

### 2.2.2. XDP – *Expendable Doppler Penetrometer*

O uso do princípio do Doppler acústico para medir a velocidade em penetrômetros de queda livre foi sugerido por Thompson (1977) e testado por Beard (1977).

O XDP não possui acelerômetros como o XBP (*Expendable bottom penetrometer*) mas, um emissor de ondas sonoras com frequência constante. O sinal acústico gerado pelo penetrômetro é captado por um receptor de sinais (hidrofone), instalado na embarcação de apoio ou plataforma da qual foi lançado podendo, ficar posicionado a alguns metros abaixo da superfície marinha de forma a evitar interferências sonoras.

A movimentação do penetrômetro, durante a queda livre e também após o impacto no solo, provoca uma alteração na frequência do sinal recebido, devido ao efeito Doppler. Esta variação é proporcional à velocidade do penetrômetro.

A frequência das ondas sonoras, registradas ao longo do tempo, é convertida em uma curva de velocidades no tempo a partir da qual é construído um perfil de desaceleração

sofrido pelo penetrômetro ao adentrar no fundo oceânico. Assim, com base nestas informações é possível estimar a resistência ao cisalhamento do solo oceânico.

Segundo Thompson *et al.* (2002) o XDP pode atingir velocidades terminais entre 10 e 25 m/s, em função do comprimento adotado e do conseqüente peso total, e consegue penetrar no solo até profundidades em torno de 9 metros, podendo ser lançado em lâminas d'água com profundidades de até 6000 metros. A figura 2.6 mostra o desenho esquemático de um XDP.

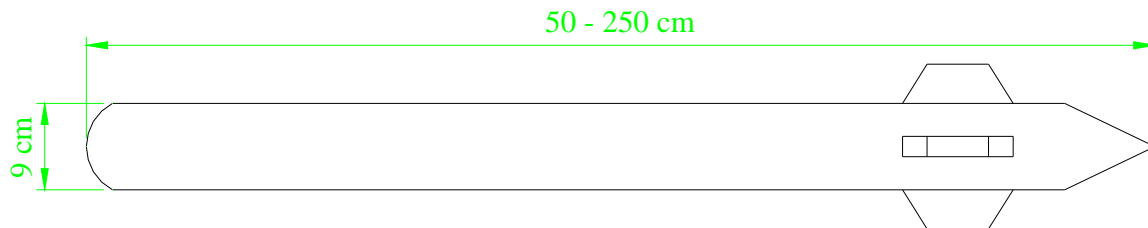


Figura 2.6 – XDP (adaptado de Thompson *et al.*, 2002)

### 2.2.3. FFCPT – *Free Fall Cone Penetrometer (Canadense)*

As empresas canadenses *Brooke Ocean Technology Ltd.* e *Christian Situ Geoscience Inc.* com a colaboração do *Defense Research and Development Canada* desenvolveram o *Free Fall Cone Penetrometer* (Osler *et al.*, 2006). Diferentemente do XBP e do XDP (anteriormente descritos), neste sistema de medição o penetrômetro sempre é recuperado após o lançamento, através de cabos ligados à embarcação de apoio.

O equipamento tem um peso total de 52 kgf, e consegue penetrar no solo até profundidades entre 2 e 3 metros. O penetrômetro, em sua versão básica, é dotado de três acelerômetros (com capacidades de 3g, 20g e 90g), 2 transdutores de pressão e um sensor ótico, além do sistema de aquisição de dados. As medições iniciam-se assim que o penetrômetro atinge uma profundidade pré-definida.

Os dados são gravados pelo sistema de aquisição e após a recuperação do penetrômetro, descarregados em um computador podendo ser lidos e tratados posteriormente.

A interpretação dos dados obtidos permite a estimativa das seguintes propriedades (Osler *et al.* 2006; Alves e Danziger, 2008):

- Perfil de resistência ao cisalhamento do solo, calculada independentemente a partir do sinal de desaceleração e da poro-pressão gerada durante a penetração;
- Módulo elástico de cisalhamento, obtido a partir da resposta oscilatória do equipamento ao final da penetração;
- Detecção de lama fluida em camadas suspensas através de técnicas de refração ótica.

A figura 2.7 apresenta o desenho esquemático de um FFCPT, com a posição dos instrumentos.

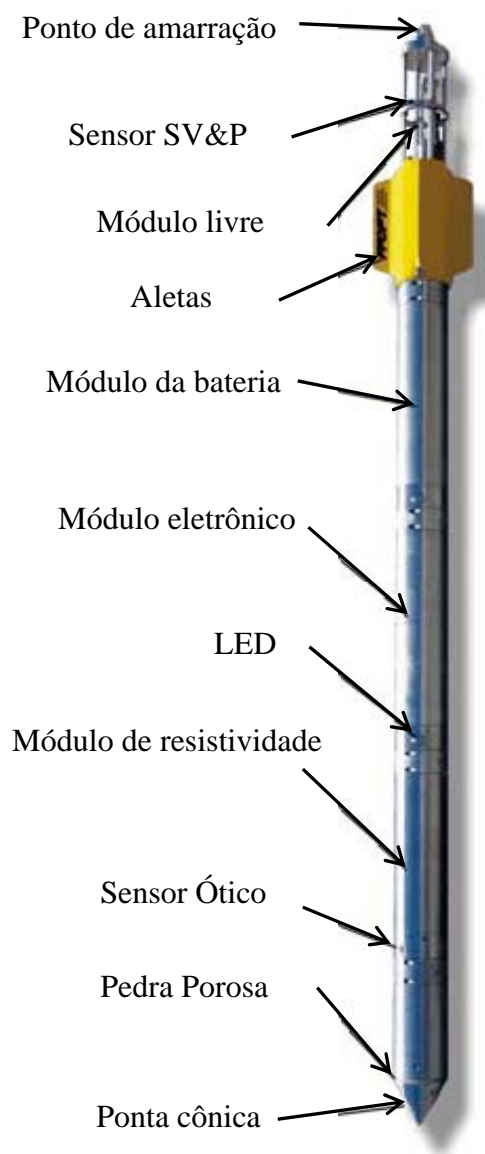


Figura 2.7 – FFCPT (adaptado de Osler *et al.*, 2006)

#### 2.2.4. FFCPT – *Free Fall Cone Penetrometer* (Alemão)

O FFCPT foi desenvolvido e construído pela *RCOM* em colaboração com a *GEOMIL* com o intuito de utilizá-lo em explorações *offshore*.

O penetrômetro contém um piezocone industrial de 15 cm<sup>2</sup> e uma estrutura a prova de água contendo um microprocessador, bateria, e acelerômetros. A poropressão ( $u_2$ ) é medida com um sensor de pressão absoluta de 2 MPa. Também existe um inclinômetro instalado usado para controlar o ângulo de penetração em relação à vertical. Quatro acelerômetros (1,7g, 5g, 18g, 100g) fornecem as informações sobre o comportamento de desaceleração do instrumento na penetração.

Os dados são armazenados temporariamente em uma memória *Flash Micro SD* e em seguida podendo ser transferida para um computador podendo ser lidos e tratados posteriormente.

Esta versão de FFCPT possui uma haste que pode variar de 1,5 m até 8,5 m comprimento. A extensão é realizada adicionando hastes de 1 m. Caso deseja-se aumentar o ensaio de penetração é possível montar pesos (15 kg cada) que são montadas à carcaça no topo do instrumento, atingindo um peso máximo de 200 kg.

O FFCPT desenvolvido na Alemanha, até agora, foi usado em lançamentos a partir de pontes e pequenos barcos em corpos lacustres na Suíça (Lago de Lucerna), no estuário do Weser, noroeste da Alemanha, e de navios de grande porte no Mar Báltico e no mar Mediterrâneo.

A figura 2.8 apresenta um esquema do FFCPT com a posição dos instrumentos.

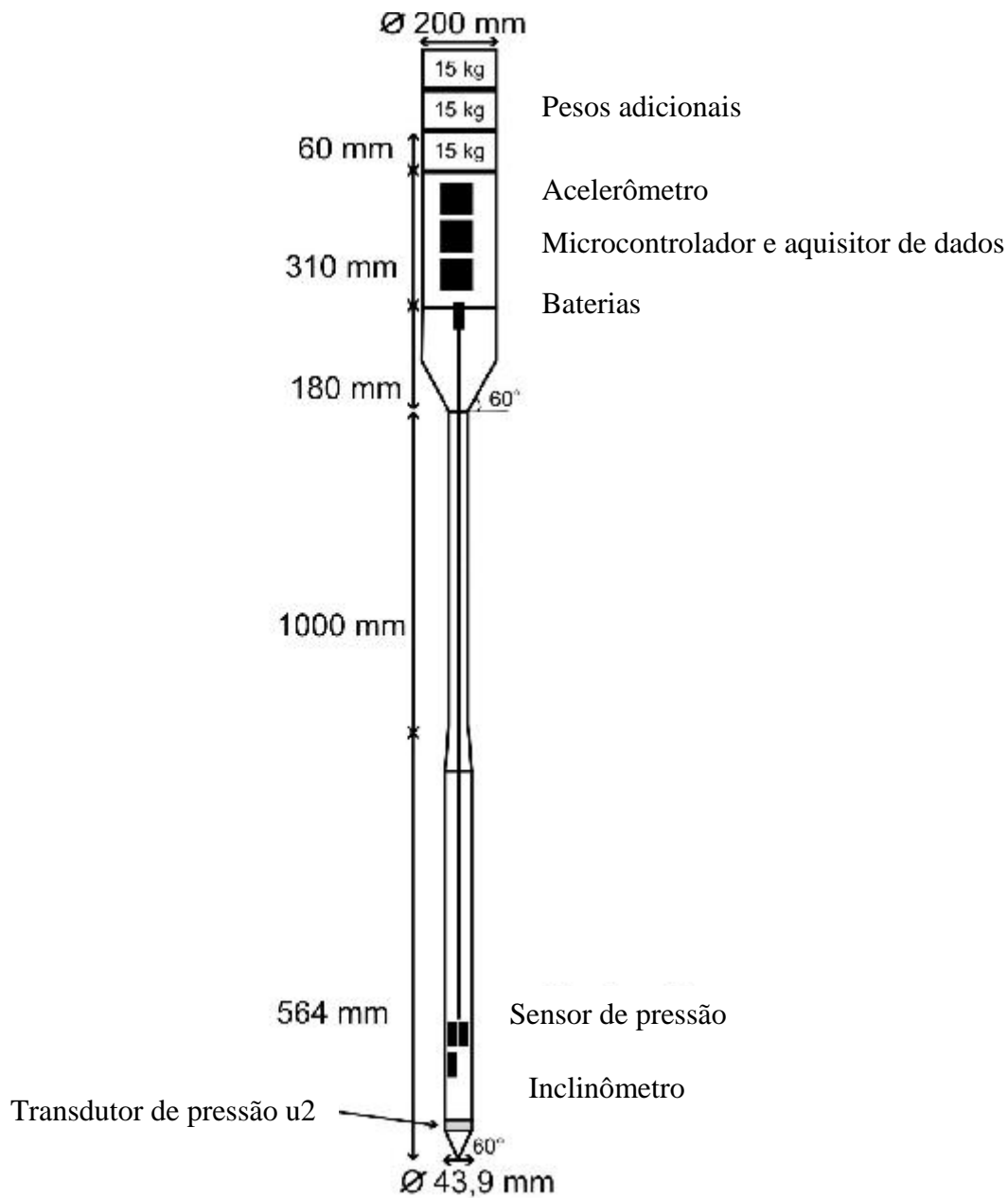


Figura 2.8 – FFCPT (adaptado de Stegmann *et al.*, 2006)

### 2.2.5. STING – Seabed Terminal Impact Newton Gradiometer

O STING foi desenvolvido pelo *Canadian Department of National Defense*, com a colaboração técnica da empresa *A.G.O. Environmental Electronics Ltd.*, a qual fabrica e comercializa o equipamento sob licença. A figura 2.9 mostra uma fotografia do STING.

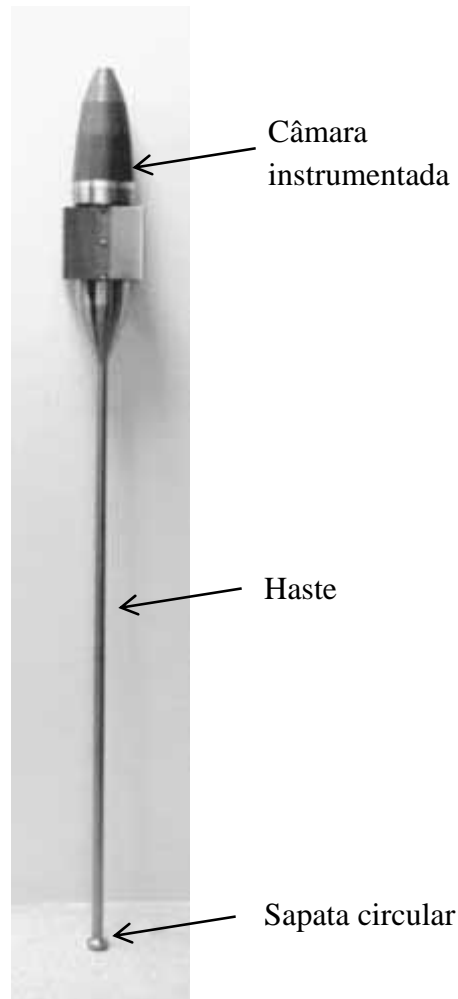


Figura 2.9 – STING (A.G.O. Environmental Electronics Ltd.)

O equipamento consiste de uma câmara, impermeável, em formato cilíndrico com extremidades cônicas, no interior da qual estão instalados o sistema de aquisição de dados e os sensores (acelerômetro e transdutor de pressão). A esta câmara são encaixadas hastes rosqueáveis, com comprimentos individuais de 1 metro de comprimento, podendo ser estendido em até 3 metros por meio do encaixe de segmentos adicionais. Na ponta do conjunto de hastes é instalada uma sapata circular, com diâmetro de 25 mm, 35 mm, 50 mm ou 70 mm, onde as maiores utilizadas em solos argilosos moles, e as menores em solos granulares.

O peso do instrumento é de aproximadamente 10 kgf se o conjunto estiver conectado a um único segmento de haste, para cada novo segmento conectado deve-se considerar um peso adicional de 3 kgf. A profundidade de trabalho pode alcançar 300 metros de lâmina d'água com capacidade de penetração de aproximadamente 3 metros no solo oceânico.

As medições podem iniciar assim que o equipamento toca na água, ou a partir de uma profundidade pré-definida. Após a recuperação do penetrômetro, os dados gravados pelo sistema de aquisição são descarregados em um computador, podendo ser lidos e tratados através de programas específicos. A interpretação dos dados obtidos permite a estimativa das seguintes propriedades: (i) perfil de resistência ao cisalhamento do solo, calculado a partir do sinal de desaceleração; (ii) profundidade alcançada, a partir das medidas de pressão hidrostática.

### **2.2.6. Penetrômetro de queda livre de baixo custo e peso**

Spooner *et al.* (2004), descrevem a construção de um penetrômetro de queda livre de baixo custo e peso. O aparelho consiste na utilização de componentes da *Vernier Software e Technology*, uma empresa voltada para educação em ciência. O sistema utiliza um acelerômetro unidirecional de 25g, um conversor analógico digital – *Labpro*<sup>TM</sup> ou *Go!Link*<sup>TM</sup> – e um computador portátil ou um computador de mão.

O acelerômetro fica acomodado no interior do penetrômetro, quando lançado, um cabo elétrico transmite o sinal para superfície. Na superfície, o cabo é conectado ao conversor analógico digital, o *Labpro*<sup>TM</sup> ou *Go!Link*<sup>TM</sup>, e este conectado a um computador portátil ou um computador de mão que registra o sinal de desaceleração sofrido pelo impacto do penetrômetro.

O aparelho pesa aproximadamente 3 kgf, possui 30 centímetros de comprimento e 5 centímetros de diâmetro externo. Possui aletas laterais que estabilizam a queda do instrumento evitando sua inclinação durante o movimento de baixo da água e pode ser operado em profundidades de até 15 metros (figura 2.10).



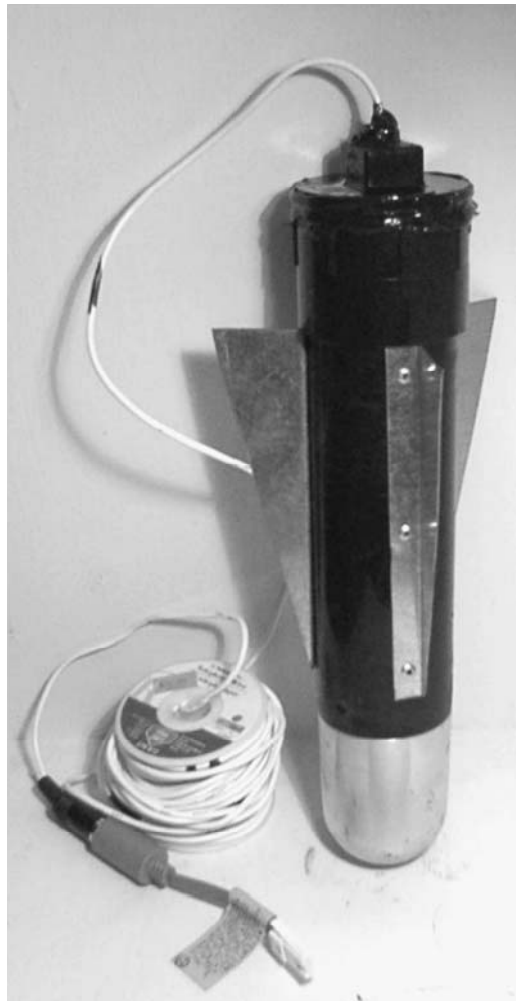


Figura 2.10 – Penetrômetro com cabo de aquisição de dados (Spooner *et al.*, 2004)

### 2.3. Alguns Exemplos de usos de Penetrômetros de Queda Livre

Colp *et al.* (1975) apresentam resultados de ensaios de penetração por queda livre realizados na região do golfo do México. Os dados obtidos foram comparados com resultados de ensaios de laboratório, realizados a partir de amostras coletadas no local.

Nos Estados Unidos os penetrômetros foram usados na determinação das características dos solos coesivos comparando os resultados do Estado do Alaska com o Estado de Washington (Thompson *et al.*, 2002).

Próximo a cidade de Corpus Christi no estado do Texas foram analisadas amostras locais em laboratório comparando-as com resultados gerados pelo penetrometro XBP para a caracterização do perfil de resistência ao cisalhamento de solos moles (Aubeny e Shi, 2006).

A figura 2.11 apresenta um resultado onde a linha cheia mostra os dados adquiridos com o penetrômetro XBP e os pontos tracejados mostram os dados adquiridos com tubos de amostragem e posterior ensaio de palheta de laboratório.

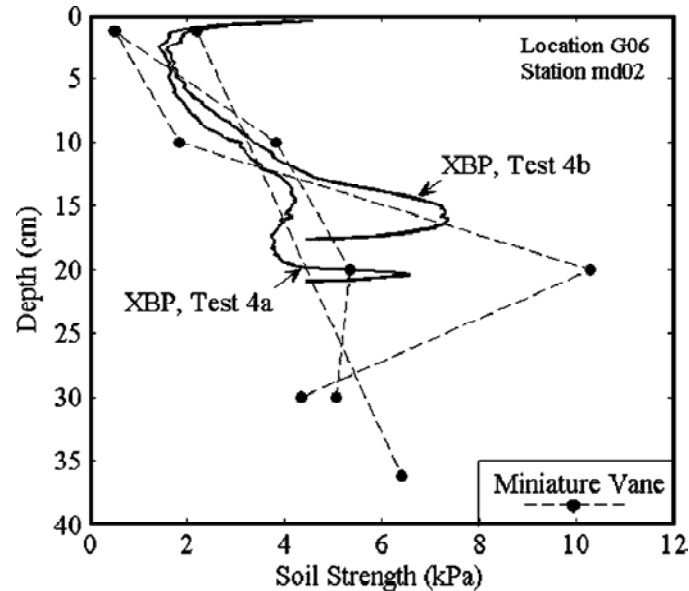


Figura 2.11 – Interpretação do perfil de resistência ao cisalhamento próximo a cidade de Corpus Christi - Texas - Estados Unidos (extraído de Aubeny e Shi, 2006)

No litoral da Alemanha, no Mar Báltico utilizaram-se penetrômetros para estudar os efeitos da altura de lançamento com a profundidade de penetração e também estimar a resistência ao cisalhamento do depósito lamoso em cada local de amostragem (Stegmann *et al.*, 2006).

No estado de Nova Scotia, no Canadá, próximo do Porto de Halifax realizaram-se estudos com penetrômetro na determinação das características de fundo na Baía de St. Margaret's. Ainda no Canadá, no Lago Canoran, os penetrômetros foram usados para a calibração de sonares na determinação da profundidade local e estudo sedimentológico e paleontológico daquele lago. (Spooner *et al.*, 2004; Osler *et al.*, 2006).

No Brasil utiliza-se a idéia do sistema eletrônico do penetrômetro em estacas torpedo com o intuito do estudo da profundidade de penetração e na verificação do perfil da resistência ao cisalhamento do solo durante a cravação do artefato no leito marinho com o objetivo de estacionar plataformas flutuantes e *risers* submarinos (Kunitaki, 2006; Costa, 2008).

No entanto, para que os dados registrados pelos penetrômetros possuam representatividade é necessário que sejam comparados com dados similares obtidos no

mesmo ponto utilizando métodos consagrados e equipamentos calibrados. Assim, têm-se certeza que os sinais obtidos expressam as características reais do solo.

#### 2.4. Modelos para a Estimativa da Resistência do Solo a partir dos Sinais de Desaceleração

Uma das primeiras propostas foi idealizada por Scott (1970), baseado na hipótese que o projétil se comporta como um corpo rígido e pode ser modelado como uma única partícula, para isto usa a Segunda Lei de Newton para representar a relação entre as forças que tendem a empurrar o penetrômetro no solo e as forças que tendem a pará-lo. A equação pode ser descrita como:

$$m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = m \cdot g - F_C - F \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde  $m$  é a massa do projétil,  $z$  é o deslocamento e  $\frac{d^2z}{dt^2}$  é a desaceleração do projétil,  $g$  é a aceleração de gravidade,  $F_C$  é uma força elástica no cabo de recuperação preso no penetrômetro e  $F$  é a força de resistência do solo.

Utilizando a equação de Scott (1970), True (1976) separou o termo da resistência do solo da seguinte maneira:

$$F = F_D + F_B + F_S \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde  $F_D$  é a força de arrasto provocada pelo solo no projétil,  $F_B$  e  $F_S$  são as forças de resistências dinâmica de ponta e força lateral ou de fuste do projétil, respectivamente.

Negligenciando a força elástica no cabo de recuperação a equação 2.1 pode ser reescrita como:

$$m' \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = w_b - F_D - F_B - F_S \quad \text{Eq. 2.3}$$

onde  $m'$  e  $w_b$  são a massa "efetiva" e peso submerso do projétil, respectivamente; as outras variáveis já foram definidas. A massa "efetiva" é igual à massa do projétil mais a massa de fluido e terra que são desacelerados junto com o projétil. A figura 2.11 ilustra as forças consideradas por True (1976) para um modelo cilíndrico.

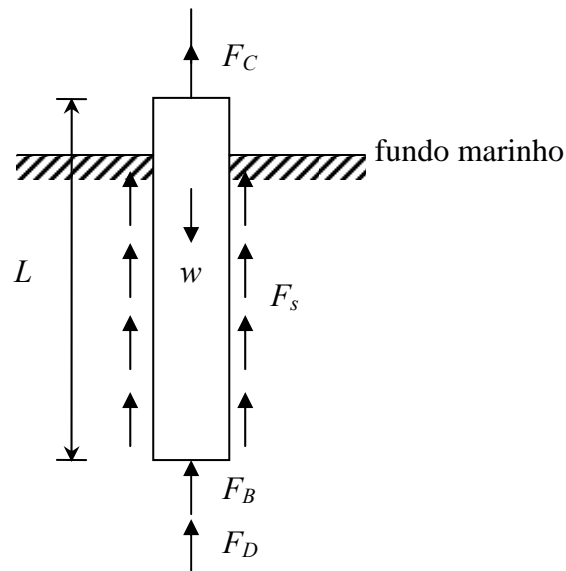


Figura 2.12 – Forças de atuação no projétil

A força de arrasto em solos marinhos normalmente é tratada como acontece o arraste em fluidos (Alves e Danziger, 2008), esta força é calculada através da equação de Morison, frequentemente usada em hidrodinâmica (Morison *et al.*, 1950):

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad \text{Eq. 2.4}$$

onde  $A$  é a área de projétil normal ao movimento,  $\rho$  é a densidade do solo e fluido que cercam o projétil,  $v$  é a velocidade de projétil, e  $C_D$  é o coeficiente arrasto, função da velocidade de impacto do projétil.

A resistência dinâmica que age na base do projétil, para solos argilosos, pode ser representada por:

$$F_B = f_v \cdot (s_u \cdot N_c \cdot A_B) \quad \text{Eq. 2.5}$$

$$F_S = f_v \cdot \left( \frac{s_u \cdot A_S}{S} \right) \quad \text{Eq. 2.6}$$

onde  $s_u$  é a resistência ao cisalhamento não drenada do solo,  $N_c$  é o fator de capacidade de carga,  $A_B$  a área da base do projétil,  $A_S$  é a área lateral do projétil,  $S$  é a sensibilidade do solo e  $f_v$  é o fator de velocidade de deformação. Então, por meio de equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6, é possível estimar o perfil de resistência do solo por meio do registro de desaceleração, ou prever a velocidade contra a curva de profundidade do penetrômetro através do perfil de resistência ao cisalhamento e velocidade de impacto.

O efeito de  $f_v$  é aumentar a resistência ao cisalhamento, em uma tentativa de representação de uma fonte resistência viscosa comumente encontrada em solos argilosos. True (1976) sugere uma formulação empírica para o fator de velocidade de deformação:

$$f_v = \frac{S_e}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_e \cdot v}{s_u \cdot D} + C_0}}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

onde  $S_e$  é o máximo fator de taxa de deformação,  $C_e$  é um coeficiente empírico da taxa de deformação (sugerido como 1.5 kNs/m<sup>2</sup>),  $C_0$  constante empírica de taxa de deformação e  $D$  é o diâmetro de projétil.

Para a representação do efeito da taxa de deformação, Dayal *et al.* (1980) propõem a seguinte relação baseado em resultados experimentais com penetrômetros de queda livre:

$$f_v = 1 + K_L \cdot \log \left( \frac{v}{v_0} \right) \quad \text{Eq. 2.8}$$

onde  $K_L$  é um coeficiente genérico de viscosidade e  $v_0$  a velocidade de referência.

### **3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TESTES DO PENETRÔMETRO**

A área de pesquisa para os testes do penetrômetro localiza-se na porção Sul da Laguna dos Patos no Rio Grande do Sul. Trata-se da marina do Rio Grande Yacht Club situado na área urbana da cidade de Rio Grande. A marina é uma enseada pertencente à zona estuarina denominada de Saco do Arraial. Os dados coletados se deram em três pontos da marina denominados por A, B e C. A figura 3.1 apresenta os pontos escolhidos com as coordenadas geográficas mapeadas por GPS e as distâncias entre os pontos de lançamentos medidos através de uma trena de lona.

O Saco do Arraial basicamente é composto por sete classes de sedimentos. Esta distribuição de acordo com o mapa batimétrico (figura 3.2) revela a presença preponderante de sedimentos arenosos em profundidades inferiores a 1 metro, devido à maior energia da coluna d'água, as quais não permitem a deposição de sedimentos mais finos que a areia que condiciona o desenvolvimento de margens arenosas. Nos locais de maior profundidade e mais abrigados da área se estabelecem condições de baixa energia, tornando possível a visualização de sedimentos enriquecidos em silte e argila. A principal área de deposição destes sedimentos ocorre principalmente nas regiões mais protegidas, onde o contato com as incursões de água salgada favorece a deposição por floculação (Souza, 2002; Antikeira e Calliari, 2005).

Portanto, segundo o estudo de Souza (2002), baseado na classificação de Shepard (1954), pode-se prever que na caracterização sedimentológica da marina do Rio Grande Yacht Club predominem sedimentos de areia siltico-argilosa, argila arenosa e argila siltica por tratar-se da margem sul do canal uma região de baixa energia que favorece a deposição deste tipo de sedimentos.



Figura 3.1 – Localização da área de testes (Adaptado de Google Earth, 2009)

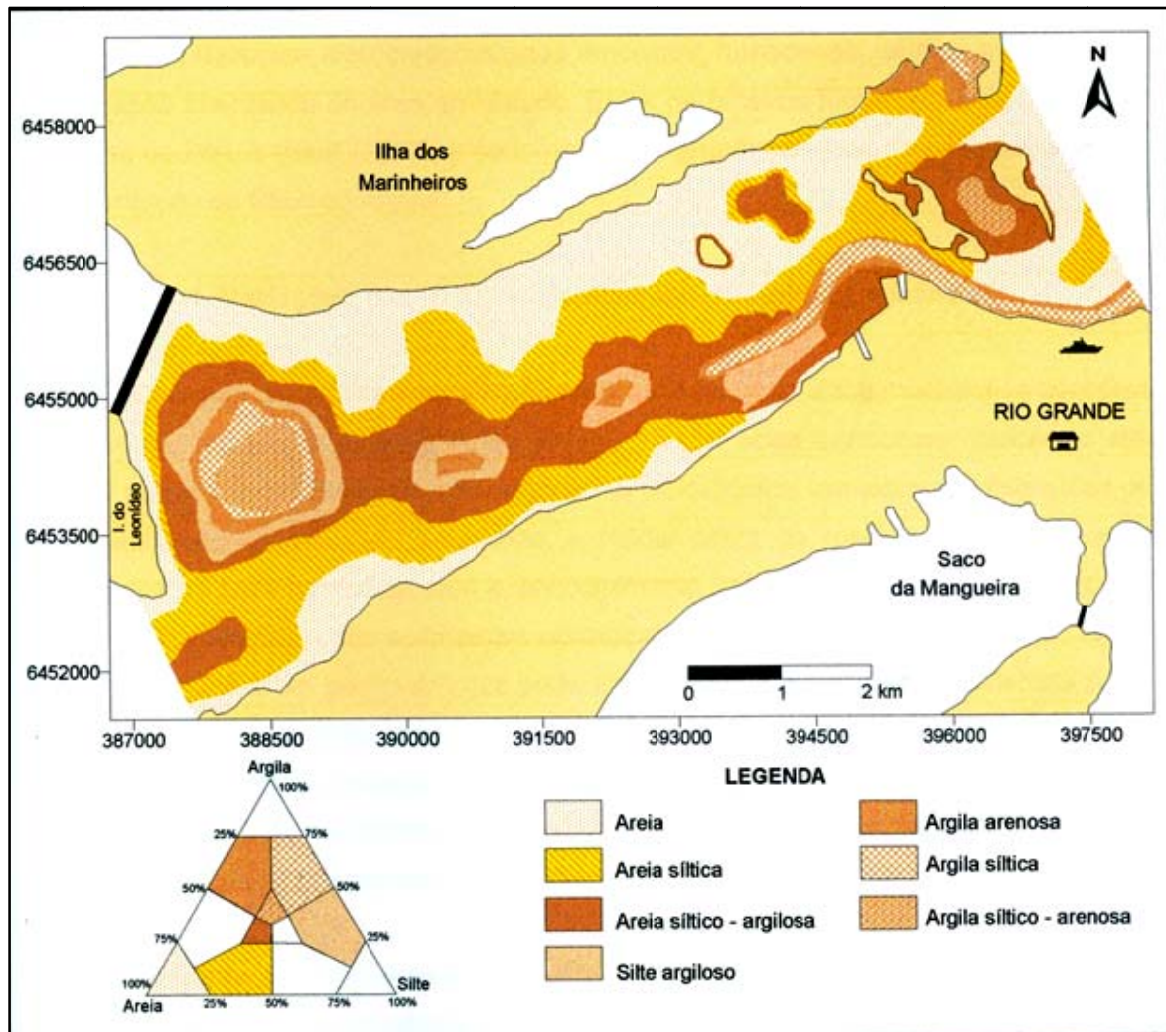


Figura 3.2 – Mapa textural dos sedimentos de fundo do Saco do Arraial  
(extraído de Souza, 2002)



## 4. METODOLOGIA

A metodologia definida para este trabalho abrange a definição das características do equipamento a ser construído, escolha do formato do corpo do penetrômetro, elaboração do desenho técnico, definição de parâmetros de usinagem para o torno universal e para o torno CNC, escolha, compra e montagem dos sensores e dos sistemas eletrônicos, testes *in situ* a fim de adquirir os sinais e avaliar a operacionalidade do equipamento, tratamento e interpretação dos sinais adquiridos e sua comparação com dados obtidos na literatura.

### 4.1. Bases do Projeto

O projeto deste estudo se baseia na construção de um penetrômetro de queda livre tendo o seu corpo em formato de uma gota d'água, ou seja, o formato descrito pela equação do aerofólio Joukowski simétrico, o sistema de aquisição e armazenagem de dados de aceleração adquirido da *Vernier Software & Technology* e aletas direcionais como em torpedos e foguetes.

O material escolhido para sua constituição foi o alumínio por ser um material resistente à corrosão, leve e mole que facilita o trabalho de usinagem quando comparado com outros materiais ou ligas metálicas. Optou-se por dimensões com o diâmetro de 100 milímetros por 500 milímetros de comprimento por serem dimensões muito próximas das dimensões comerciais de tarugos maciços utilizados para a fabricação de peças.

O penetrômetro foi construído de forma que um acelerômetro de 25g fosse instalado em seu interior e coberto com um lastro de chumbo granulado. Os sinais gerados pelo sensor são transmitidos por um cabo multiplexado com 15 metros de comprimento através de um conector que liga o acelerômetro à interface de aquisição de dados e posteriormente a um computador portátil que realiza o armazenamento das informações.

As diferentes partes que compõem o penetrometro foram denotadas conforme mostrado na figura 4.1 apresentada a seguir.

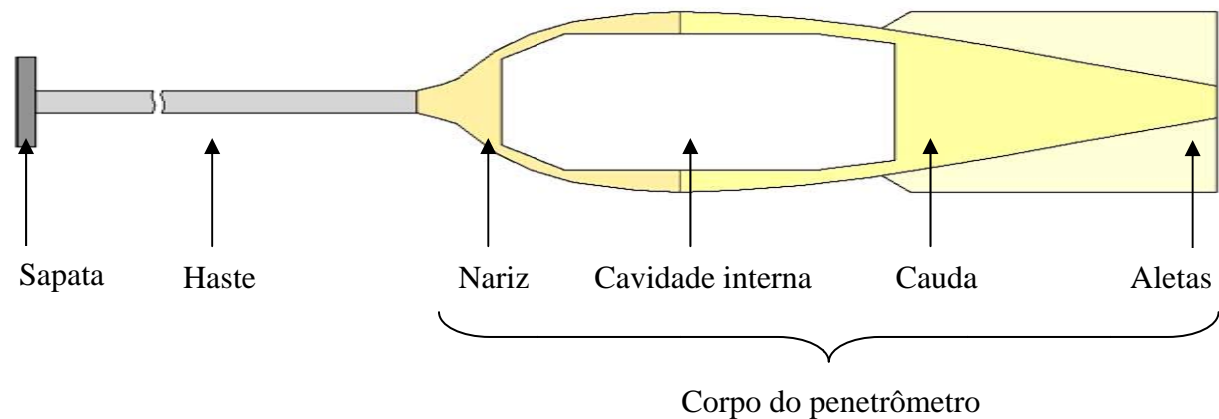


Figura 4.1 – Definição das partes do penetrômetro

Definidas as premissas mais importantes sobre o projeto do equipamento, a seguir será realizada a descrição da equação do aerofólio Joukowski simétrico que estabelece matematicamente o formato do corpo do penetrômetro.

## 4.2. Definição do Formato

Os equipamentos marinhos devem possuir um bom desempenho hidrodinâmico a fim de minimizar as perdas por atrito com o meio líquido e evitar a formação de escoamentos turbulentos no entorno do corpo. Em 1925, o engenheiro alemão Oertz patenteou um leme o qual leva seu nome (figura 4.2). Trata-se de uma peça com a seção transversal hidrodinâmica em forma de gota d'água. A porta do leme trabalha através de uma peça fixa que lhe completa a forma hidrodinâmica e serve de cadaste exterior ao casco (Fonseca, 1985).

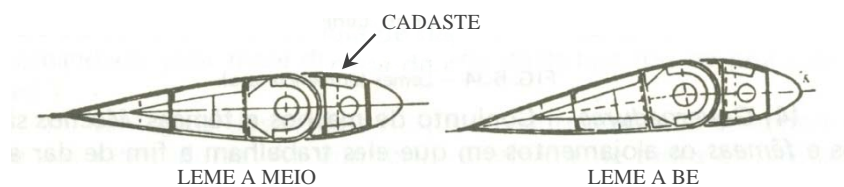


Figura 4.2 – Leme de Oertz (extraído de Fonseca, 1985).

O formato de gota d'água ajuda a atingir dois importantes objetivos neste trabalho: (i) eficiência durante o movimento de queda livre embaixo da água (diminuindo o arraste) e (ii)

penetração vertical no leito marinho, auxiliando na obtenção do máximo registro do perfil do solo e permitindo que o impacto ocorra com a máxima velocidade vertical, preferencialmente a velocidade terminal.

O aerofólio simétrico de Joukowski trata de escoamento sobre superfícies em corpos submersos em fluidos e estabelece condições de fluxos laminares ao longo da superfície do perfil. A geometria do perfil é representada matematicamente pela equação 4.1 e apresentada graficamente nas figuras 4.3 e 4.4, onde a primeira apresenta o perfil no plano cartesiano e a segunda uma vista isométrica revolucionada (Currie, 2003).

$$\frac{y}{e} = \pm 0.385 \left(1 - 2\frac{x}{L}\right) \sqrt{1 - \left(2\frac{x}{L}\right)^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde  $y$  é o eixo no sistema do plano cartesiano referente ao eixo das ordenadas,  $e$  é a espessura,  $x$  é o eixo no sistema do plano cartesiano referente ao eixo das abscissas e o  $L$  é o comprimento.

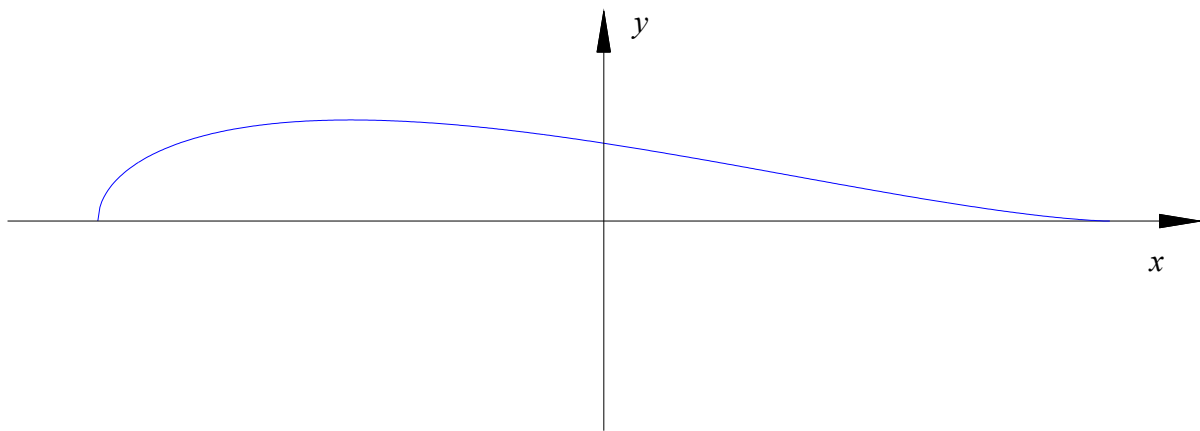


Figura 4.3 – Formato do aerofólio simétrico de Joukowski, baseado na equação 4.1

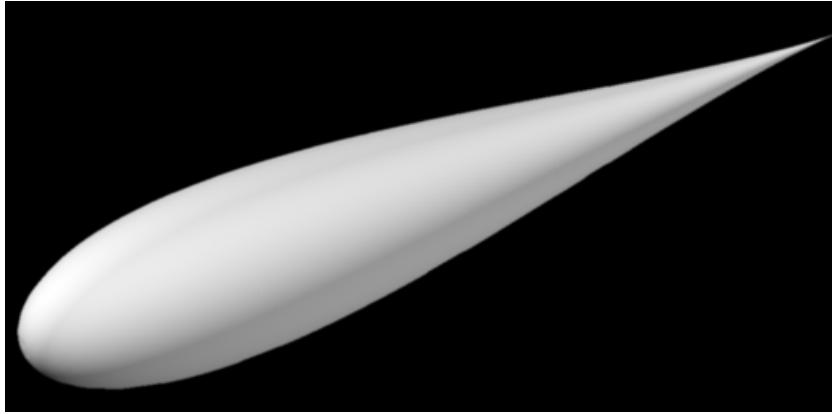


Figura 4.4 – Aerofólio de Joukowski em vista isométrica

Este tipo de aerofólio proporciona uma divisão simétrica do fluxo sobre a superfície de contato (na borda de ataque), havendo posteriormente um restabelecimento completo do mesmo na borda de fuga (parte mais fina da curva) devido à baixa pressão gerada, assim mantendo o aparelho na mesma direção do deslocamento. Este fenômeno acontece para corpos esbeltos e robustos (Currie, 2003).

No entanto, como as águas encontradas na natureza não são fluidos ideais foram instaladas aletas laterais, perpendicularmente ao corpo do penetrômetro, a fim de garantir que se mantenha o movimento de queda livre vertical ao leito marinho.

### **4.3. Desenvolvimento do Equipamento**

#### **4.3.1. Desenho e usinagem do corpo do penetrômetro**

Para a realização dos desenhos técnicos do penetrômetro utilizou-se o programa *AutoCad® Mechanical 2008*, desenvolvido pela Autodesk, Inc. enquanto que o programa *SolidWorks* foi utilizado para a sua visualização em 3D.

O *Autocad® Mechanical 2008* foi utilizado também para a determinação e listagem dos pontos do desenho necessários para a construção do programa de usinagem CNC.

A fim de facilitar a interpretação dos desenhos técnicos e a fabricação do equipamento, o projeto foi subdividido em seis etapas construtivas: (i) o corpo do penetrômetro (perfil do escoamento), (ii) as aletas direcionais, (iii) a representação do espaço

interno para a colocação do acelerômetro, do chumbo e dos conectores de ligação entre os cabos, (iv) a construção das roscas para inserção da haste, para a fixação interna do acelerômetro, para abertura e fechamento do corpo e para fixação de um gancho para resgate do equipamento através de um cabo, (v) chanfros para a utilização de uma chave fixa a fim de facilitar a abertura e fechamento do corpo do penetrômetro e (vi) a construção do rasgo de posicionamento do anel de vedação (borracha) no corpo do penetrômetro.

O perfil gerado pela equação 4.1 não resulta em uma curva simples de fácil construção, mas sim uma forma complexa e desconhecida ao programa do torno CNC e do programa de desenho técnico de tal forma que não foi possível a inserção direta daquela equação.

Para solucionar este problema foi construída uma planilha eletrônica no Microsoft Excel 2007 a partir da equação 4.1 e com isto se obteve uma sequência de pontos, nos eixos das abscissas e das ordenadas. Como cada par de coordenadas descreve a posição de um ponto no plano cartesiano, com a inserção de uma série deles na área de trabalho do *AutoCad® Mechanical 2008* se formou um perfil em escala e assim foi possível representar os desenhos previstos também em escala.

A usinagem do penetrômetro foi realizada na Oficina J. Goulart Tornearia LTDA, na cidade de Rio Grande - RS. Foram utilizados dois tornos, o primeiro foi um torno universal Nardini com controle de posicionamento eletrônico através de um painel digital capaz de informar o posicionamento da ferramenta e conferir maior precisão durante a usinagem do que um torno mecânico comum e o segundo foi um torno CNC Nardini, com comando numérico computadorizado, capaz de realizar usinagem de peças com posicionamentos precisos. Os tornos realizam seus movimentos de corte e posicionamento da ferramenta considerando os eixos de um sistema cartesiano. No torno universal os movimentos são realizados através de dois manípulos acionados manualmente pelo operador deslocando o carro da ferramenta de usinagem através dos eixos. No torno CNC para realização dos movimentos há transdutores lineares que identificam a posição de cada eixo e em conjunto com o acionamento de motores elétricos e as informações do sistema computadorizado reconhecem o valor da posição do eixo e assim deslocam o eixo para a sua nova posição movimentando a ferramenta de usinagem através do comando programado.

O torno universal foi utilizado para usinar as partes internas e a rosca de abertura e fechamento do corpo do penetrômetro, enquanto que o torno CNC foi utilizado para construir o perfil do aerofólio simétrico de Joukowski.

Em virtude das dificuldades já relatadas com a equação de Joukowski, construiu-se o programa de usinagem a partir de um conjunto de curvas pré-programadas no computador do torno CNC com os pontos de início e fim e com o raio de curvatura que se aproximaram dos segmentos do perfil com precisão de milésimos de milímetros.

Entretanto, antes da construção do penetrômetro em tamanho real foi desenhado e usinado um modelo em pequena escala no intuito de averiguar a precisão do perfil do aerofólio e o comportamento do ciclo de usinagem do torno CNC durante a sua execução.

#### 4.3.1.1. Desenho e usinagem do modelo

A construção do modelo não pode considerar a usinagem dos espaços internos do corpo do penetrômetro em função da escala escolhida ser muito reduzida.

O modelo desenvolvido (figura 4.5) foi usinado com base em materiais que se dispunham na oficina.

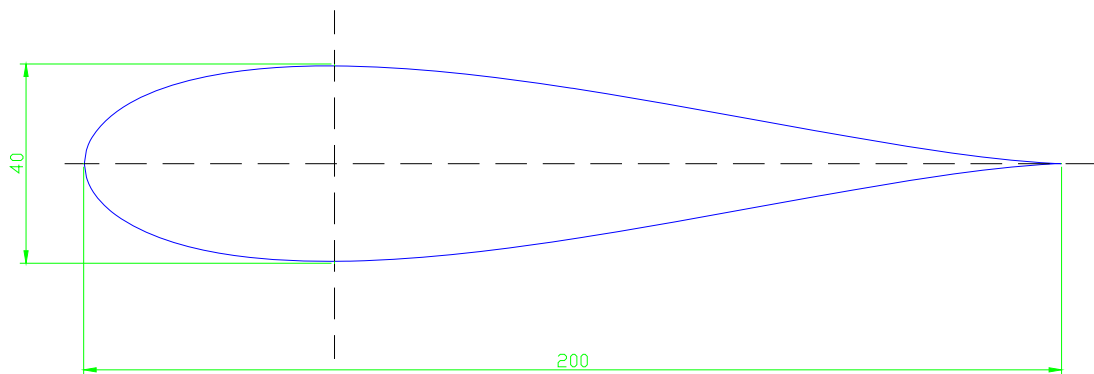


Figura 4.5 – Modelo em escala reduzida do corpo do penetrômetro (mm)

O perfil em questão, mostrado na figura 4.5, foi dividido em duas partes a primeira composta pelo segmento entre o bordo de ataque e a maior seção transversal (nariz), fabricada em *Technyl*, e a segunda composta pelo restante do perfil, segmento entre a maior seção transversal e a borda de fuga (cauda), construída em Poliacetal.

A partir do desenho apresentado na figura 4.5 foram construídas curvas (figuras 4.6 e 4.7) em cada uma das partes que compõe o corpo do penetrômetro e posicionou-se o conjunto sobre o centro do plano cartesiano, coordenadas  $x, y, z$  (0,0,0), do programa do *AutoCad*®

*Mechanical 2008* a seguir e com auxílio do citado programa obteve-se as características das curvas e os pontos para posterior programação do torno CNC.

O desenho apresentado na figura 4.6 foi posicionado desta forma porque o torno CNC ao realizar a usinagem desloca a ferramenta da direita para esquerda, assim o desenho nesta posição facilitou a montagem do programa de usinagem.

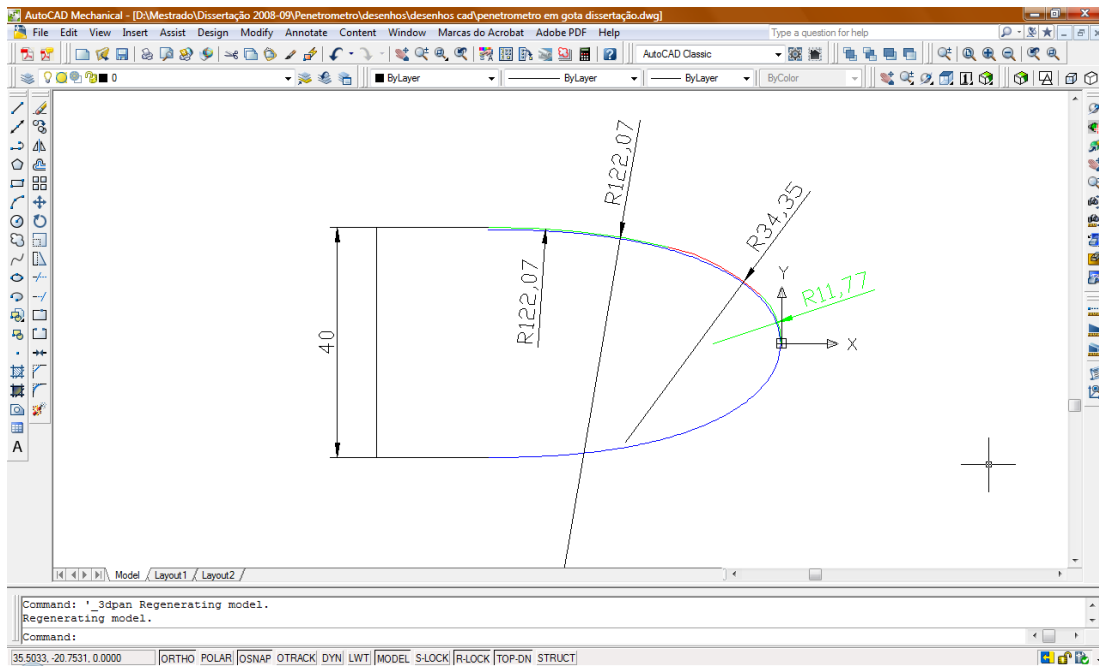


Figura 4.6 – Desenho do nariz em modelo reduzido (cota em milímetro)

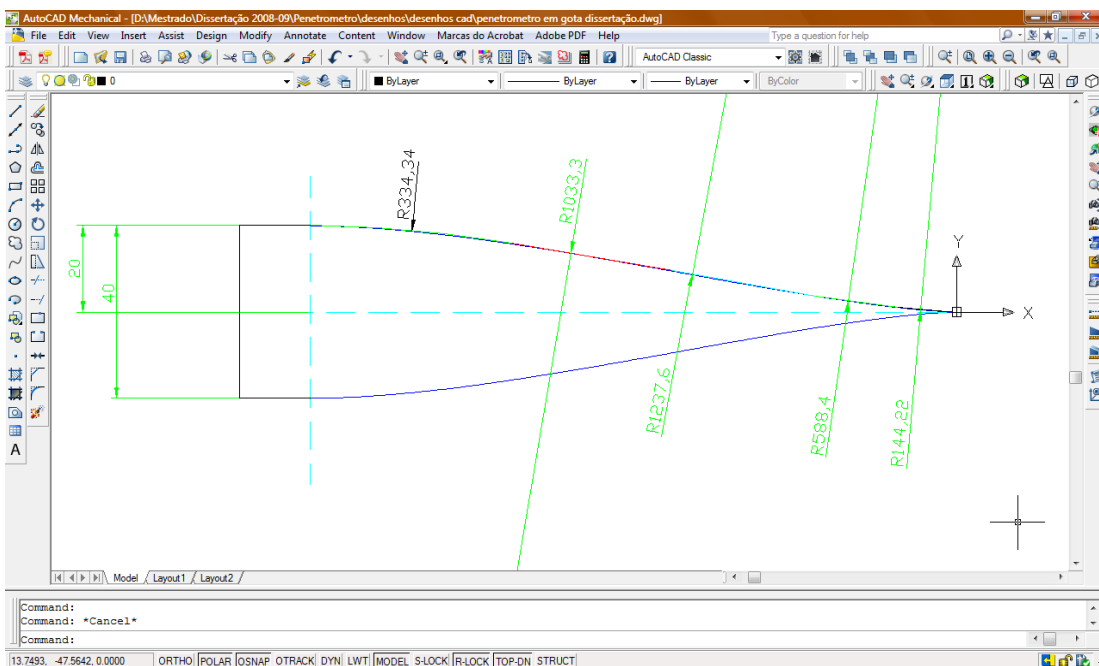


Figura 4.7 – Desenho da cauda do modelo em escala reduzida (cota em milímetro)

A partir dos desenhos foi construída a tabela 4.1, apresentada a seguir que contém os pontos para usinagem do modelo reduzido.

Tabela 4.1 – Tabela com pontos a serem utilizados na programação do torno CNC para construção do modelo reduzido (valores em milímetro)

<b><i>Nariz</i></b>
---------------------

Curva	Sentido de curvatura para a usinagem	Raio	Pontos das extremidades da curva			
			Início		Fim	
			x	y	x	y
1	anti-horário	11,77	0	0	-3,5289	8,4025
2	anti-horário	34,35	-22,1614	12,3516	-19,4478	16,6183
3	anti-horário	122,07	-44,4621	28,6621	-50,2667	20

<b><i>Cauda</i></b>
---------------------

Curva	Sentido de curvatura para a usinagem	Raio	Pontos das extremidades da curva			
			Início		Fim	
			x	y	x	y
1	horário	144,22	0	0	-13,1472	1,0571
2	horário	588,4	-13,1472	1,0571	-31,7297	3,6383
3	horário	1237,6	-31,7297	3,6383	-64,0435	9,3424
4	anti-horário	1033,3	-64,0435	9,3424	-100,3469	15,6321
5	anti-horário	334,34	-100,3469	15,6321	-145,7124	20

No torno CNC a entrada dos dados que controlam o movimento transversal do carro de usinagem não é feita em valores de raio, mas em valores de diâmetros. No movimento longitudinal de usinagem insere-se o valor real da dimensão da peça em milímetros com sinal negativo pois, a usinagem se realiza da direita para esquerda e portanto considera-se que a ponta da ferramenta corresponde ao ponto de valor zero.

Com as configurações realizadas no torno CNC de acordo com a tabela 4.1 para a usinagem do modelo, os resultados podem ser observados nas figuras 4.8 e 4.9 a seguir.



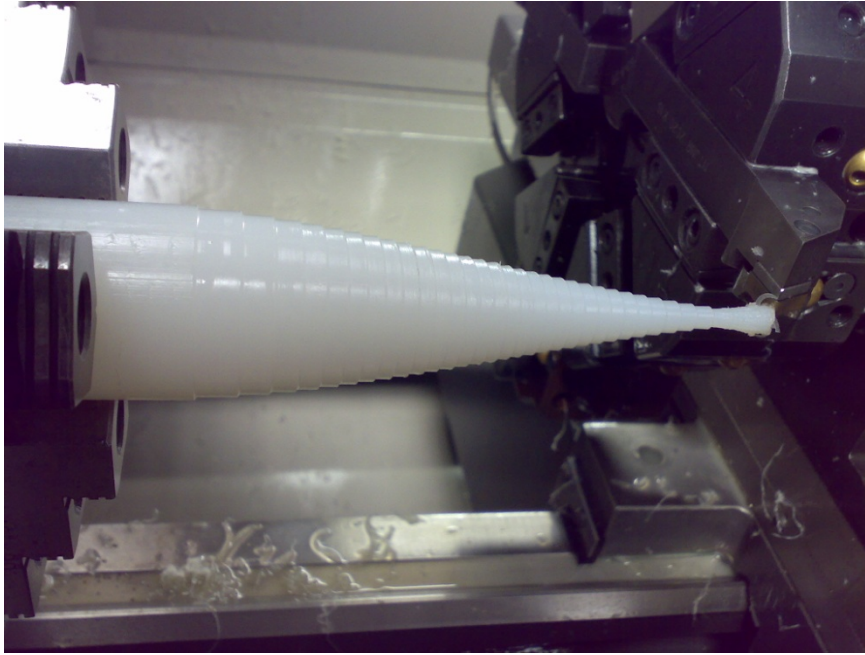


Figura 4.8 – Usinagem da cauda do modelo em poliacetal

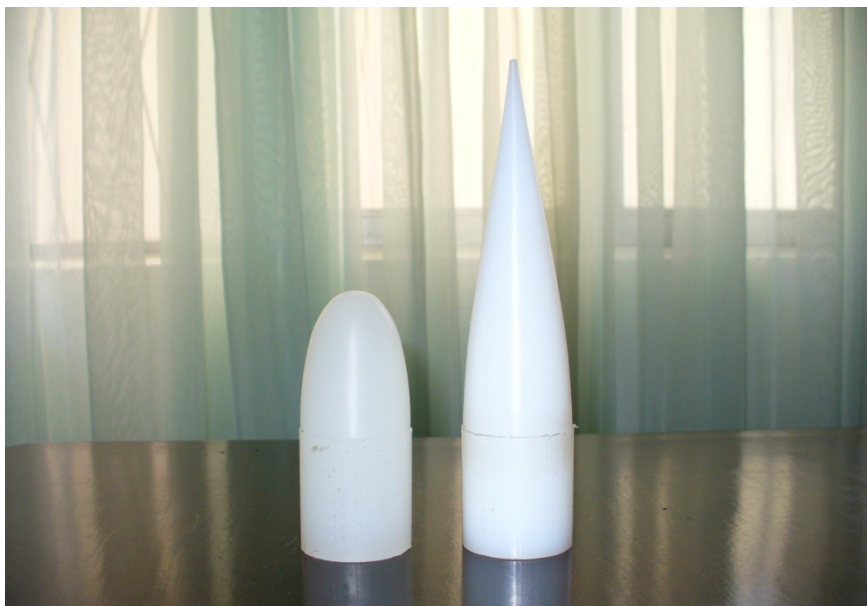


Figura 4.9 – Nariz e cauda do modelo usinados no torno CNC

Para finalizar a construção do modelo uniram-se as duas peças construídas (figura 4.9) com o auxílio do torno mecânico comum. Com este torno foi feito um furo central para montagem de uma haste semelhante a utilizada no protótipo, tudo conforme apresentado na figura 4.10.



Figura 4.10 – Modelo do penetrômetro

Durante a construção do modelo verificou-se a necessidade de inserção de um ponto de apoio no centro da peça para a usinagem no torno CNC, pois se notou que durante o processo de usinagem a peça apresentou uma excessiva vibração comprometendo a qualidade do acabamento superficial, esta circunstância foi mais notada durante a usinagem da peça mais comprida. Além disso, foi necessária a inserção de mais curvas no perfil do aerofólio, bem como, menores aberturas de arco para reduzir os erros gerados pelas curvaturas dos semicírculos.

#### 4.3.1.2. Desenho e usinagem do protótipo

Na construção do protótipo foi adotado o mesmo procedimento de divisão do processo de usinagem em duas partes, tal como foi feito na construção do modelo.

As dimensões externas do corpo do penetrômetro foram fixadas em 100 milímetros de diâmetro por 500 milímetros de comprimento. Estas dimensões básicas foram adotadas em função das dimensões comerciais dos tarugos de alumínio disponíveis. Considerando-se esta premissa e com base na equação do aerofólio de Joukowski (Eq. 4.1) foi determinado o conjunto de pontos que descrevem o perfil externo do corpo do penetrômetro permitindo a construção do desenho e posteriormente a própria usinagem.

Conforme a figura 4.11 foi construído um prolongamento roscado ultrapassando a extremidade do corpo do penetrômetro a fim de possibilitar a fixação da haste ao corpo do penetrômetro. Uma preocupação foi construir uma fixação suficientemente resistente, capaz de absorver as tensões advindas do choque do penetrômetro com o solo.

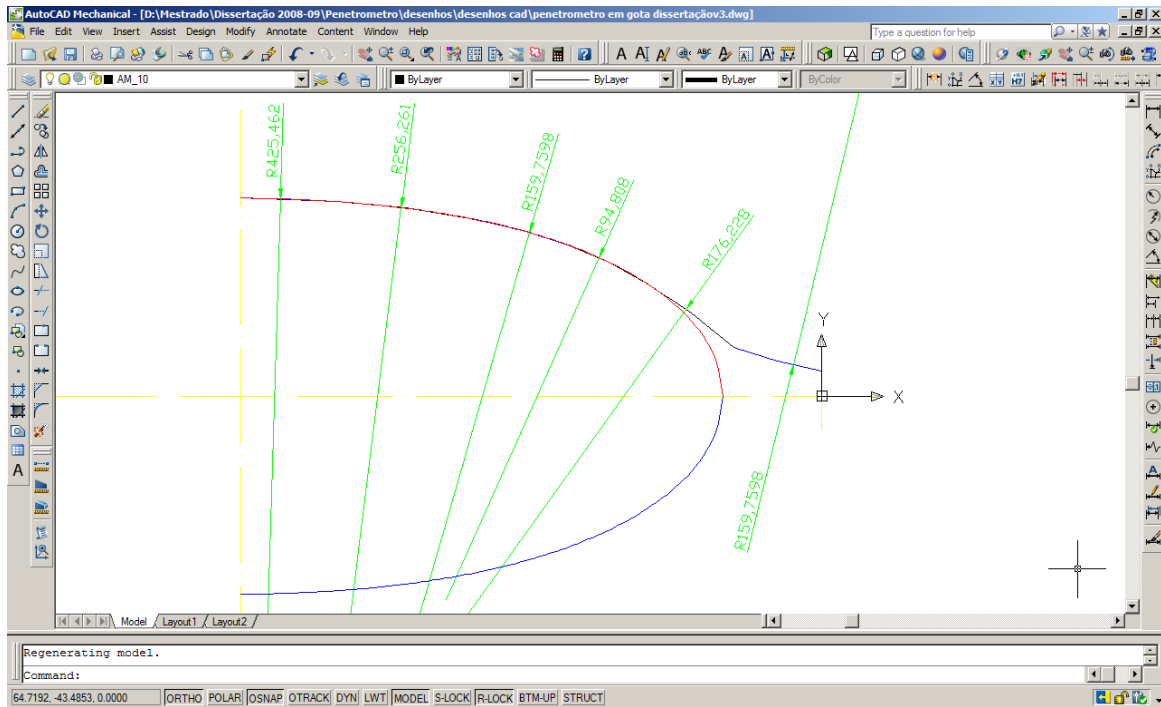


Figura 4.11 – Estruturação das curvas sobre o perfil do nariz

A cauda do penetrômetro foi seccionada, não tenderá a zero como na representado nas figuras 4.3 e 4.4, a fim de permitir a construção de uma passagem para o cabo de transmissão de dados e também para a montagem de um parafuso com olhal de fixação de um cabo de resgate utilizado para a recuperação do equipamento (figura 4.12).

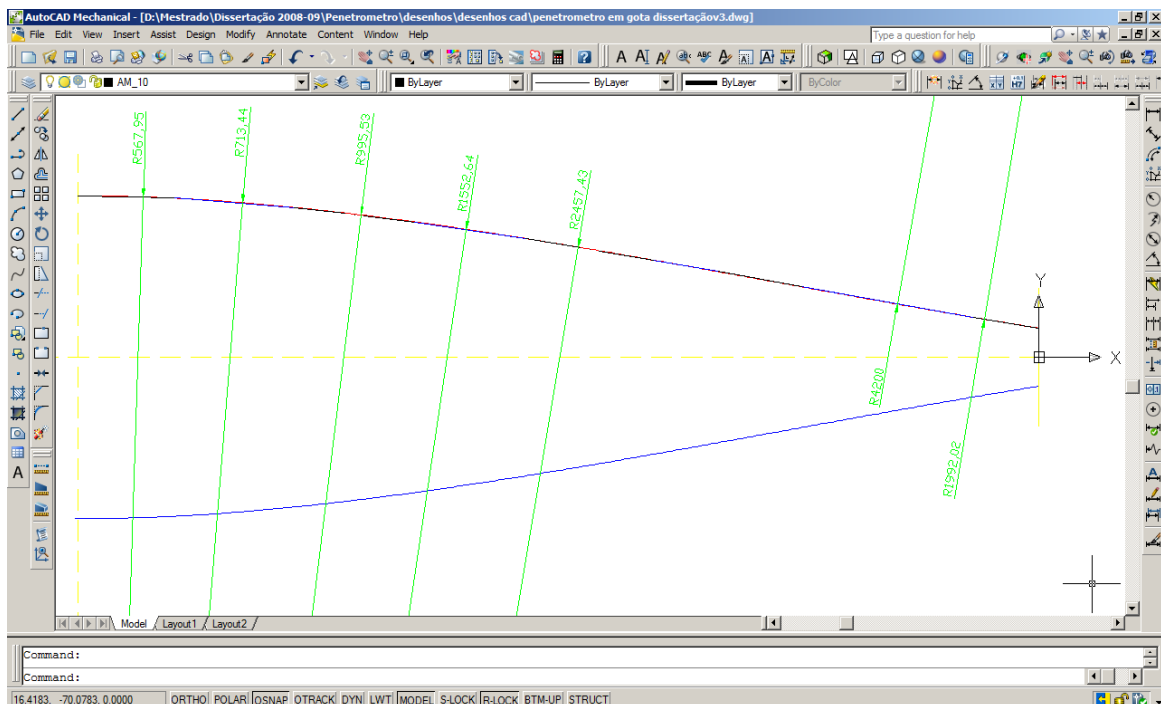
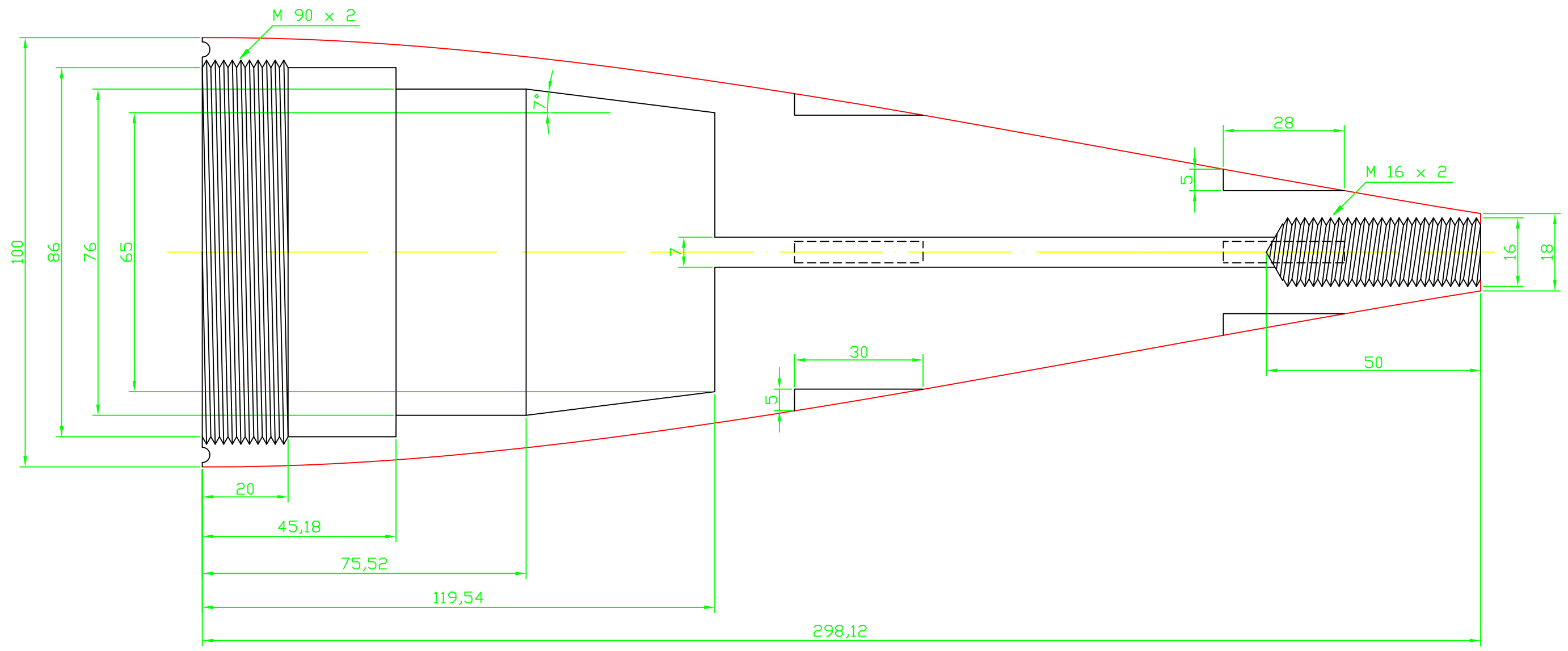


Figura 4.12 – Montagem das curvas sobre o perfil na cauda do penetrômetro

O passo seguinte foi dimensionar o compartimento interno utilizado como abrigo para o acelerômetro. Considerou-se como razoável utilizar uma espessura de parede da ordem de 5 milímetros considerando a necessidade de resistência mecânica do equipamento em virtude do choque com o fundo. A seguir serão apresentados os desenhos técnicos do nariz, da cauda e da aleta lateral do penetrômetro e as vistas em perspectiva resultantes do projeto para a construção do penetrômetro na figura 4.13.





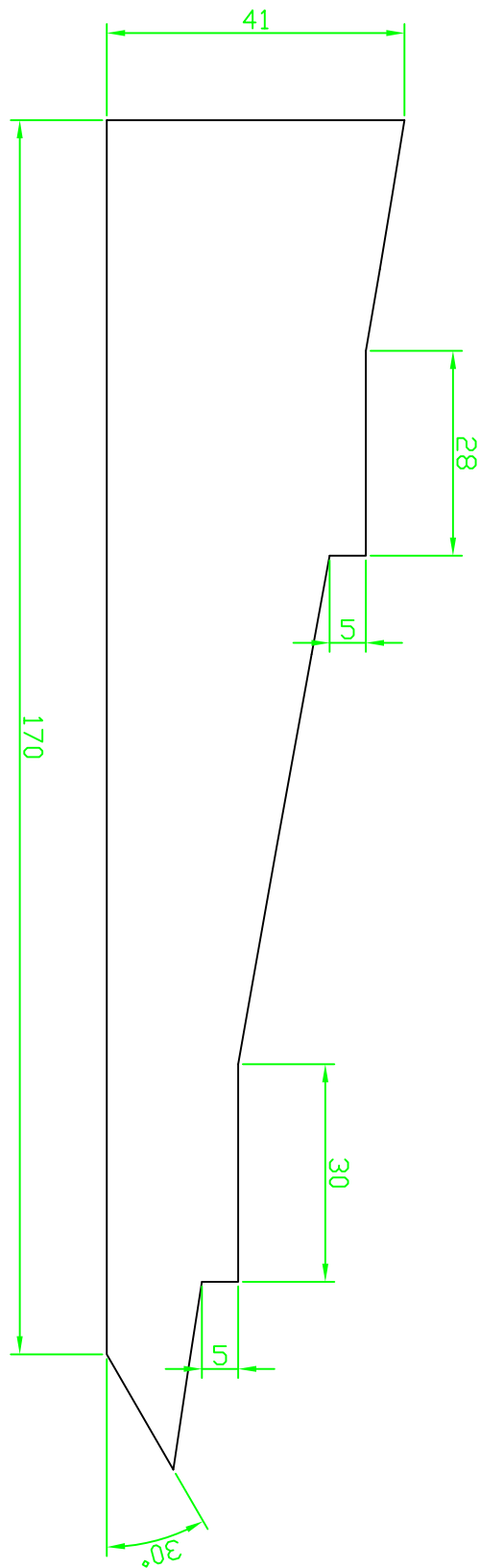
Cauda do Penetrômetro

1/1

Pós - Graduação em Engenharia Oceânica

Anderson Baldez

Março 2009



Aleta do Penetrômetro

1/1

Pós - Graduação em Engenharia Oceânica

Anderson Baldez

Março 2009



(a)



(b)



(c)

Figura 4.13 – Vistas em perspectiva do penetrômetro antes da usinagem.

(a) vista da cabeça; (b) vista da cauda; (c) vista do conjunto



#### 4.3.1.2.1. Usinagem do nariz do protótipo

O processo teve início a partir do corte do tarugo de alumínio na serra de fita Franho modelo FRH 260 (figura 4.14), no comprimento de corte 194 milímetros.



Figura 4.14 – Operação de corte do tarugo de alumínio na serra de fita

Após o corte o segmento foi levado para usinagem em um torno universal. Nesta operação foi realizado o faceamento da peça e construído um furo guia, para evitar vibração durante o processo de usinagem (figura 4.15 (a) e (b)).

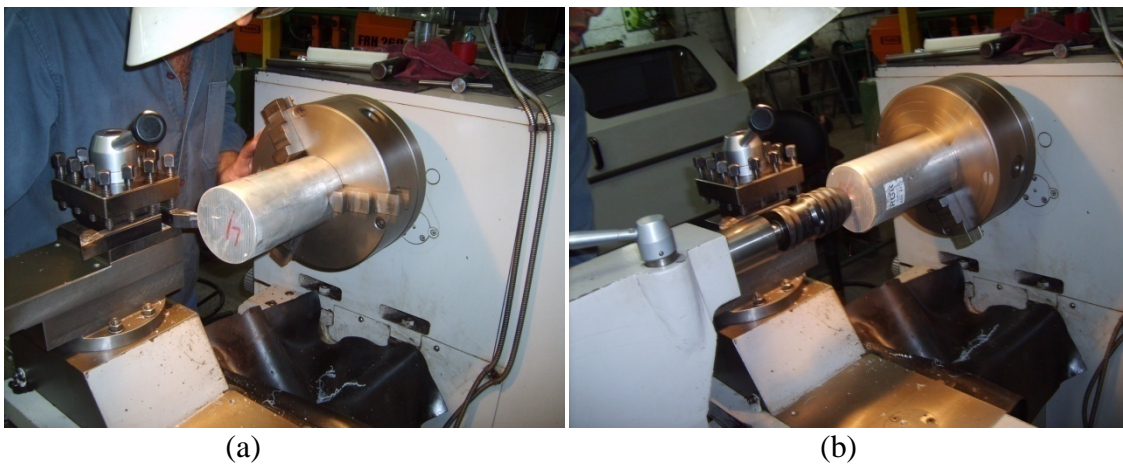


Figura 4.15 – (a) centralização e faceamento da peça (b) construção de furo guia

Após estes procedimentos iniciais foi realizada uma usinagem externa (desbaste) a fim de retirar as imperfeições provenientes do processo de extrusão do tarugo (figura 4.16).

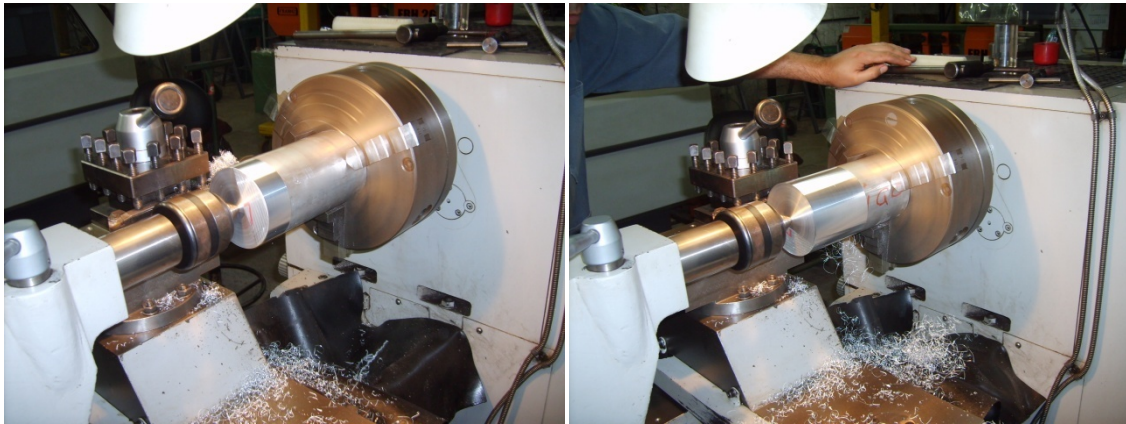


Figura 4.16 – Usinagem de desbaste e aproximação de medidas

No passo seguinte deu-se início a construção do alojamento do acelerômetro. O espaço interno fica localizado na cabeça do penetrômetro conforme pode ser visto nos desenhos técnicos de construção do equipamento. O espaço interno foi aberto por usinagens sucessivas (figura 4.17) em que foi utilizado um conjunto de brocas conforme pode ser visto na figura 4.18, sendo que as medidas finais foram dadas por usinagem interna com ferramenta de corte de forma definida conforme figura 4.19.

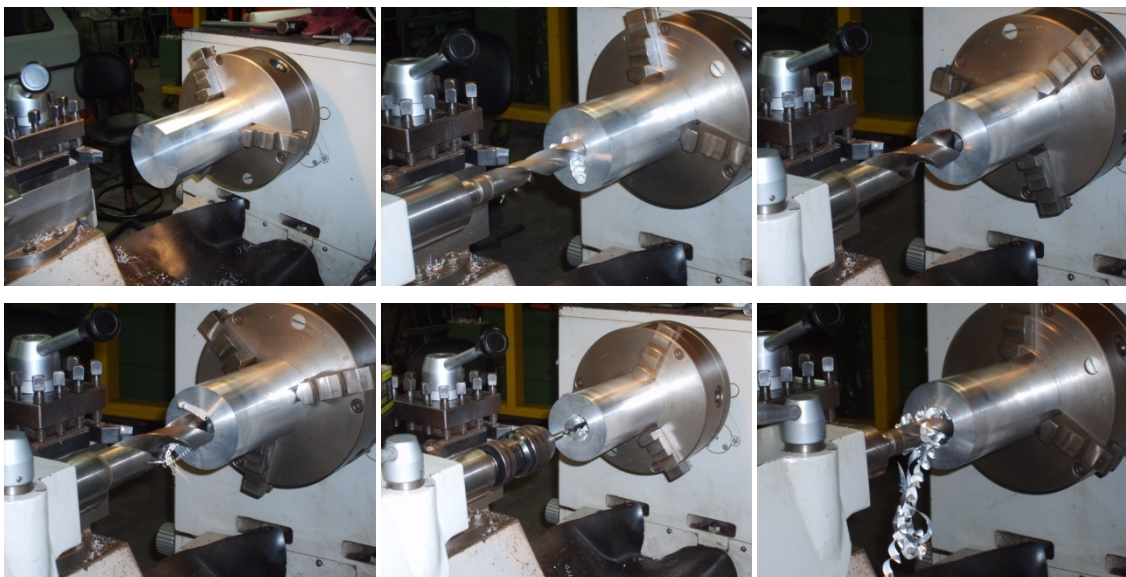


Figura 4.17 – Operação de usinagem sucessiva para construção da cavidade interna do nariz do penetrômetro



Figura 4.18 – Conjunto de brocas helicoidais

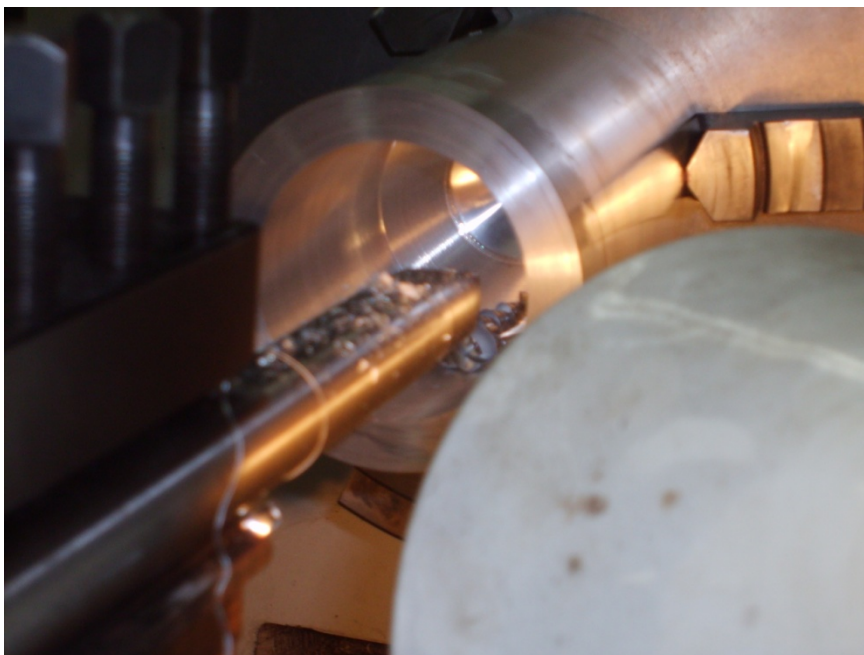
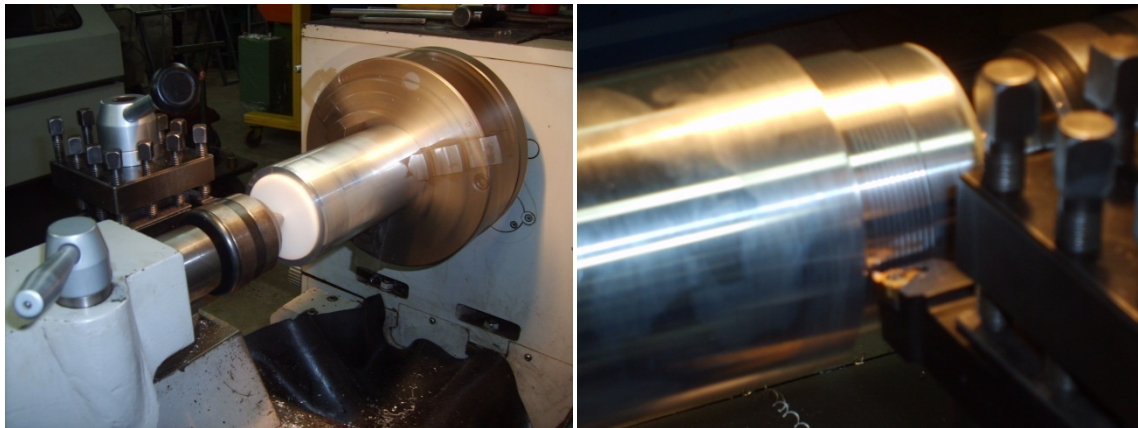


Figura 4.19 – Medidas finais da câmara do acelerômetro dadas por ferramenta de corte

Para que seja feita a usinagem externa da peça sem o risco de vibrações excessivas utilizou-se um disco de plástico no espaço da usinagem interna a fim de apoiar o ponto do torno, conforme pode ser visto nas figuras 4.20 (a) e (b).



(a) (b)  
Figura 4.20 – Usinagem externa. (a) Disco de plástico para apoio do ponto,  
(b) rosca no corpo do penetrômetro

A figura 4.21 mostra o nariz do penetrômetro depois da usinagem no torno universal com o espaço interno e rosca externa já usinados (estágio intermediário de fabricação) e prontos para usinagem do formato externo (aerofólio Joukowski simétrico) que foi feita no torno CNC.



Figura 4.21 – Conclusão da usinagem do nariz do penetrômetro em torno comum

Utilizando os dados extraídos do desenho do *AutoCad® Mechanical 2008* se montou a tabela 4.2 com os pontos para montagem do programa no torno CNC.

Tabela 4.2 – Pontos a serem utilizados na programação do torno CNC para construção do nariz do penetrômetro (valores em milímetros)

<i>Nariz</i>						
Curva	Sentido de curvatura para a usinagem	Raio	Pontos das extremidades da curva			
			Início		Fim	
			x	y	x	y
1	horário	159,76	0	6,35	-22,161	12,352
2	anti-horário	176,228	-22,161	12,352	-44,462	28,662
3	anti-horário	94,808	-44,462	28,662	-63,65	37,96
4	anti-horário	159,76	-63,65	37,96	-87,579	44,591
5	anti-horário	256,261	-87,579	44,591	-122,762	49,151
6	anti-horário	425,462	-122,762	49,151	-147	50,013

Com a programação concluída, fixou-se o nariz do penetrômetro ao torno CNC. Mas manteve-se a tampa de termoplástico sobre a cavidade interna a fim de evitar deformações sobre a peça, pois o sistema de fixação funciona com pressão de óleo, ou seja, a pressão de fixação é elevada. Após a fixação da peça na placa do torno, realiza-se o posicionamento da ferramenta do torno, informando ao sistema do torno onde há material excedente a ser retificado (figura 4.22).

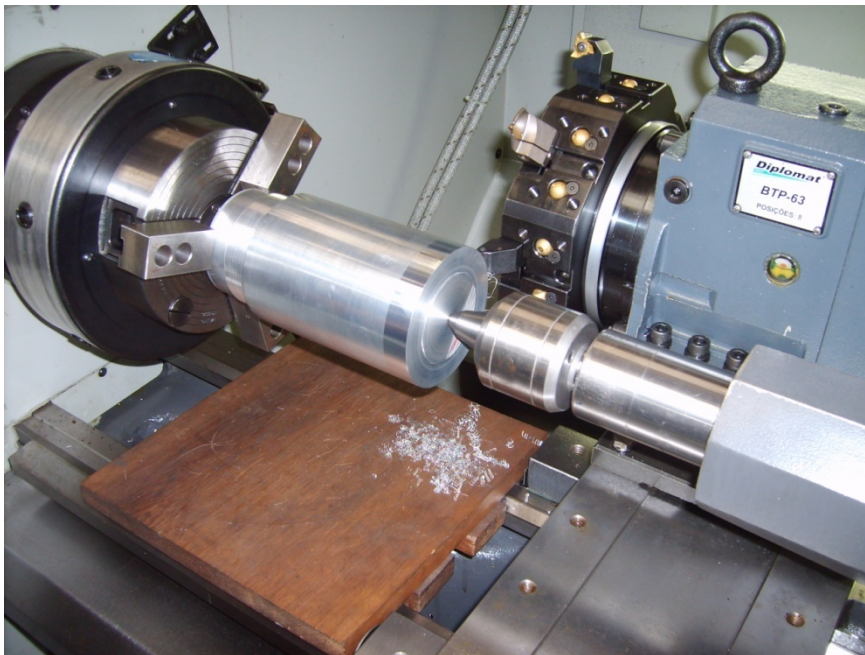


Figura 4.22 – Fixação do nariz do penetrômetro e posicionamento da ferramenta

A seguir foi dado início ao processo de usinagem do formato final conforme mostrado em seqüência na figura 4.23.

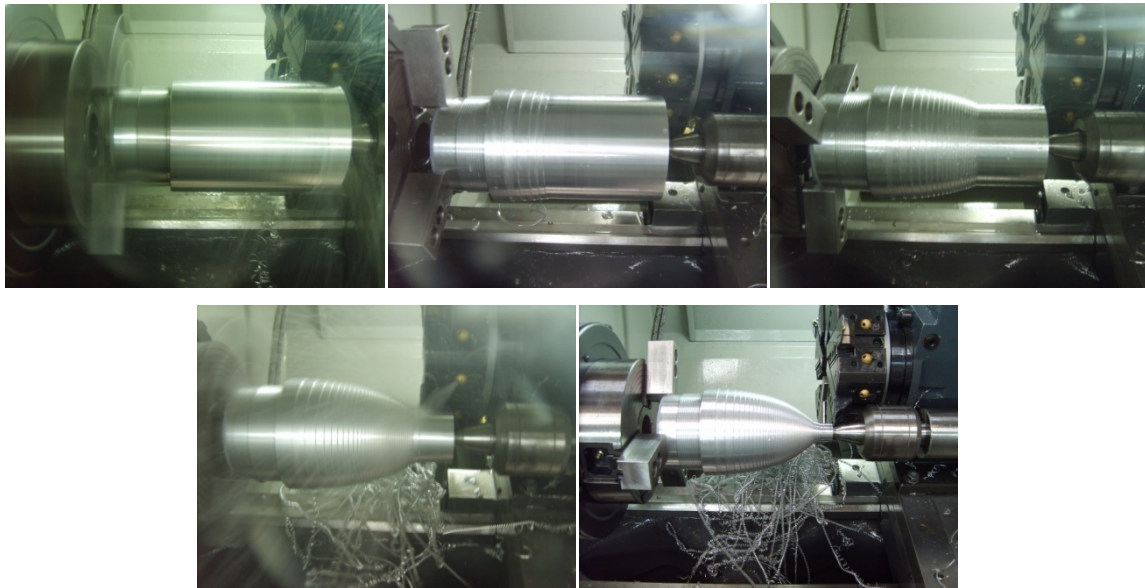


Figura 4.23 – Processo de usinagem no torno CNC do nariz do penetrômetro

Finalizada a etapa da usinagem no torno CNC obteve-se a peça acabada conforme mostrado na figura 4.25 a seguir.



Figura 4.25 – Peça finalizada (nariz do penetrômetro)

#### 4.3.1.2.2. Usinagem da cauda e soldagem das aletas direcionais no protótipo

Assim como no nariz do penetrômetro, a cauda também foi construída em alumínio.

A metodologia de construção será a mesma do nariz do penetrômetro, com corte do tarugo, usinagem em torno universal (centralização, furo guia, passe de limpeza, alargamento interno e rosqueamento) e a seguir usinagem do perfil externo no torno CNC.

A figura 4.26 apresenta início do processo com o corte do tarugo em 300 milímetros de comprimento para a usinagem da cauda.



Figura 4.26 – Corte do tarugo de alumínio para construção da cauda

A figura 4.27 mostra o tarugo fixado no torno universal, após centralização e furo guia, e sendo realizado o passe de limpeza e desbaste.

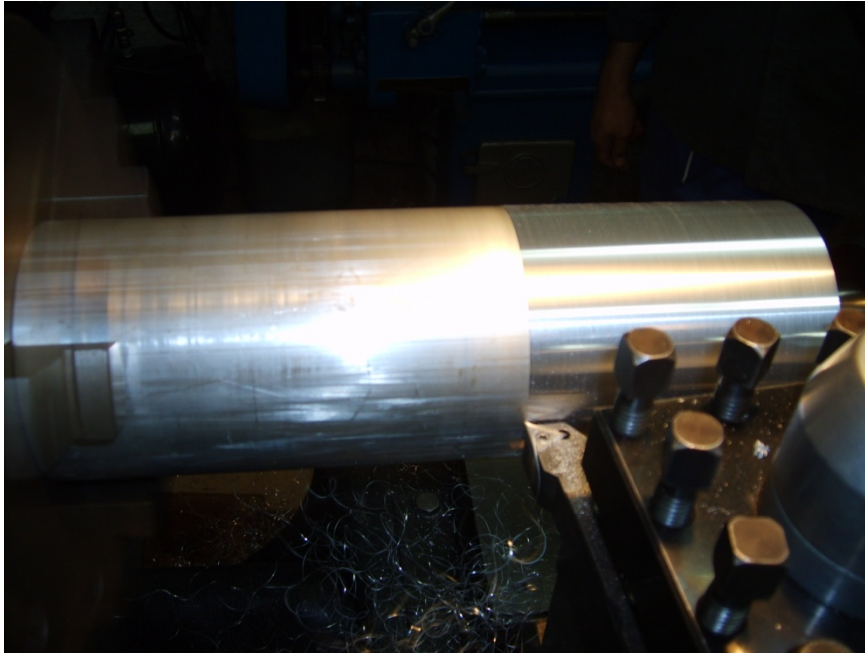
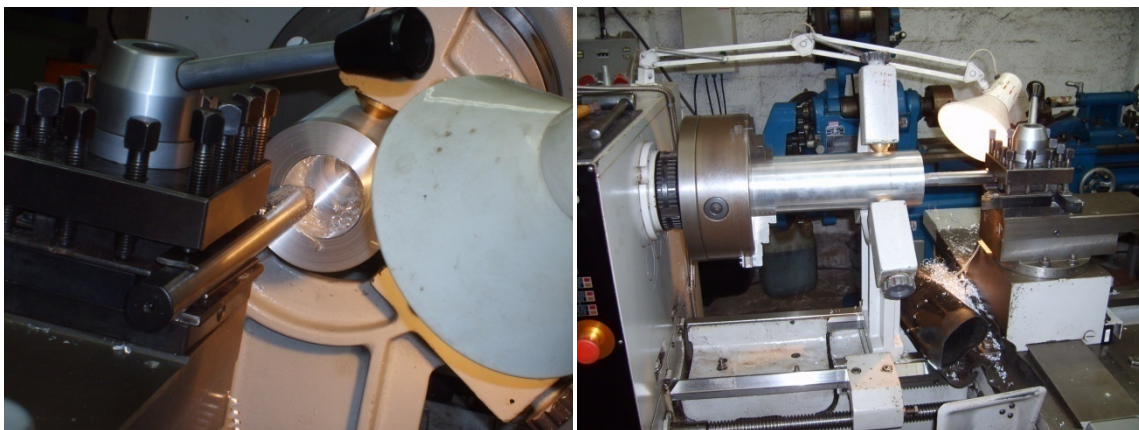


Figura 4.27 – Operação de limpeza e desbaste da peça

Diferentemente do que ocorreu na usinagem do nariz durante a abertura da cavidade interna no torno mecânico comum, na usinagem da cauda do penetrômetro foi usado um acessório de tornearia chamado de luneta, trata-se de uma peça constituída por um aro de aço e três apoios perpendiculares a este aro igualmente espaçados, este acessório possui o intuito de evitar vibração da peça devido ao comprimento mantendo-a centralizada durante o processo de usinagem, garantindo a precisão e acabamentos a peça. A figura 4.28 (a) mostra o início do processo de usinagem com a ferramenta de corte após a utilização das brocas helicoidais com a utilização da luneta e a figura 4.28 (b) mostra como foi o uso do acessório.



(a)

(b)

Figura 4.28 – Operação de usinagem da cavidade interna. (a) Início do processo de abertura com a ferramenta de corte, (b) utilização da luneta



Após alcançar o diâmetro especificado pelo desenho técnico, ainda com o uso da luneta, inicia-se o rosqueamento interno (figura 4.29) processo que consiste na usinagem de uma rosca para a união entre o nariz e a cauda a fim de obter a montagem final do corpo do penetrômetro.

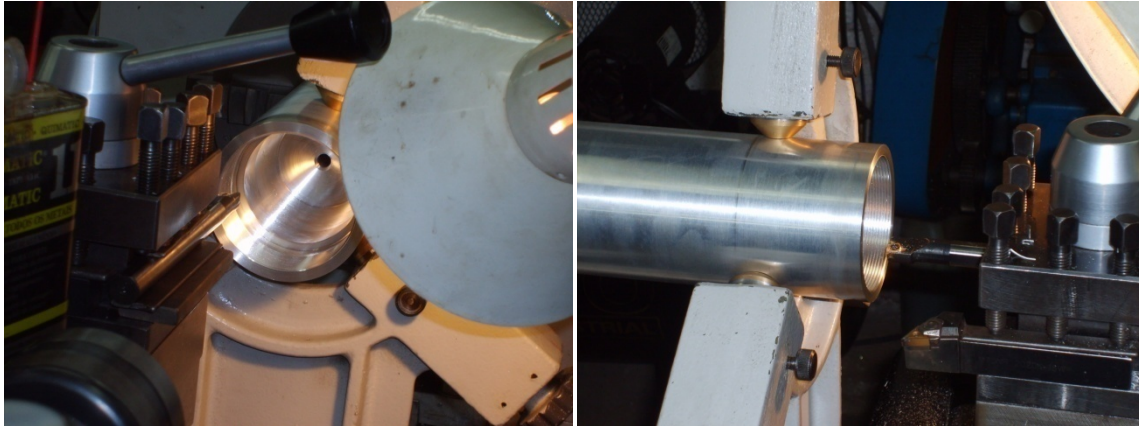


Figura 4.29 – Processo do rosqueamento interno

Com o término do rosqueamento, assim como na usinagem do nariz do penetrômetro, foi construída uma peça de plástico, com rosca, para ser fixada na peça de alumínio a fim de que possa haver uma fixação da cauda do penetrômetro na placa do torno CNC sem causar deformações as roscas internas.

Utilizando os dados do desenho técnico da cauda do penetrômetro construído no *AutoCad® Mechanical 2008* a tabela 4.3 apresenta os pontos para montagem do programa no torno CNC.

Tabela 4.3 – Pontos a serem utilizados na programação do torno CNC para construção da cauda do penetrômetro (valores em milímetros)

<b>Cauda</b>						
Curva	Sentido de curvatura para a usinagem	Raio	Pontos das extremidades da curva			
			Início		Fim	
			x	y	x	y
1	horário	1992,02	0	9	-20,55	12,388
2	horário	4200	-20,55	12,388	-73,556	21,803
3	reta	0	-73,556	21,803	-99,804	26,561
4	reta	0	-99,804	26,561	-119,599	30,09
5	anti-horário	2457,43	-119,599	30,09	-159,115	36,776
6	anti-horário	1552,64	-159,115	36,776	-193,718	41,952
7	anti-horário	995,53	-193,718	41,952	-231,158	46,454
8	anti-horário	713,44	-231,158	46,454	-268,286	49,328
9	anti-horário	567,95	-268,286	49,328	-298,116	50,013

Com base na tabela acima realizou-se a programação no sistema computadorizado do torno CNC em seguida fixou-se a peça da cauda do penetrômetro e logo a seguir se realizou o posicionamento da ferramenta de usinagem. A figura 4.30 mostra a seqüência de fabricação da cauda do penetrômetro no torno CNC. Pode-se perceber próxima a placa do torno a peça de plástico destinada a auxiliar na fixação de todo o conjunto (indicada na figura por uma seta amarela).

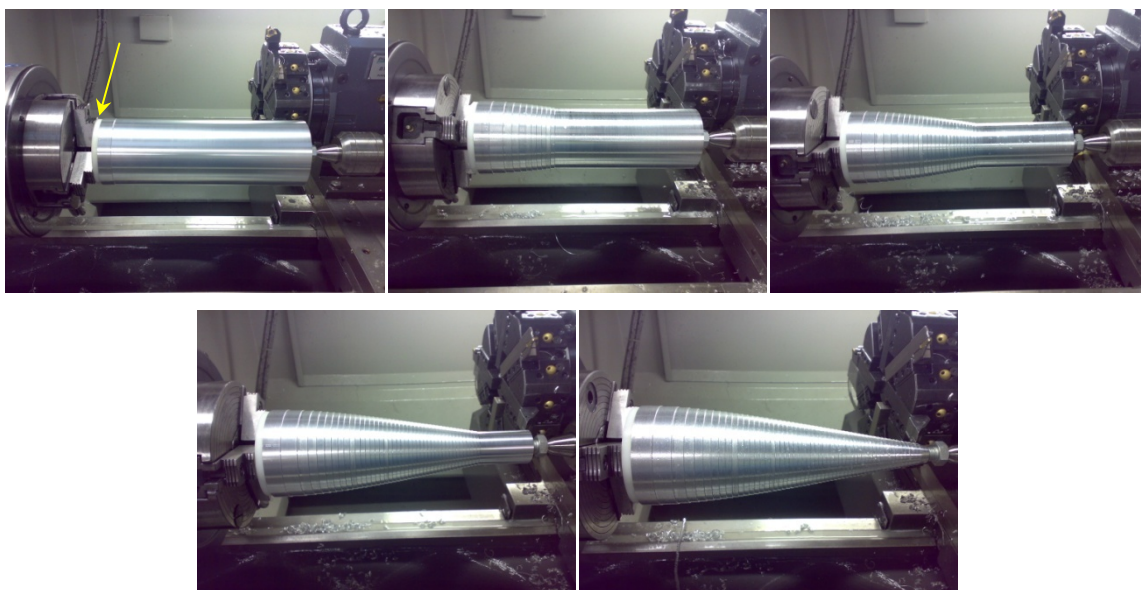


Figura 4.30 – Processo de usinagem da cauda no torno CNC

A figura 4.31 mostra a peça acabada pelo torno CNC.

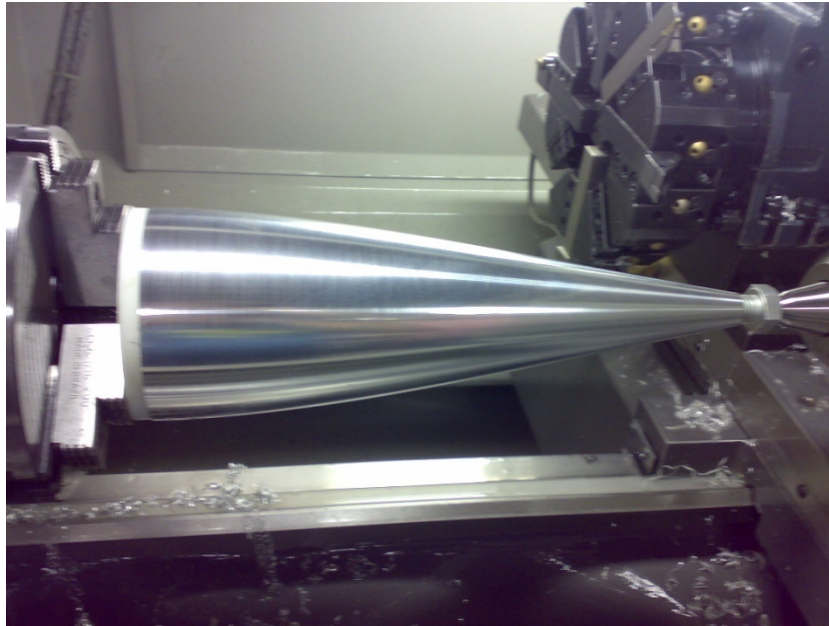


Figura 4.31 – Cauda do penetrômetro ainda fixada no torno CNC

A figura 4.32 mostra o corpo do penetrômetro pronto. Nela pode ser visto o nariz e a cauda unidos através do rosqueamento na parte central. No ponto de contato entre as duas partes foi inserido um anel de borracha a fim de estabelecer condição de estanqueidade, uma vez que o equipamento deverá operar sob pressões maiores que a atmosférica. A cavidade interna não poderá sofrer acesso de água, pois nela estarão o acelerômetro e outros elementos eletrônicos. Para tanto foi feito um teste pneumático preliminar injetando-se ar comprimido a  $12 \text{ kg/cm}^2$  na cavidade interna e constatou-se a não ocorrência de vazamentos.



Figura 4.32 – Corpo do penetrômetro

Na cauda foram realizados oito rasgos fresados para apoio das aletas direcionais e para facilitar o processo de soldagem das mesmas. As aletas foram soldadas a cauda utilizando o processo de soldagem TIG (figura 4.33).

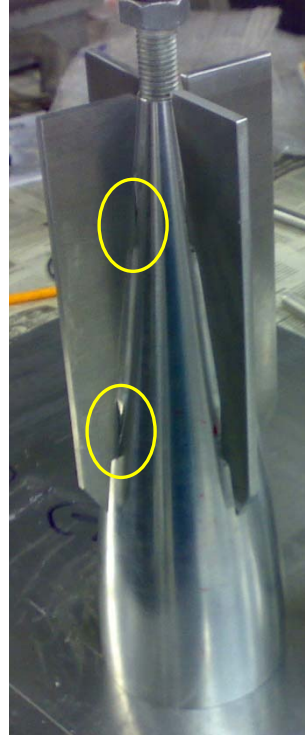


Figura 4.33 – Montagem das aletas direcionais

Apesar do alumínio ser um material resistente a corrosão pela água salgada optou-se por aplicar uma tinta de revestimento protetivo e também pela aparência estética do equipamento (figura 4.35), com aplicação feita através de pistola de pintura. A tinta utilizada (*Allchem Química* – Tinta p/galvanizado e alumínio; cor branca) eliminou a necessidade de aplicação de fundo, sendo indicada para superfícies galvanizadas e de alumínio.



Figura 4.35 – Corpo do penetrômetro pintado com tinta para galvanizado e alumínio

### 4.3.2. Desenho e usinagem da haste e das sapatas do protótipo

#### 4.3.2.1. Haste

A haste foi construída em aço inox AISI 304 de  $\frac{1}{2}$  polegada de diâmetro com rosca nas duas extremidades. Uma das extremidades será fixada ao corpo do penetrômetro e a outra roscada numa sapata escolhida em função do tipo de solo (figura 4.36).

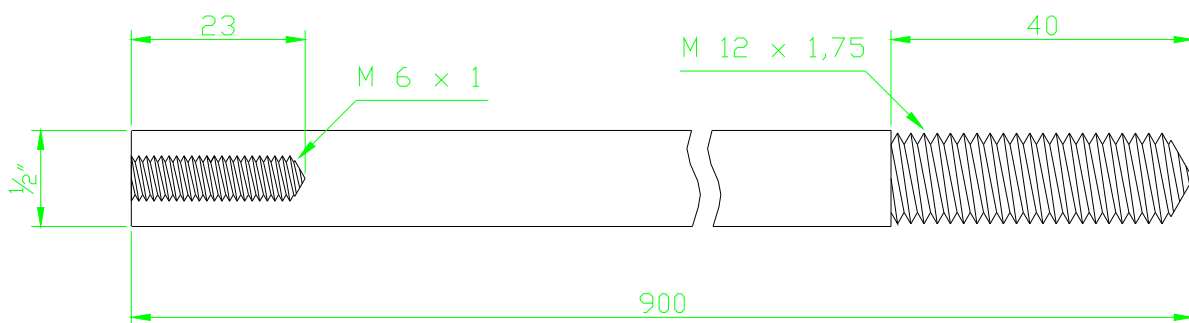


Figura 4.36 – Dimensões e roscas da haste em milímetros

#### 4.3.2.2. Sapatas

As sapatas são peças no formato de discos construídas em aço inox AISI 304 utilizadas para entrar em contato direto com o solo. Essas sapatas são fixadas na extremidade da haste através de rosca própria. Conforme o tipo de solo em estudo se utilizará uma sapata específica. Quanto maior a resistência do solo menor será o diâmetro da sapata (areia), enquanto que a sapata de maior diâmetro será utilizadas para solos mais moles. No caso deste estudo foram construídas duas sapatas, 25 e 50 milímetros de diâmetro por 5 e 10 milímetros de altura, respectivamente (figura 4.37).

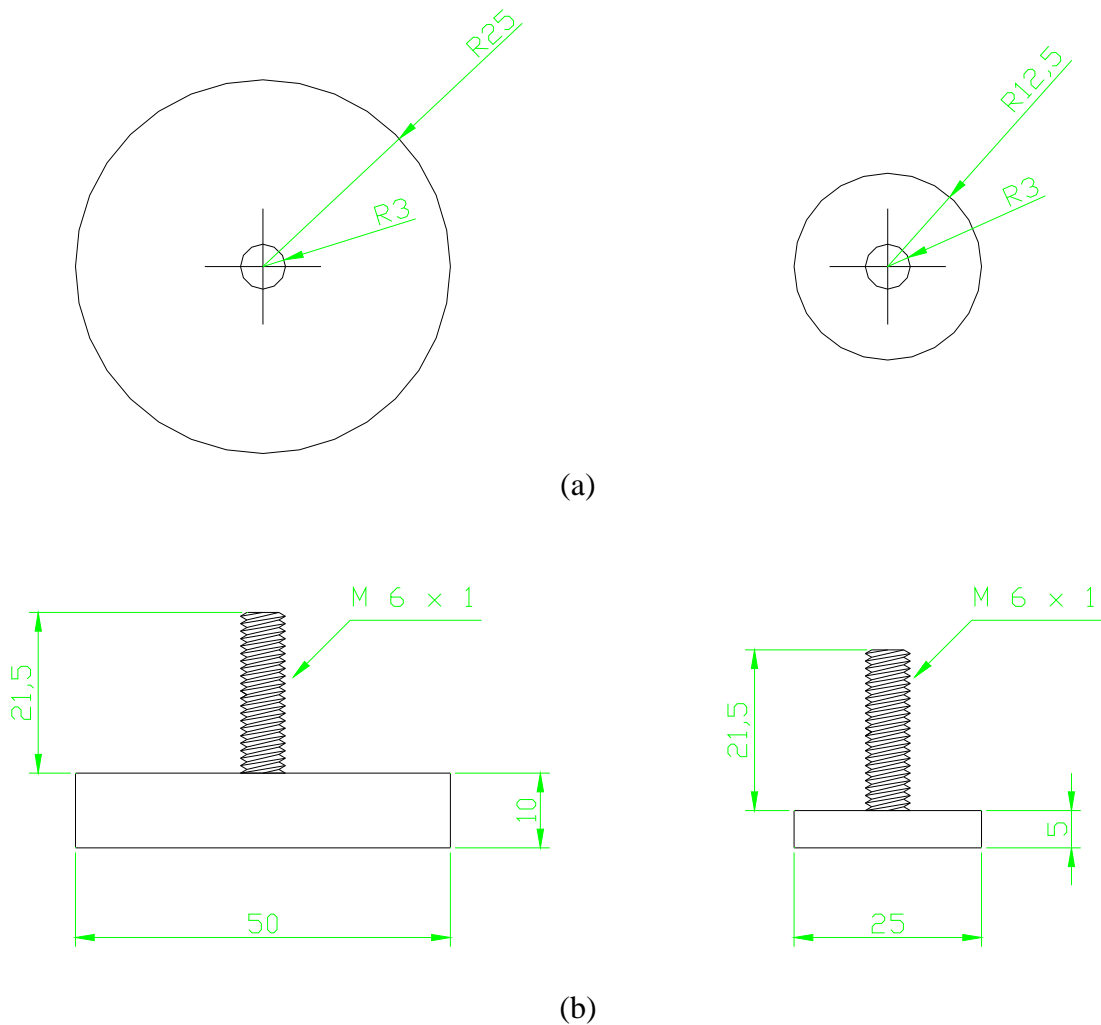


Figura 4.37 – Desenho com as dimensões das sapatas; (a) vista superior (b) vista lateral

#### 4.4. Sistema Eletrônico de Aquisição e Armazenagem Digital dos Dados

##### 4.4.1. Acelerômetro 25g

O acelerômetro utilizado neste trabalho foi projetado e construído pela empresa *Vernier Software & Technology*. O acelerômetro usa um circuito eletrônico desenvolvido para controlar a liberação de *air bags* em automóveis. Este circuito integrado contém um micro mecanismo com “dedos” muito finos esculpido em silicone. Estes dedos se flexionam quando acelerado. Eles estão arranjados e conectados as placas de um capacitor. Quando os dedos flexionam a capacitância varia e um circuito incluso no circuito integrado detecta esta

mudança da capacidade do capacitor e converte-a em um sinal de voltagem e outro circuito filtra e amplifica o sinal gerado (Vernier, 2007).

O acelerômetro mede a aceleração ao longo da linha marcada pela seta no corpo do sensor (figura 4.38). As acelerações podem ser medidas em metros por segundo ao quadrado ( $\text{m/s}^2$ ), Newton por quilograma força (N/kgf) ou g's, onde um g é a aceleração devida à gravidade na superfície da Terra.



Figura 4.38 – Vista do acelerômetro utilizado neste trabalho

O sensor registra variações de acelerações entre  $-25 \text{ g}$  ( $-250 \text{ m/s}^2$ ) até  $+25 \text{ g}$  ( $250 \text{ m/s}^2$ ). Este instrumento é dimensionado para resistir variações na aceleração de até  $500 \text{ g's}$ , sem que haja risco de dano.

Um ruído inerente ao próprio dispositivo pode ser observado quando o instrumento é utilizado em condições de baixa aceleração. O ruído está na ordem de acelerações de  $2,5 \text{ m/s}^2$  de pico a pico. Logo, os melhores resultados são alcançados se as experiências forem realizadas ao redor de magnitudes ou mudanças na aceleração que excedam  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Segundo a *Vernier Software & Technology*, a maioria das experiências pode usar o acelerômetro sem uma prévia calibração ou, simplesmente, usar a opção zerar no programa de aquisição de dados.

Se necessária uma calibração mais apurada pode ser usada a aceleração da gravidade terrestre. Neste caso, para calibrar o sensor é preciso posicionar o acelerômetro na direção vertical de modo que a seta aponte para baixo a fim de que se tenha o primeiro ponto de

calibração, definir isso como  $-9,8 \text{ m/s}^2$  ou  $-1 \text{ g}$ . Logo, girar o acelerômetro de modo que a seta aponte para cima também na direção vertical e assim definir o segundo ponto de calibração,  $+9,8 \text{ m/s}^2$  ou  $+1 \text{ g}$ . O acelerômetro lerá zero quando disposto com a seta na horizontal, devido à componente gravitacional ser zero nesta direção.

O sensor possui um circuito de auto identificação quando usado com *LabQuest*, *LabPro*®, *Go! Link*, *SensorDAQ*, *EasyLink*, ou *CBL 2* (marcas comerciais dos módulos de aquisição de dados da *Vernier Software & Technology*). O software destes sistemas de aquisição de dados identifica o sensor automaticamente através de um resistor interno e configura-o para os usos dos parâmetros predefinidos apropriados ao sensor reconhecido (Vernier, 2007).

Como durante a montagem o cabo do acelerômetro foi cortado para a inserção de conectores no padrão brasileiro e também para a inclusão de um cabo de extensão, houve mudança na impedância do conjunto, fazendo com que o circuito de auto-identificação passasse a ter alguma dificuldade na identificação do acelerômetro como tal, passando a identificá-lo como sendo um amperímetro. Isto, entretanto não implica em perda na qualidade do dado adquirido.

#### **4.4.2. Interface de aquisição de dados – *LabPro*®**

O *LabPro*® é um pequeno computador dedicado à tarefa de aquisição de dados e de controlar o fluxo de saída deles. Basicamente converte a resposta do sensor para um formato de fluxo de dados digitais. Contém um microprocessador capaz de se comunicar com um computador, com calculadoras gráficas da *Texas Instruments* ou com um computador de mão (*Palm Handheld*).

O *LabPro*® contém em sua placa eletrônica dois tipos diferentes de memória: *ROM* e *FLASH RAM*. A memória *ROM* contém as informações fundamentais que permitem ao *LabPro*® começar a carregar seu pequeno sistema operacional. O sistema operacional é carregado em 8 Mbits da memória *FLASH*. A memória de *FLASH* tem uma parte que pode ser usada para o armazenamento de dados por certo período de tempo, quando programado para ser utilizado remotamente, o número de dados armazenados pode chegar a aproximadamente 12.000 pontos (Vernier, 2000, 2002).



As informações podem ser introduzidas no *LabPro* utilizando-se uma das três diferentes maneiras: pela porta do *GraphLink* no fundo do dispositivo, pela porta RS-232 ou pela porta USB (versão 1). Apenas pode ser usada uma porta de cada vez. A porta *GraphLink* é utilizada para uso exclusivo das calculadoras gráficas da *Texas Instruments* enquanto as portas USB e RS-232 podem ser utilizadas por computadores convencionais.

Nas laterais do *LabPro* existem seis portas de interface para aquisição de dados. Em um dos lados há quatro portas identificadas de CH1 até CH4 para aquisição de dados analógicos como sensores de temperatura, pH, força, acelerômetros e outros. Na outra lateral há duas portas digitais identificadas por DIG/SONIC1 e DIG/SONIC2 para aquisição de dados de sensores digitais como detectores de movimento, monitor de radiação, tacômetro digital e outros (figura 4.39).

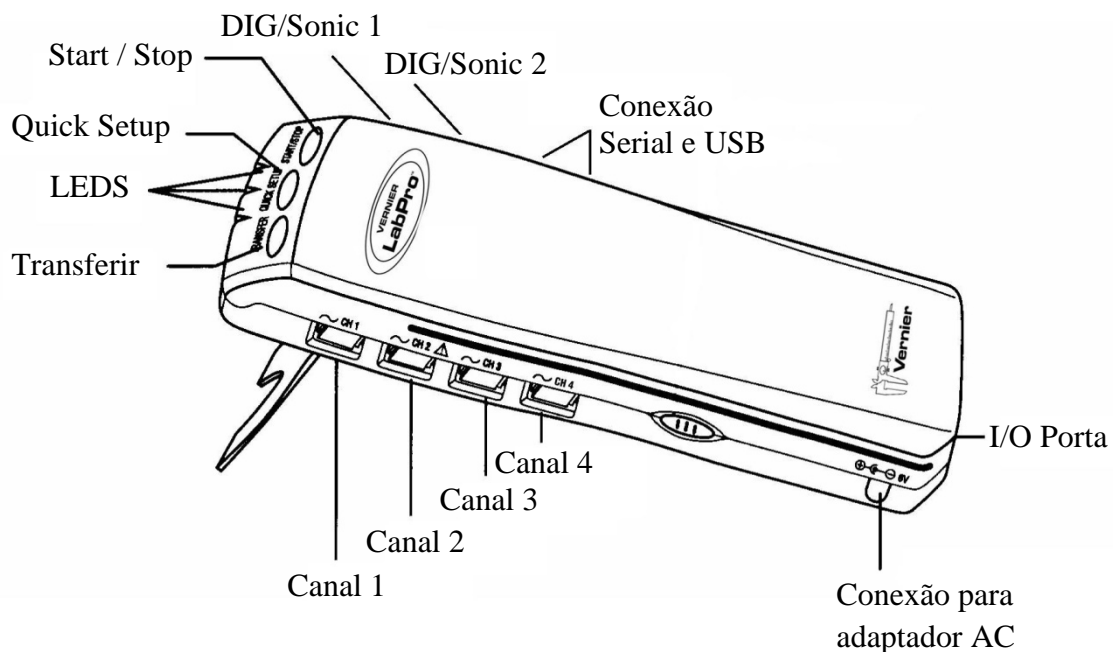


Figura 4.39 – Interface do *LabPro*® (adaptado de Vernier, 2000)

#### 4.4.3. Sistema de programação e aquisição de dados – *Logger Pro 3*

O *Logger Pro 3* é um programa de computador que permite adquirir e analisar dados dos dispositivos da *Vernier* como, *LabPro*®, *Go! Link*, *Go!Temp*, *Go! Motion* e outros dispositivos de interface de dados daquela empresa.

Para o uso deste programa é necessário que o mesmo seja instalado em um computador com ambiente Microsoft Windows ® ou Macintosh.

O programa apresenta uma interface inicial com uma tabela, uma área gráfica para recebimento e plotagem de dados e um indicador digital da grandeza que se está medindo. O mesmo programa permite o tratamento dos dados, possibilitando análises estatísticas, integração de áreas, inserção de retas de tendência e de tangência sobre o gráfico gerado. A figura 4.40 apresenta o programa instalado no ambiente Windows Vista™ e apresentando um gráfico plotado.

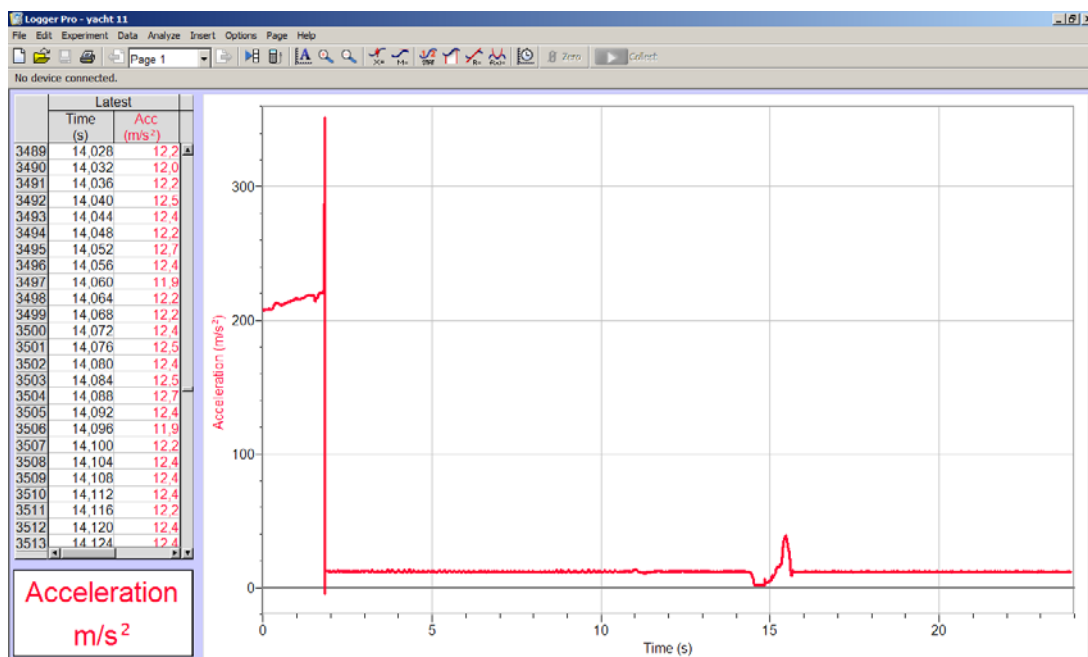


Figura 4.40 – Ambiente do Programa *Logger Pro 3*

O *Logger Pro 3*, neste trabalho, destina-se à definição e ajuste dos parâmetros do sistema de aquisição de dados do *LabPro*®, visualização dos gráficos gerados a partir dos dados coletados pelo experimento em campo e posteriormente exportação destes para uma planilha eletrônica do Microsoft Excel ® 2007.

No programa há uma janela ativa de interface do sistema com o *LabPro*® (figura 4.41).

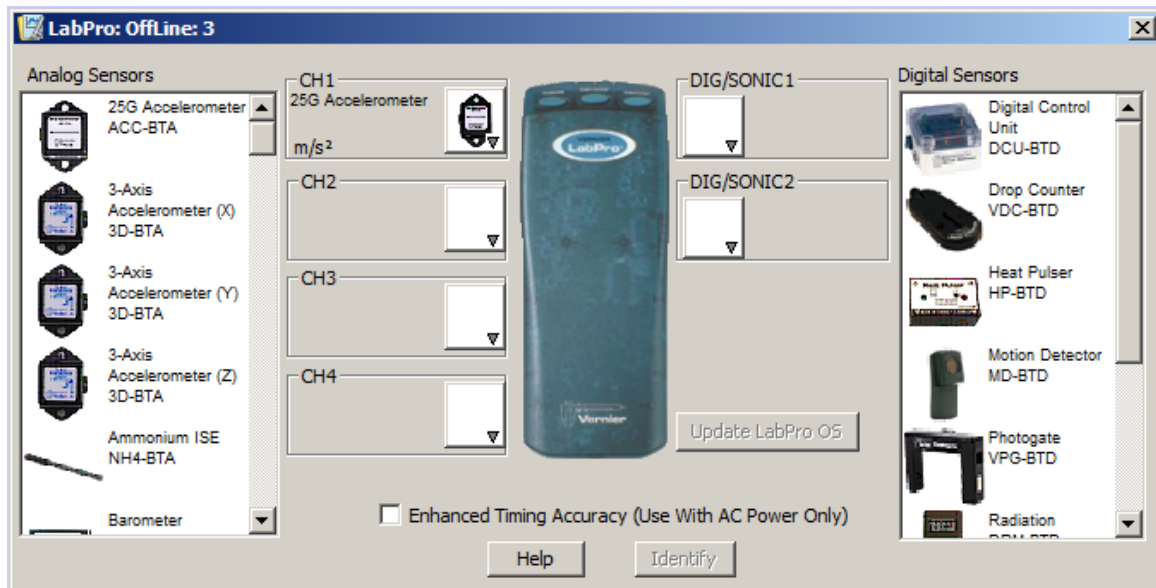


Figura 4.41 – Interface de informações

Nesta janela são mostradas as informações do sensor conectado, as unidades e as leituras atuais. Nas laterais são apresentados quais os sensores que podem ser conectados com esta interface, no lado esquerdo os sensores analógicos e no direito os sensores digitais.

Selecionando o quadrado branco correspondente ao canal de dados o programa apresenta as informações sobre o sensor que está sendo utilizado e que podem ser exploradas de acordo com as necessidades do experimento, são elas:

- Calibração do sensor: Executar uma nova calibração
- Parâmetros de informação do sensor: maneira que o sensor coleta os dados e informa como está calibrado
- Zerar o sensor: parâmetros para zerar o sensor
- Escolher sensor: Seleciona um sensor para o canal
- Alterar os parâmetros atuais: Selecione as unidades disponíveis ou os parâmetros de calibração
- Canal de saída (apenas CH 4): Este canal pode ser usado como um gerador de função.
- Remover sensor: remove o sensor do canal

#### 4.5. Montagem do Corpo do Penetrômetro

Na montagem do corpo do penetrômetro a primeira parte a ser montada foi o acelerômetro, pois fica localizado na parte mais próxima da extremidade inferior do corpo, sujeito aos impactos diretos com o solo. O sensor fica centralizado na parte interna e fixado por uma pequena chapa de alumínio com 5 milímetros de espessura através de dois parafusos de aço inoxidável de 4 milímetros de diâmetro (figura 4.42).



Figura 4.42 – Fixação do acelerômetro ao nariz do penetrômetro

A figura 4.42 mostra também o posicionamento do anel de vedação (borracha) no corpo do penetrômetro.

A cavidade interna do nariz do penetrômetro foi completada com chumbo granulado chegando ao nível dos vedantes, com a finalidade de constituir um lastro para o equipamento. A massa de chumbo utilizada foi de 4 quilogramas.

Na parte interna do corpo foi instalado o conector, o mesmo fica localizado acima do nível do lastro de chumbo. O papel do conector é realizar a ligação do cabo do acelerômetro ao cabo multiplexado de 6 condutores o qual levará o sinal do sensor até o *LabPro*®.

O cabo multiplexado sai pela parte de trás do penetrômetro através de um furo de 5 milímetros de diâmetro realizado no centro do parafuso de aço inoxidável de 16 milímetros de diâmetro instalado com o objetivo de suportar a alça de amarração do cabo de resgate do

equipamento. Este parafuso foi roscado e fixado com trava rosca líquido a fim de evitar a entrada de água nos filetes e consequentemente na cavidade interna do penetrômetro (Figura 4.43).

Uma corda trançada branca de 6 milímetros de diâmetro foi escolhida para funcionar como cabo de resgate do penetrômetro. A corda foi fixada na alça de inox através do nó de fateixa, utilizado em operações no mar para fixar cabos em barras ou anéis.

A abertura por onde passa o cabo multiplexado foi selada com silicone a frio a fim de prevenir a entrada de umidade.

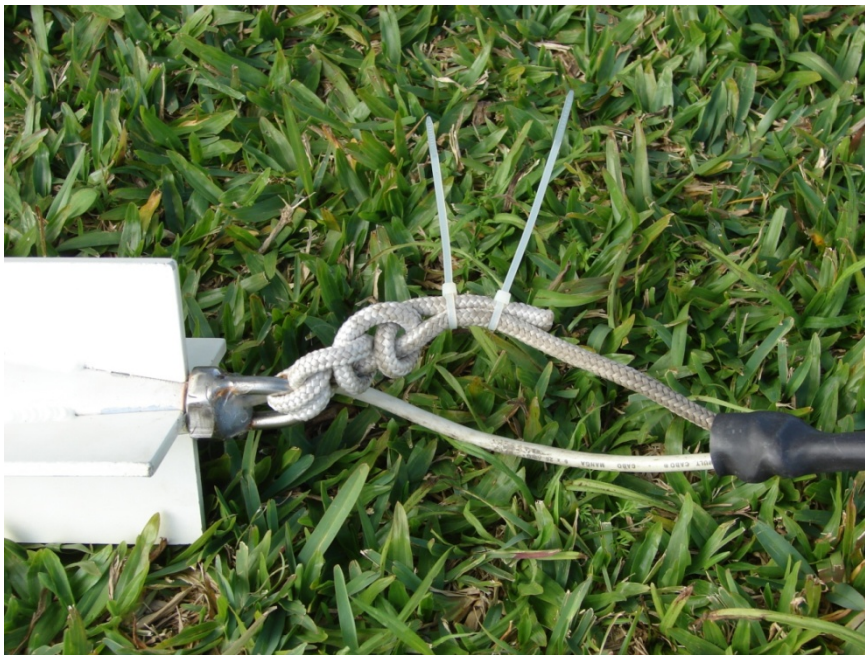


Figura 4.43 – Vista da alça de conexão do penetrômetro ao cabo de resgate e a passagem do cabo multiplexado

A figura 4.44 mostra um desenho esquemático do penetrômetro, com as posições de cada elemento instalado no corpo do aparelho.

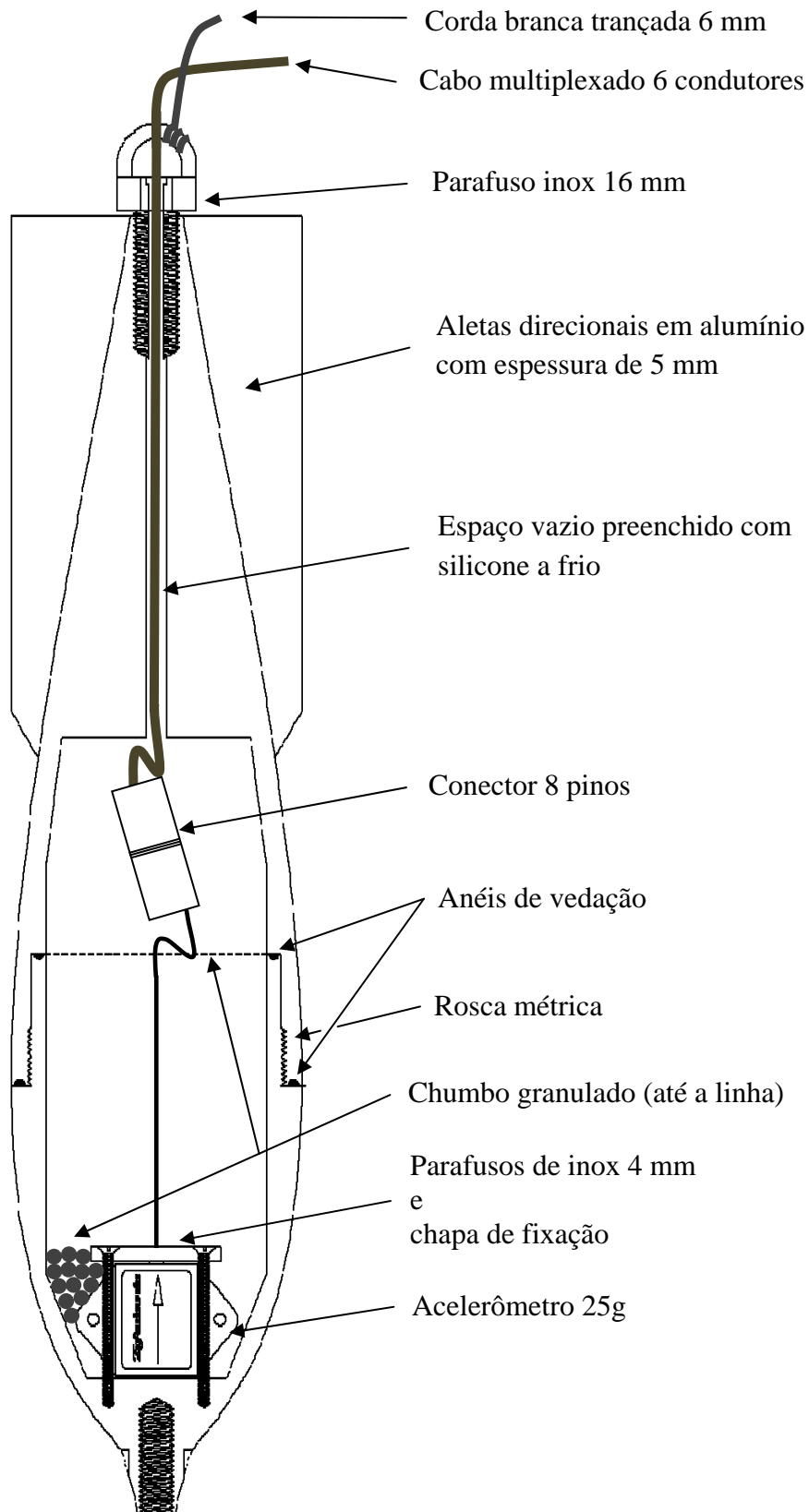


Figura 4.44 – Desenho completo do corpo do penetrômetro mostrando a disposição dos diferentes componentes internos

## 4.6. Montagem do Penetrômetro para Coleta de Dados

### 4.6.1. Preparação do equipamento

Antes de serem realizados os lançamentos para coleta de dados o corpo do penetrômetro precisa ser acoplado à haste de inox e a sapata. Estão disponíveis dois tipos diferentes de sapatas uma com 25 milímetros e outra com 50 milímetros de diâmetro.

A sapata é roscada na extremidade da haste que fica em contato direto com o solo (figura 4.45). A escolha do diâmetro depende do tipo de sedimento a ser ensaiado. Para solos arenosos que possuem uma resistência mais elevada, quando comparado com solos argilosos, utiliza-se a sapata de menor diâmetro a fim de que possa ocorrer uma maior penetração e assim um maior perfil de amostragem. Entretanto, quando o ensaio for realizado em locais onde a caracterização sedimentológica indica solos argilosos ou siltosos com baixa resistência deve-se utilizar a sapata de maior diâmetro para que haja uma maior resistência a penetração no solo quando comparado com a sapata de menor diâmetro na mesma situação.



Figura 4.45 – Sapata de 50 milímetros de diâmetro fixada na ponta da haste

A haste por sua vez é fixada ao corpo do penetrômetro conforme mostrado na figura 4.46.



Figura 4.46 – Fixação do conjunto haste-sapata ao corpo do penetrômetro

A figura 4.47 abaixo mostra o conjunto penetrômetro - haste - sapata montados.

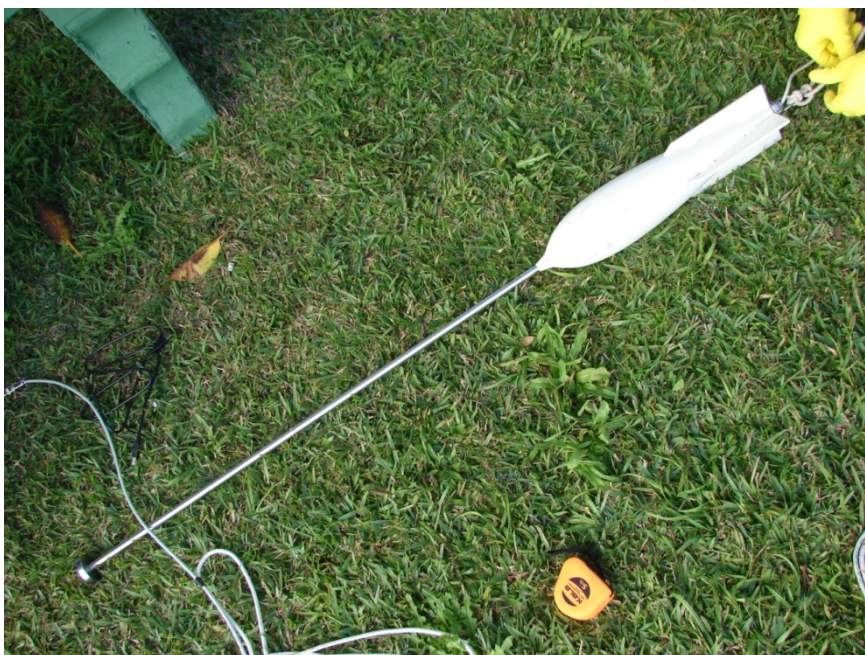


Figura 4.47 – Penetrômetro montado e pronto para utilização



#### 4.6.2. Configuração dos parâmetros de aquisição

Para coleta e armazenamento dos dados de campo são utilizados um computador portátil (*laptop*) e o *LabPro*® com fonte de energia em 4 pilhas AA recarregáveis.

No computador portátil, com o sistema operacional carregado, inicializa-se o programa *Logger Pro 3*, a seguir, conecta-se o *LabPro*®, também com o sistema ligado e carregado, ao computador através da porta USB (figura 4.48) para a configuração dos parâmetros operacionais. O processo deve ser realizado nesta ordem a fim de que o programa da *Vernier* identifique o tipo de módulo de aquisição de dados.



Figura 4.48 – Inicialização dos sistemas e conexão do *LabPro*® ao computador

Após os sistemas se auto identificarem deve ser feita a configuração do sensor a ser usado. Como o cabo da transferência do sinal do acelerômetro para o *LabPro*® além de sofrer interferências eletromagnéticas naturais do meio em virtude da necessidade de aumento do seu comprimento consequentemente houve alteração na sua impedância (conjunto acelerômetro + cabo + conector) e o circuito eletrônico de auto-identificação do *LabPro*® não identificava o sensor correto (identificando-o incorretamente como: amperímetro, voltímetro, etc). A alternativa foi informar ao sistema (*LabPro*® e *Logger Pro 3*) que no canal 01 está acoplado o acelerômetro 25g, sem no entanto conectá-lo.

Na barra de ferramentas do programa *Logger Pro 3* (figura 4.49) seleciona-se o ícone correspondente a um relógio, trata-se da função *Data Collection*. Ao selecionar esta função o programa apresenta uma janela de configuração, idêntica a que pode ser vista na figura 4.50.



Figura 4.49 – Barra de ferramentas do programa *Logger Pro 3*

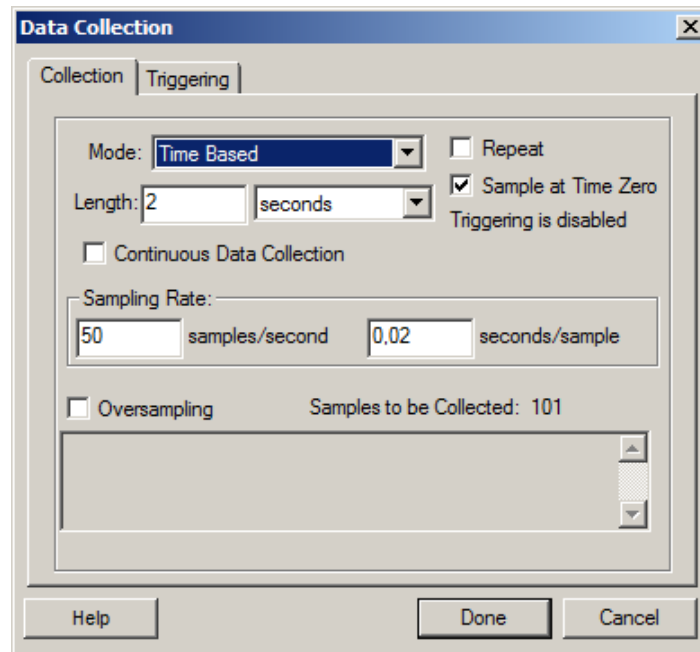


Figura 4.50 – Janela de configuração do *Logger Pro 3*

A aquisição dos dados de aceleração é um evento que dura aproximadamente 2 segundos entre o momento do lançamento até o impacto com o fundo, como é desejável uma caracterização do perfil com o maior número de pontos possíveis as configurações devem ser as seguintes:

- Tempo de aquisição: 120 segundos
- Taxa de amostragem: 250 eventos por segundo

Os demais parâmetros padrão apresentados pela interface não foram alterados.

Logo após estas configurações seleciona-se o ícone *Collect*, semelhante a um retângulo verde, na barra de ferramentas do *Logger Pro 3* para que se dê início a coleta de dados.

Com a função coleta de dados já iniciada pode-se ligar o conector (figura 4.51) provindo do cabo do acelerômetro ao *LabPro*® e com isto o circuito de auto-identificação não ficará procurando entre os sensores catalogados em seu sistema na tentativa de encontrar um sensor adequado a impedância por ele verificado.



Figura 4.51 – Configuração dos parâmetros para coleta de dados. Observar que o cabo não está conectado ao *LabPro*®

## 4.7. Coleta de dados no Rio Grande Yacht Club

### 4.7.1. Operação de lançamento

Para lançar o penetrômetro utilizou-se uma tábua de madeira para indicar aproximadamente o nível do atracadouro (figura 4.52) buscando o mesmo ponto de lançamento em todos os ensaios permitindo assim, uma posterior comparação com os valores medidos de todos os lançamentos.

Para que o sensor fizesse o registro apenas das forças referentes ao sedimento, e não levasse em consideração as forças originadas pela tração indevida dos cabos de transmissão

de dados e de resgate (em virtude de algum erro no manuseio do equipamento) os mesmos foram colocados dentro d'água e com folga durante os lançamentos.



Figura 4.52 – Posicionamento para o lançamento

Após o penetrômetro penetrar o sedimento de fundo utiliza-se o próprio cabo de resgate para medir o seu deslocamento máximo tendo como indicador da posição inicial do movimento, a tábua de lançamento (figura 4.53).

Após a retirada da água o penetrômetro é posicionado sobre o atracadouro. Esticado o cabo de resgate usa-se uma trena para medir a distância total percorrida pela sapata (figura 4.54). Essas medidas de deslocamento foram posteriormente comparadas com os valores das distâncias percorridas calculadas a partir das dos registros das acelerações.



Figura 4.53 – Medição manual do deslocamento vertical do penetrômetro



Figura 4.54 – Medição do deslocamento com a trena

#### 4.7.2. Cuidados de operação e manutenção

Durante os trabalhos de coleta de dados deve-se ter cuidado com as conexões dos instrumentos a fim de evitar o contato com água, para não ocorrer oxidação nos terminais ou pequenos curtos-circuitos, ocasionando perda de sinal e comprometendo a qualidade dos dados coletados ou mesmo danificar o acelerômetro, o *LabPro*® e/ou o computador portátil.

No momento do lançamento deve-se ter cuidado com os cabos para evitar avarias e rompimentos, principalmente com o cabo de dados, já que em caso de perda da capa de proteção corre-se o risco de entrada de água internamente no cabo e conseqüentemente na câmara interna do penetrômetro podendo vir a danificar o acelerômetro.

O penetrômetro não deve se chocar contra superfícies sólidas (pisos de alvenaria, chapas de aço, ou mesmo fundos rochosos, por exemplo) sob o risco da quebra do corpo ou alteração do formato hidrodinâmico e caso a haste esteja fixada dependendo do impacto há possibilidade de flexão da haste e também deformação das roscas.

Depois de encerrada a operação de coleta de dados o penetrômetro e os cabos devem ser lavados com água doce a fim de retirar os sedimentos incrustados e os sais provenientes da água do mar que provocariam a corrosão dos materiais usados na sua construção (figura 4.55). Após a lavagem as conexões com roscas devem ser lubrificadas com óleo desengripante para a conservação dos filetes.



Figura 4.55 – Penetrômetro lavado com água doce

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Resultado do Trabalho de Construção do Penetrômetro

O resultado do trabalho de construção do penetrômetro pode ser visualizado na figura 5.1 a seguir.

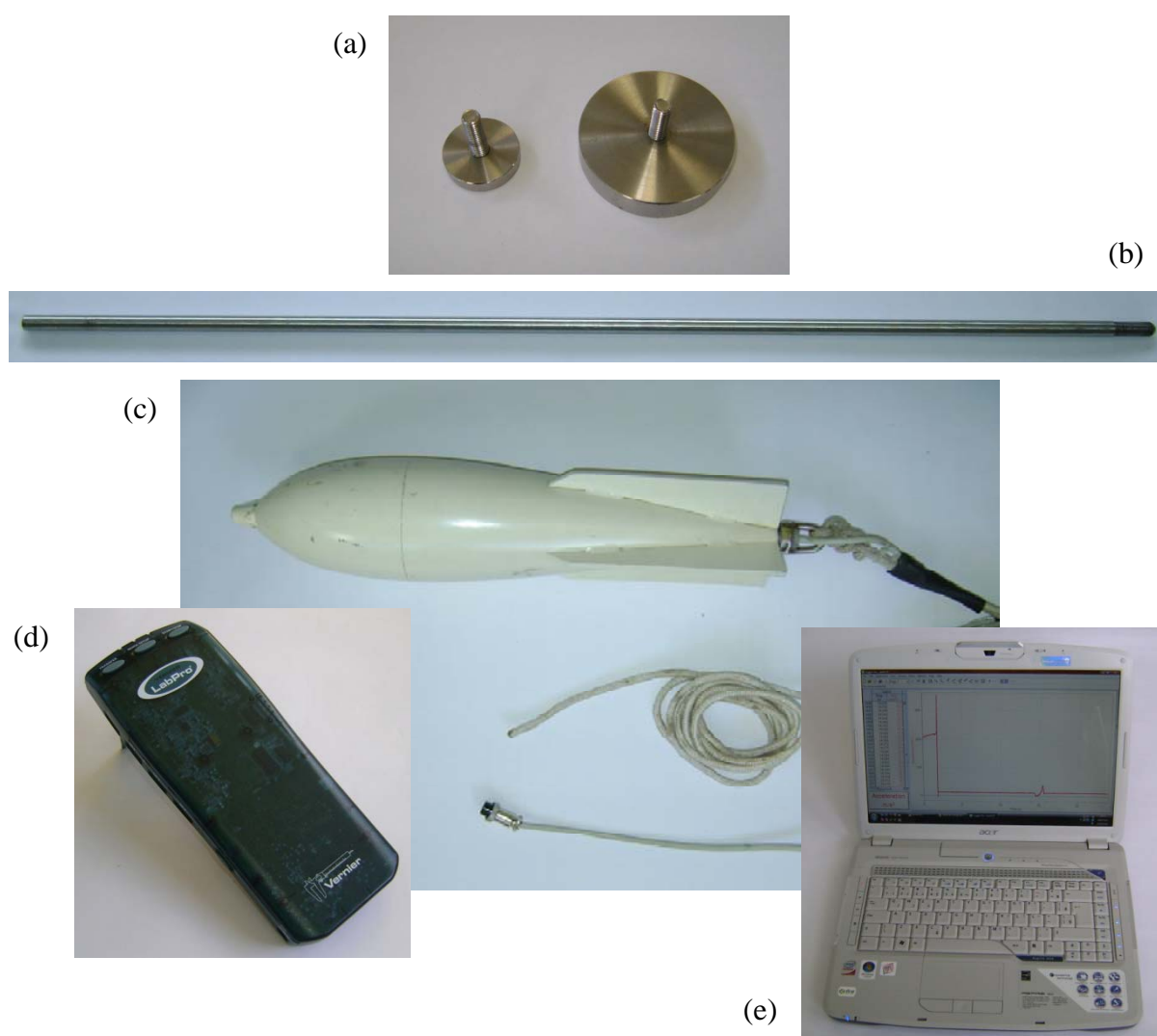


Figura 5.1 – Resultado do trabalho de construção do penetrômetro. (a) Sapatas de aço inox, (b) haste de aço inox, (c) corpo do penetrômetro com o cabo de resgate e de transmissão de dados, (d) interface de aquisição de dados – *LabPro*®, (e) computador portátil com sistema de programação e aquisição de dados – *Logger Pro 3*.

## 5.2. Resultados das Medições Feitas com o Penetrômetro

Foram realizadas três campanhas para a coleta de dados de campo utilizando o penetrômetro de queda livre. A primeira em 7 de maio, a segunda em 18 de junho e a última no dia 23 de junho de 2009. Nas duas primeiras campanhas os dados coletados não apresentaram um número significativo de pontos adquiridos na curva de desaceleração, esta deficiência colocou em dúvida a confiabilidade nos resultados esperados. No entanto, na última campanha foi possível aprimorar a coleta dos dados de tal forma que o número de pontos coletados alcançou o máximo permitido pelo programa de aquisição, 250 eventos por segundo para um tempo de aquisição de 120 segundos.

Os dados foram coletados em três pontos diferentes da marina do Rio Grande Yacht Club e em cada um destes pontos foram realizados 5 lançamentos do penetrômetro.

O programa *Logger Pro 3* da *Vernier Software & Technology* foi utilizado para registrar as variações de aceleração percebidas pelo acelerômetro. Durante o processo de aquisição o programa armazena os dados em uma tabela e fornece simultaneamente os resultados em um gráfico. Para cada ensaio há uma planilha de pontos bem como o gráfico dos dados registrados. O arquivo é armazenado em extensão \*.cmlb, modo de gerenciamento do programa. A interface possibilita de maneira simples a exportação das informações para o programa desejado.

Os registros das variações de aceleração foram tratados no Microsoft Office Excell® 2007, da Microsoft, e os gráficos gerados pelo Grapher versão 7, desenvolvido pela Golden Software, Inc.

Após descontado o valor da aceleração da gravidade local utilizando os dados contidos nos registros, calculada através da média dos valores registrados pelo acelerômetro com o equipamento nas posições de lançamento e em repouso, o sinal de aceleração passa por duas integrações sucessivas no tempo com o objetivo de encontrar os valores da velocidade e da distância percorrida.

A regra dos trapézios foi usada para a realização das integrações numéricas. Por tratar-se de intervalos de aquisição entre dois eventos relativamente pequenos o valor da integral é aceitável. A função integrante calcula a área debaixo do segmento gráfico (figura 5.1) através da equação 5.1.



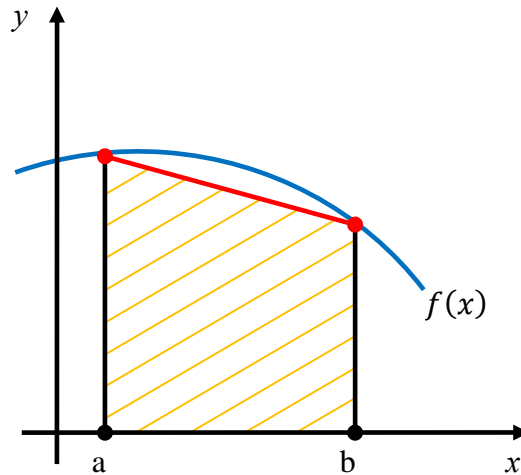
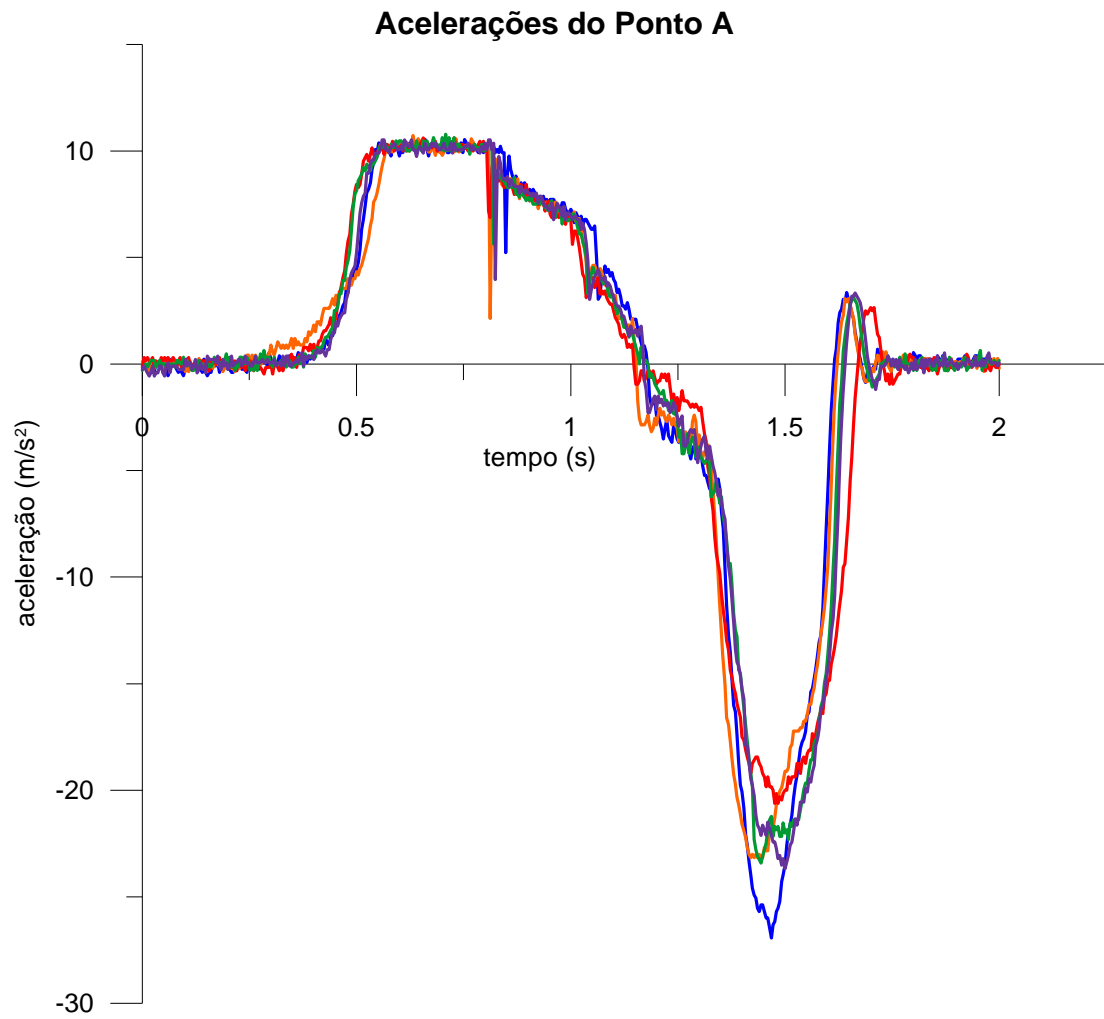


Figura 5.2 – Representação gráfica da integração por meio da regra dos trapézios

$$\int_a^b f(x) = \frac{f(a) + f(b)}{2} (b - a) \quad \text{Eq. 5.1}$$

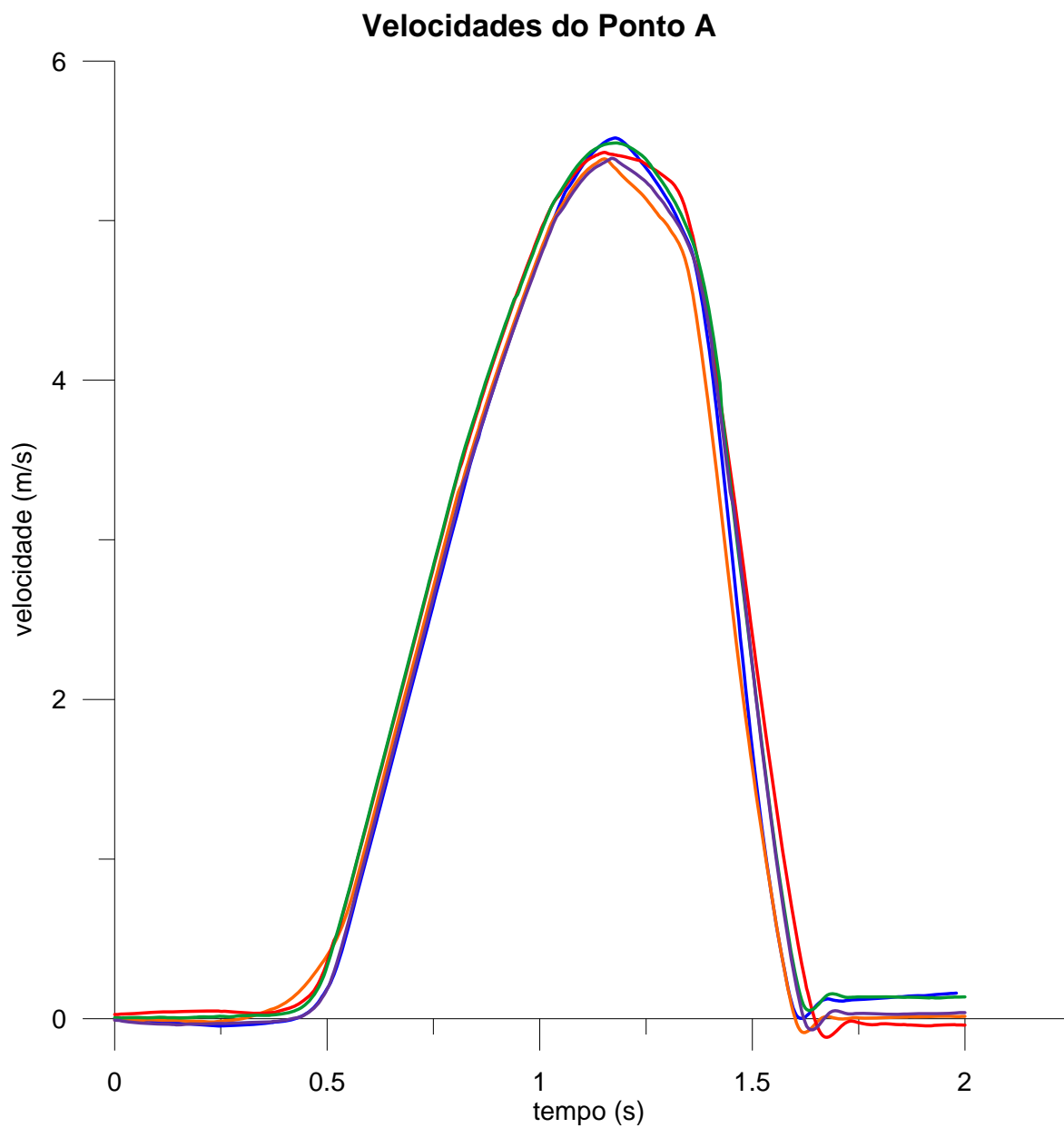
As figuras 5.3, 5.6 e 5.9 apresentam os valores de aceleração registrados pelo acelerômetro e em seguida os gráficos referentes à velocidade (figuras 5.4, 5.7 e 5.10) e à distância total percorrida (figuras 5.5, 5.8 e 5.11) pelo penetrômetro em cada um dos lançamentos, sendo estes dois últimos resultados calculados por meio das integrações numéricas.



**Legenda:**

— Lançamento 1    — Lançamento 2    — Lançamento 3    — Lançamento 4    — Lançamento 5

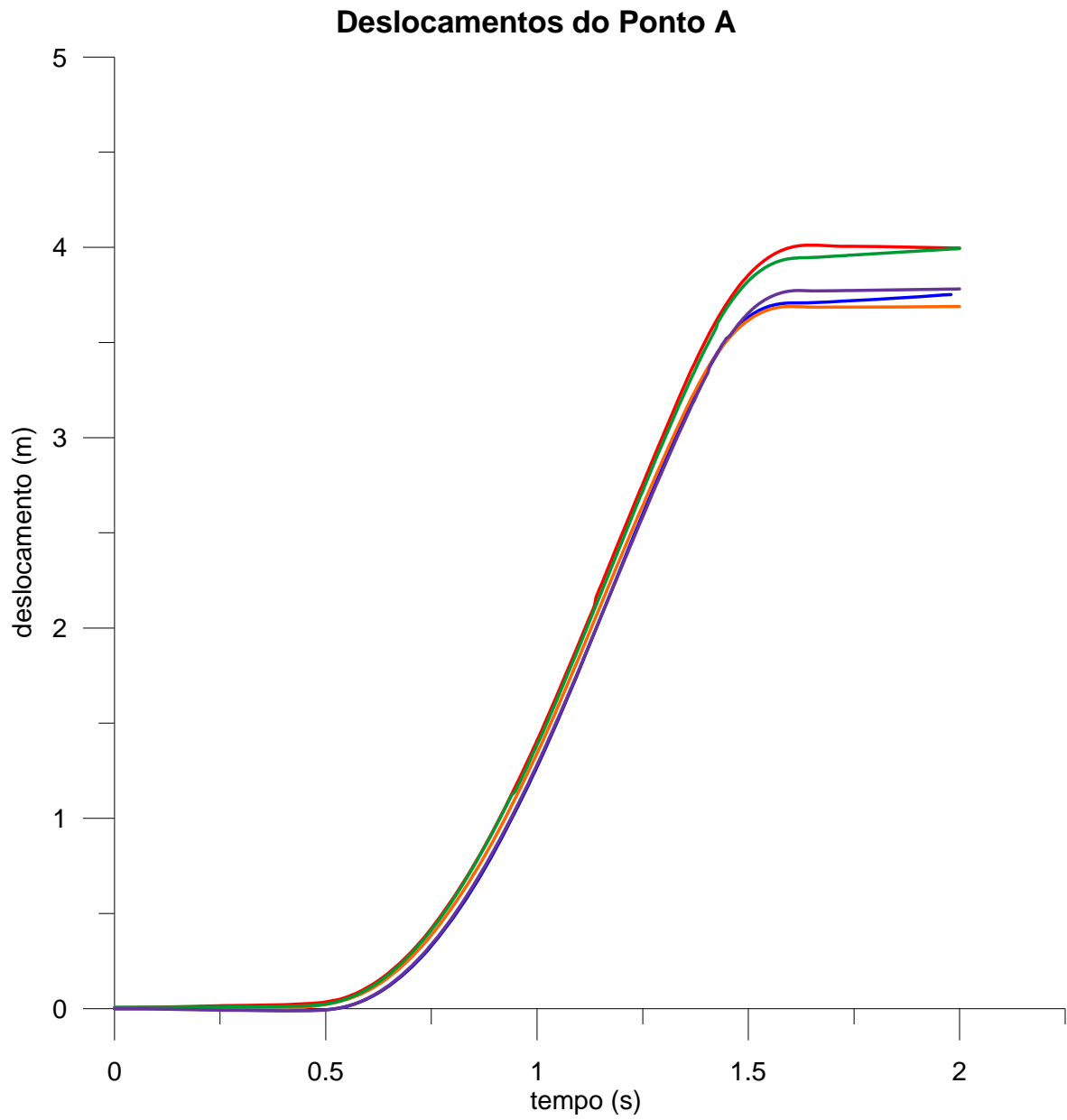
Figura 5.3 – Registros da variação da aceleração obtidos no ponto A



**Legenda:**

— Lançamento 1 — Lançamento 2 — Lançamento 3 — Lançamento 4 — Lançamento 5

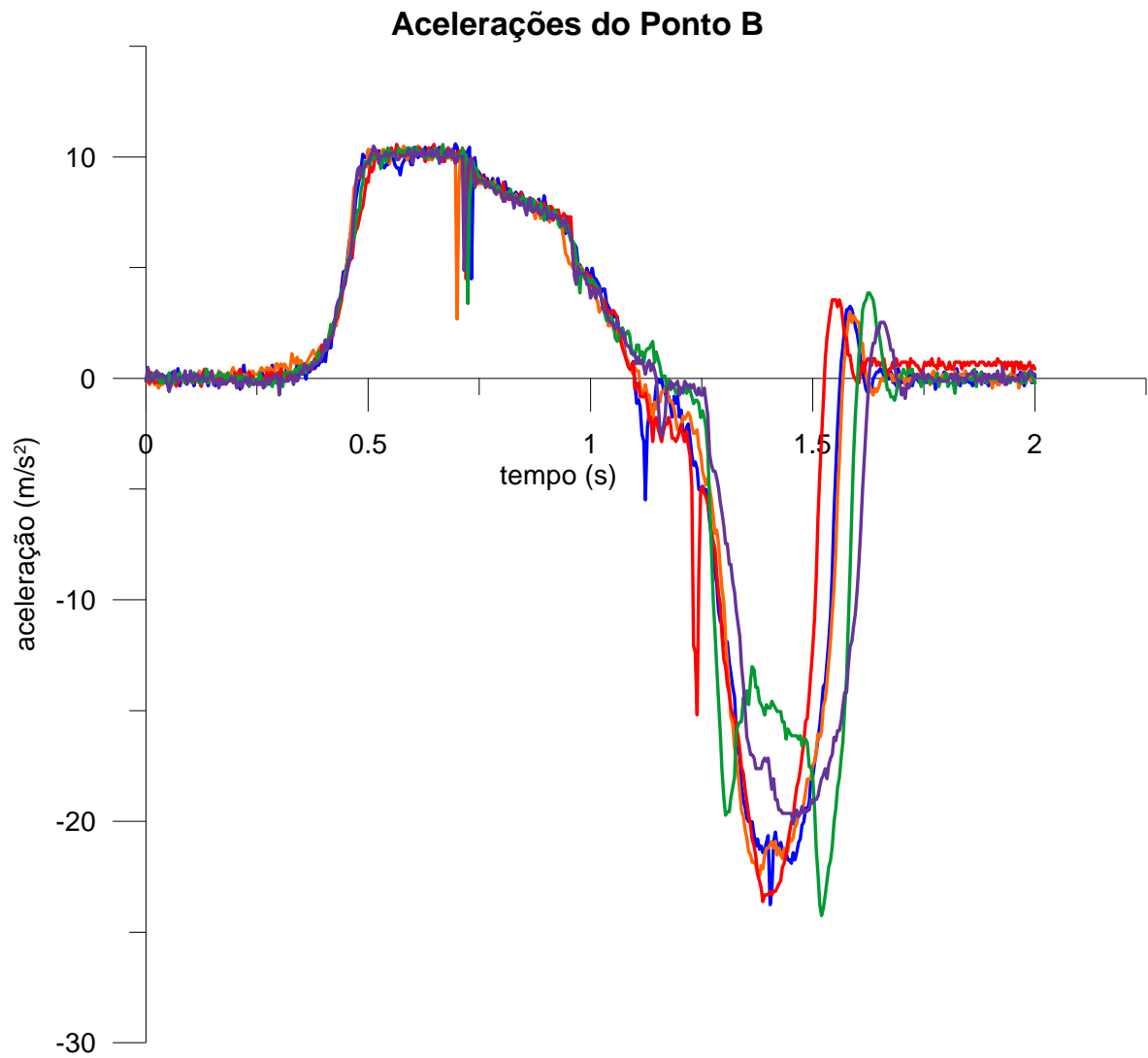
Figura 5.4 – Valores de velocidade obtidos no ponto A  
por meio da primeira integração numérica



**Legenda:**

— Lançamento 1 — Lançamento 2 — Lançamento 3 — Lançamento 4 — Lançamento 5

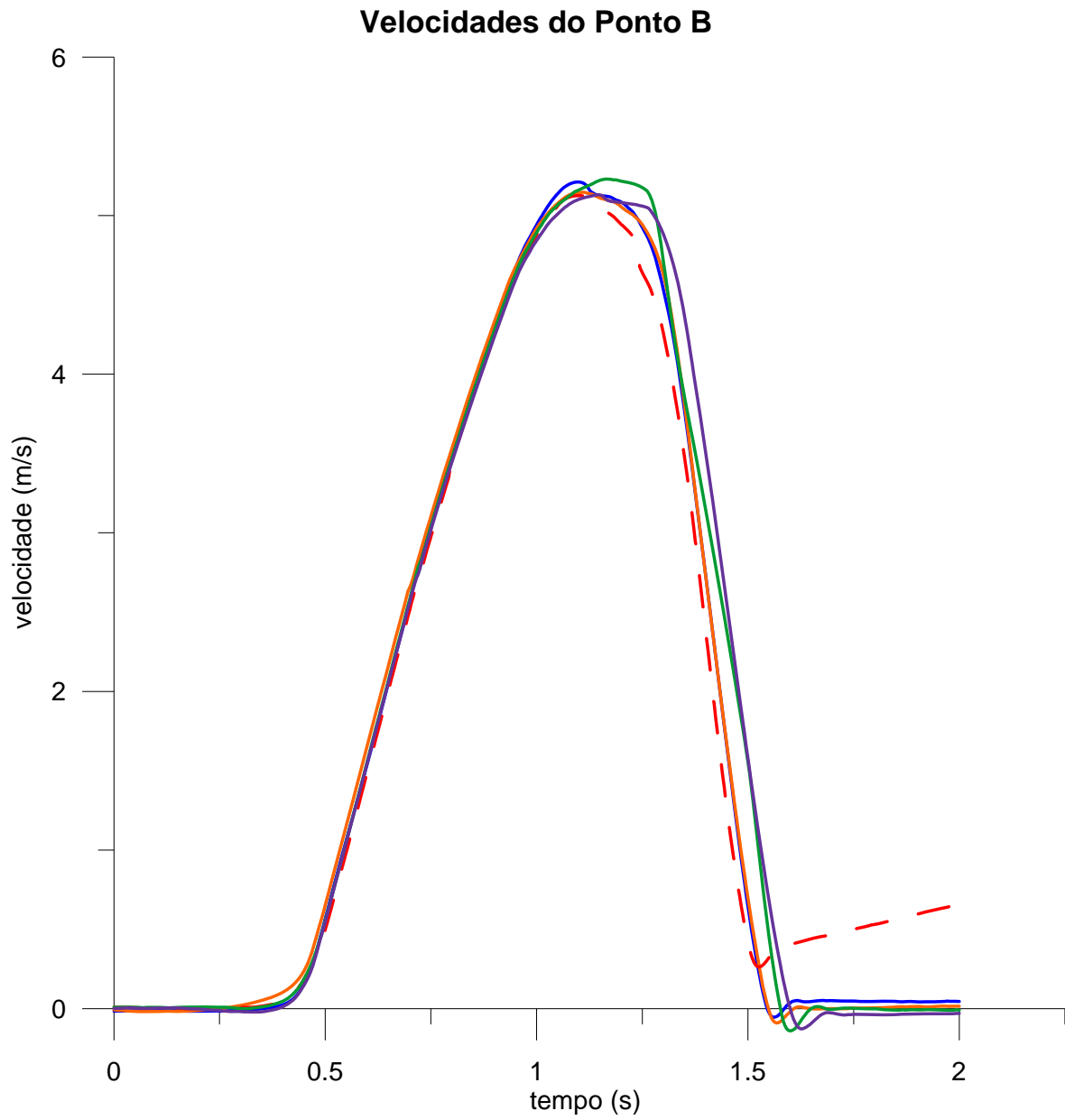
Figura 5.5 – Valores de distância total percorrida pelo penetrômetro obtido no ponto A por meio da segunda integração numérica



**Legenda:**

- Lançamento 1
- Lançamento 2
- Lançamento 3
- Lançamento 4
- Lançamento 5

Figura 5.6 – Registros da variação da aceleração obtidos no ponto B

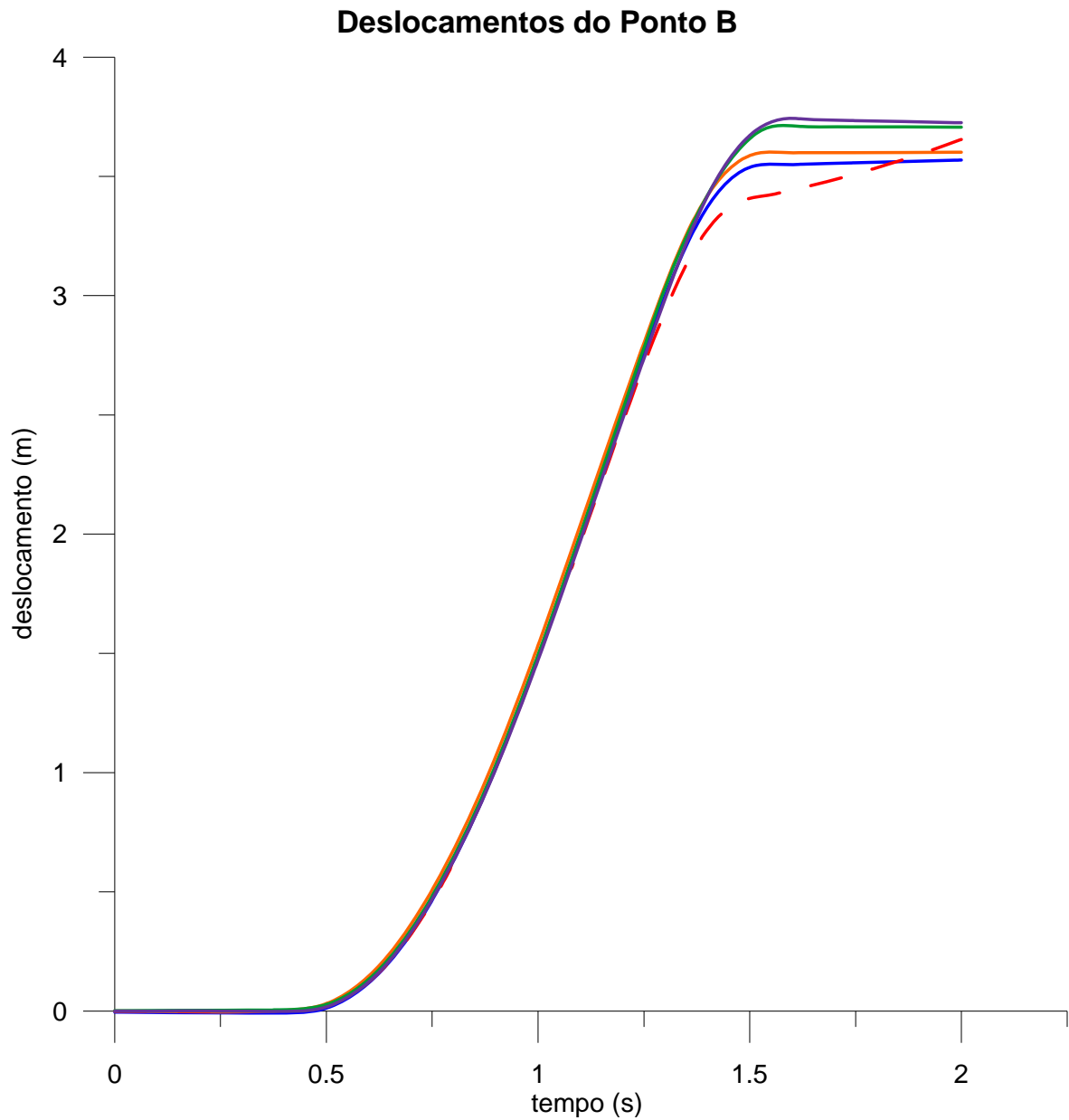


**Legenda:**

— Lançamento 1    - - Lançamento 2    — Lançamento 3    — Lançamento 4    — Lançamento 5

Figura 5.7 – Valores de velocidade obtidos no ponto B por meio da primeira integração numérica<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lançamento 2 – Batida do penetrômetro na borda do cais



**Legenda:**

— Lançamento 1    - - Lançamento 2    — Lançamento 3    — Lançamento 4    — Lançamento 5

Figura 5.8 – Valores de distância total percorrida pelo penetrômetro obtido no ponto B por meio da segunda integração numérica<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Lançamento 2 – Batida do penetrômetro na borda do cais

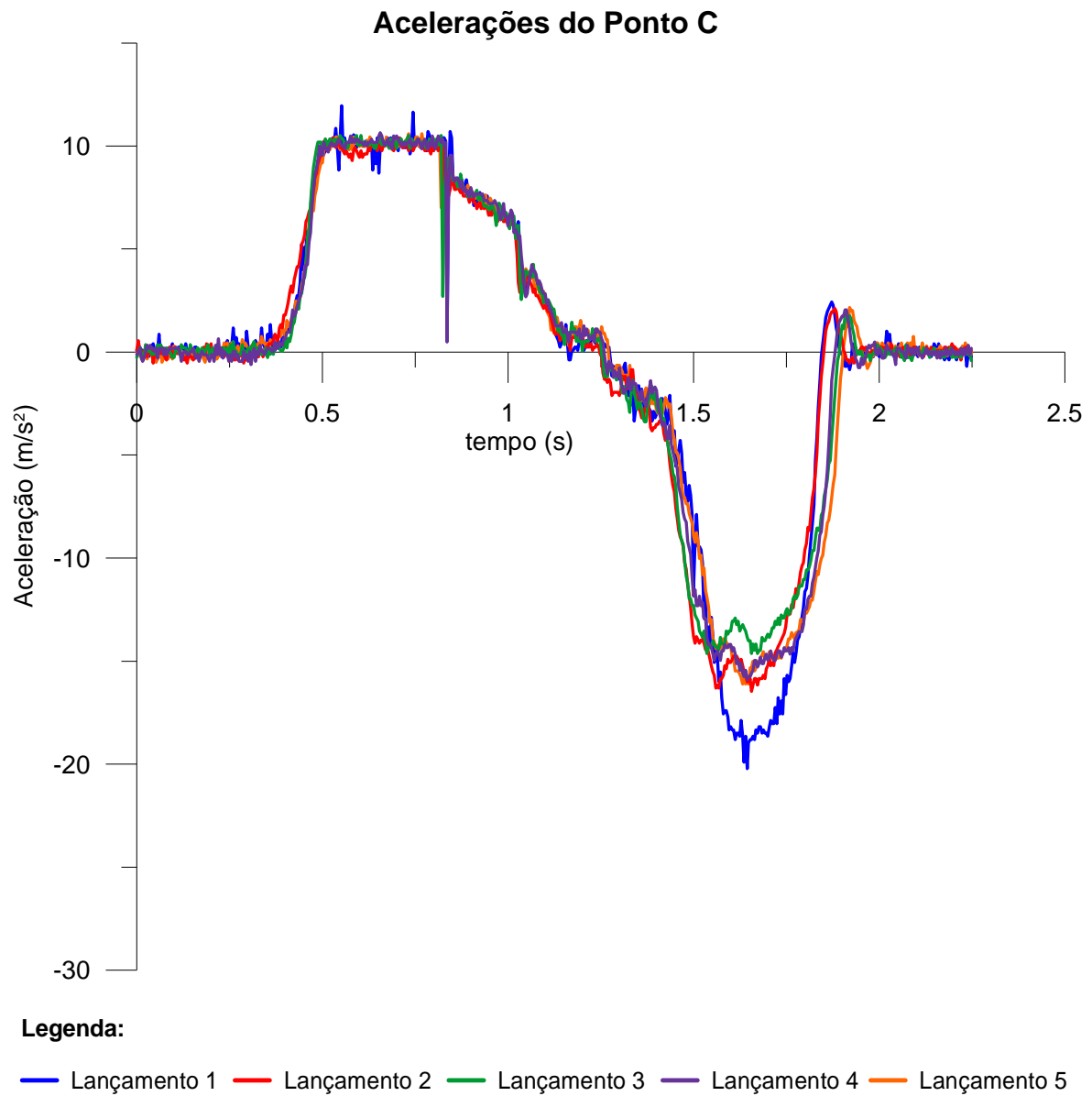
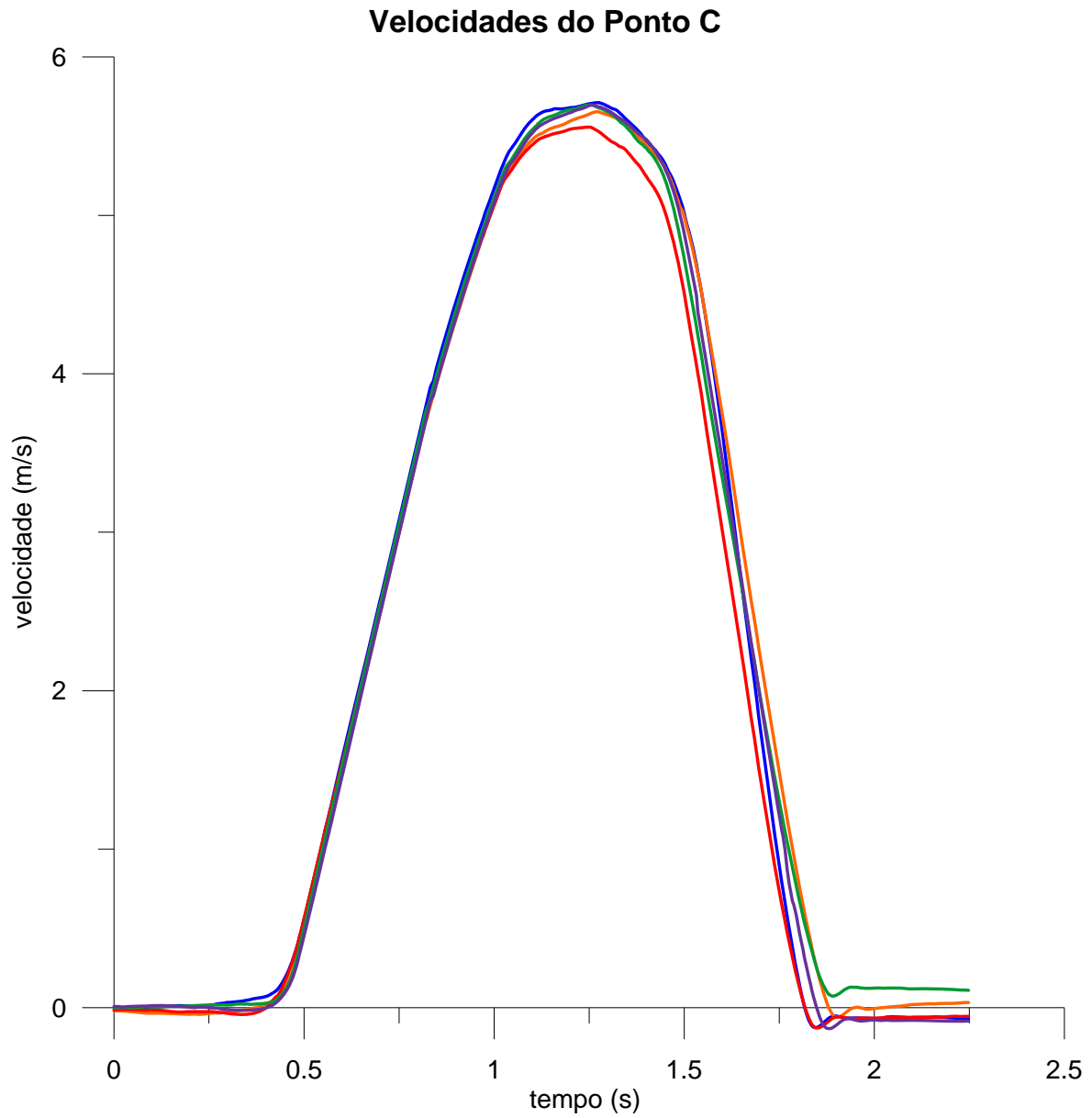


Figura 5.9 – Registros da variação da aceleração obtidos no ponto C

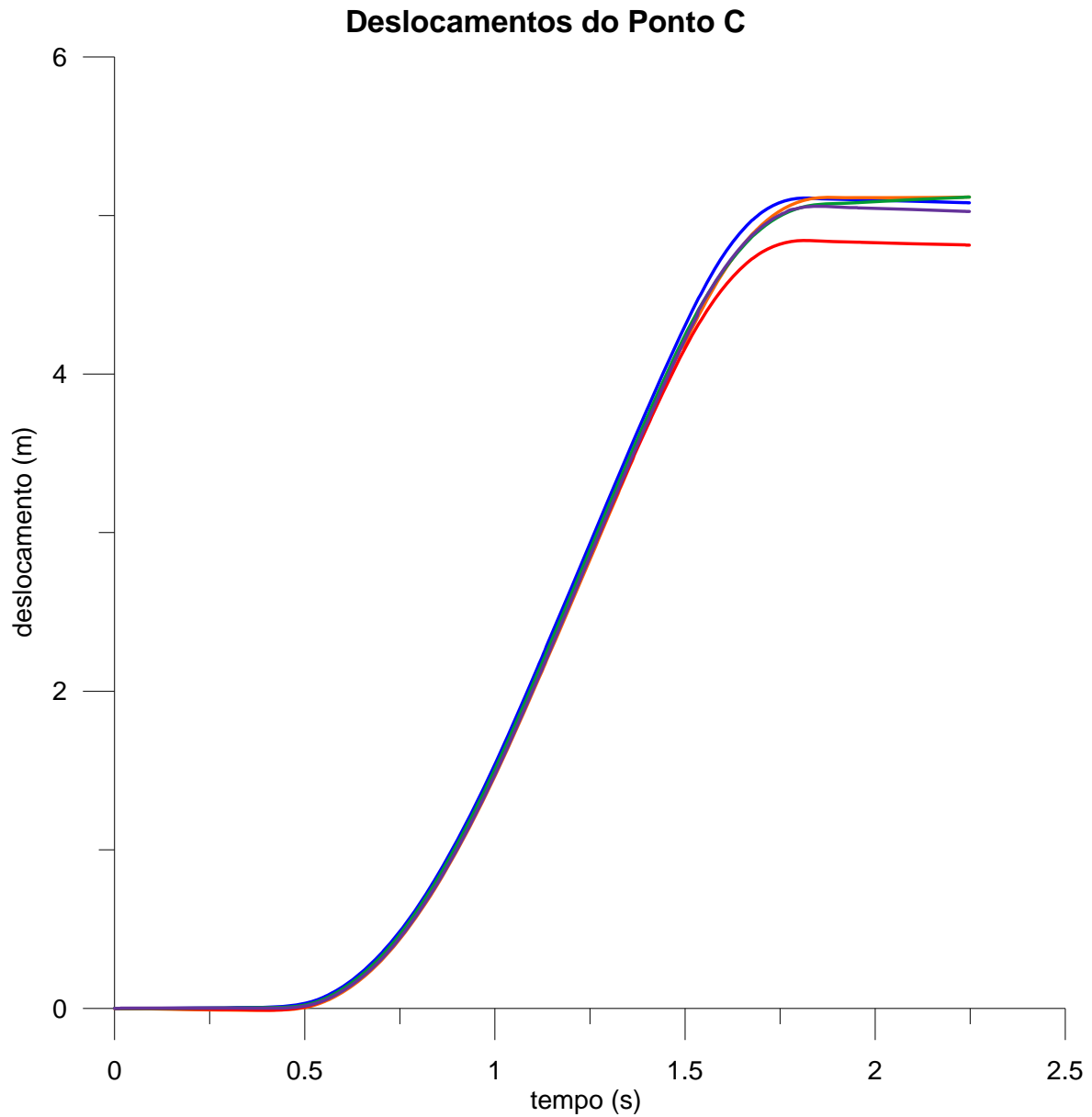




**Legenda:**

— Lançamento 1 — Lançamento 2 — Lançamento 3 — Lançamento 4 — Lançamento 5

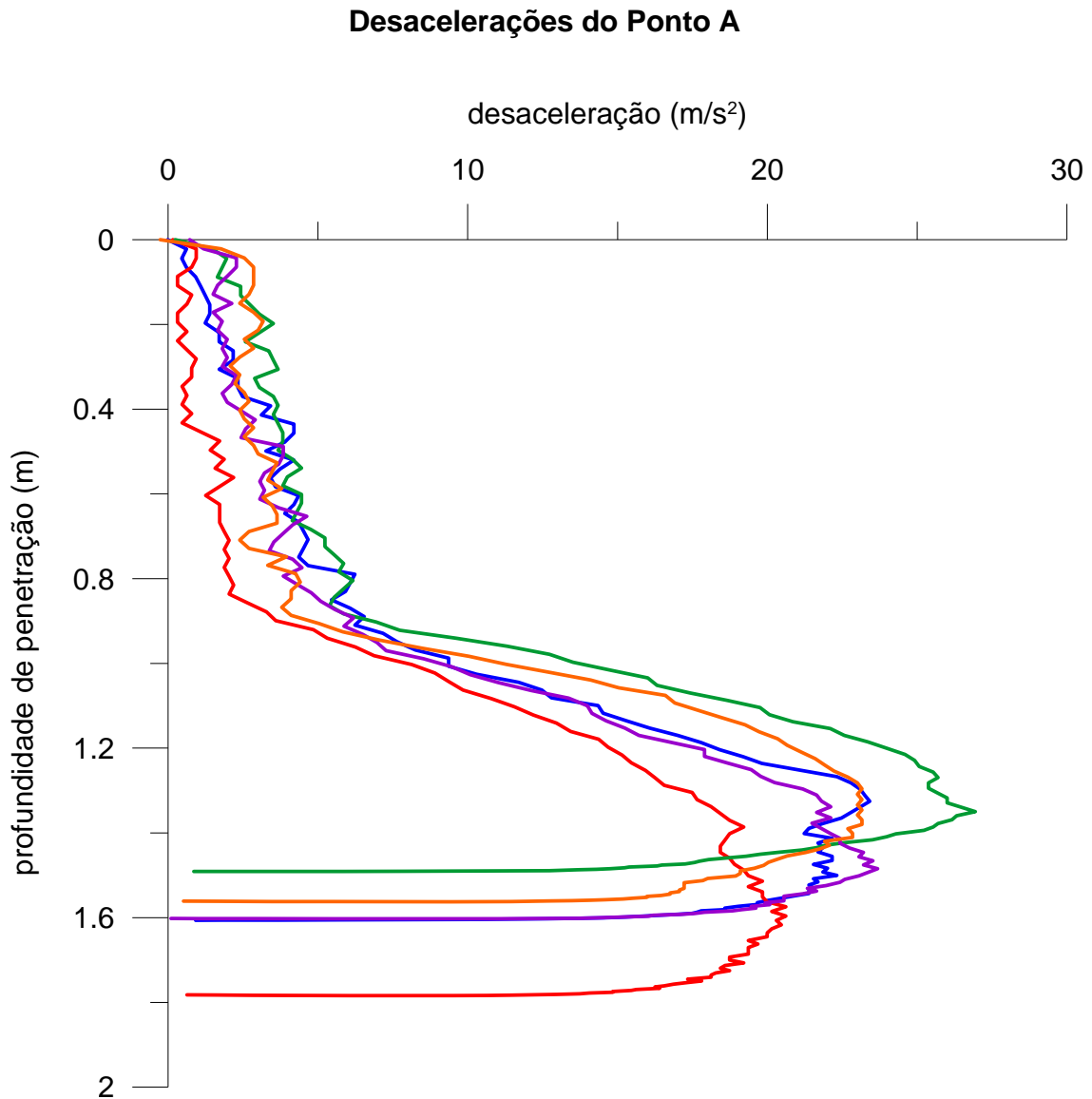
Figura 5.10 – Valores de velocidade obtidos no ponto C por meio da primeira integração numérica

**Legenda:**

— Lançamento 1 — Lançamento 2 — Lançamento 3 — Lançamento 4 — Lançamento 5

Figura 5.11 – Valores de distância total percorrida pelo penetrômetro obtido no ponto C por meio da segunda integração numérica

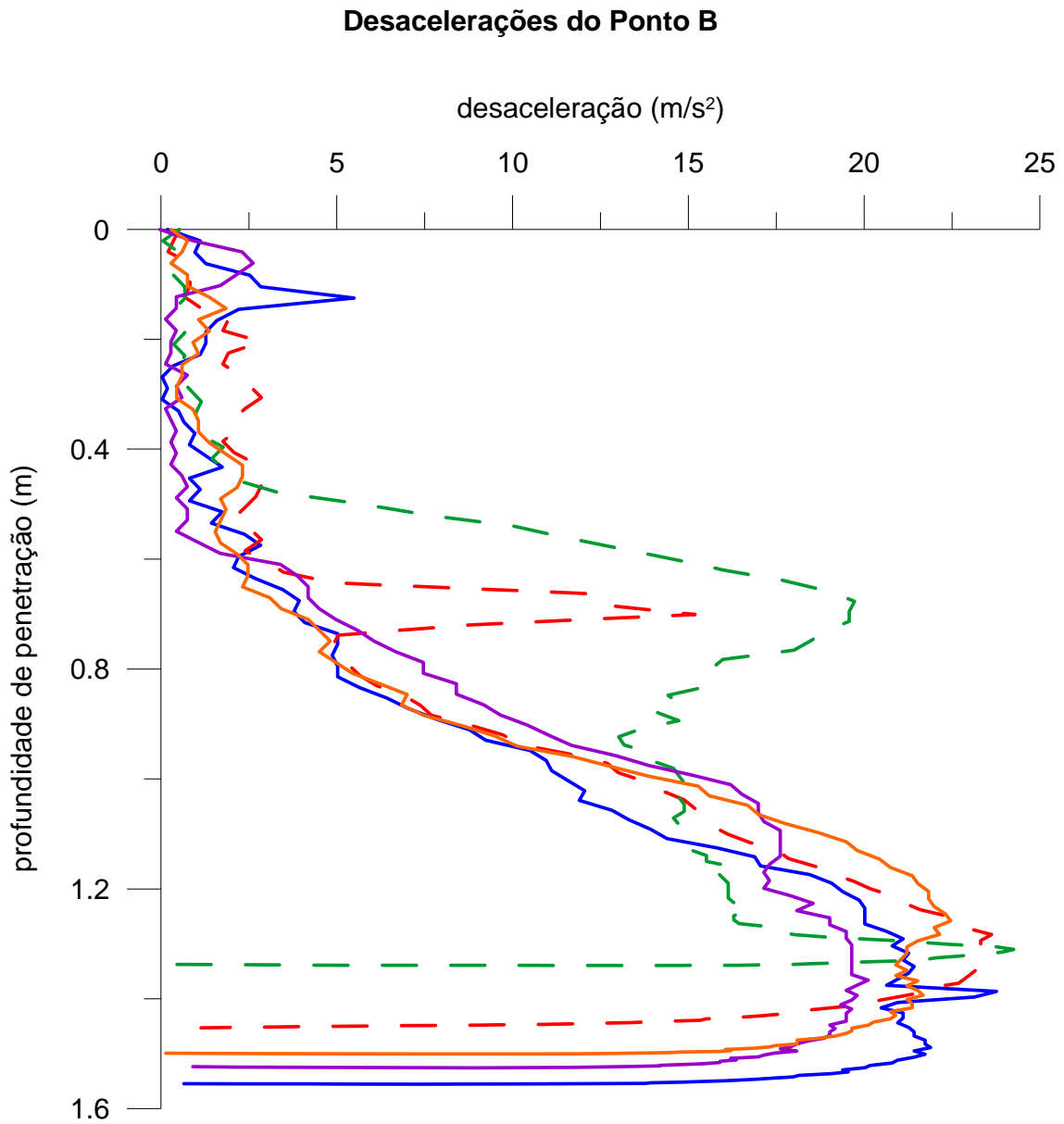
Valendo-se dos dados disponíveis é possível apresentar os resultados na forma da profundidade de penetração no solo feita pelo penetrômetro *versus* a desaceleração sofridas pelo equipamento, conforme pode ser visto nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14, a seguir.



**Legenda:**

— Lançamento 1 — Lançamento 2 — Lançamento 3 — Lançamento 4 — Lançamento 5

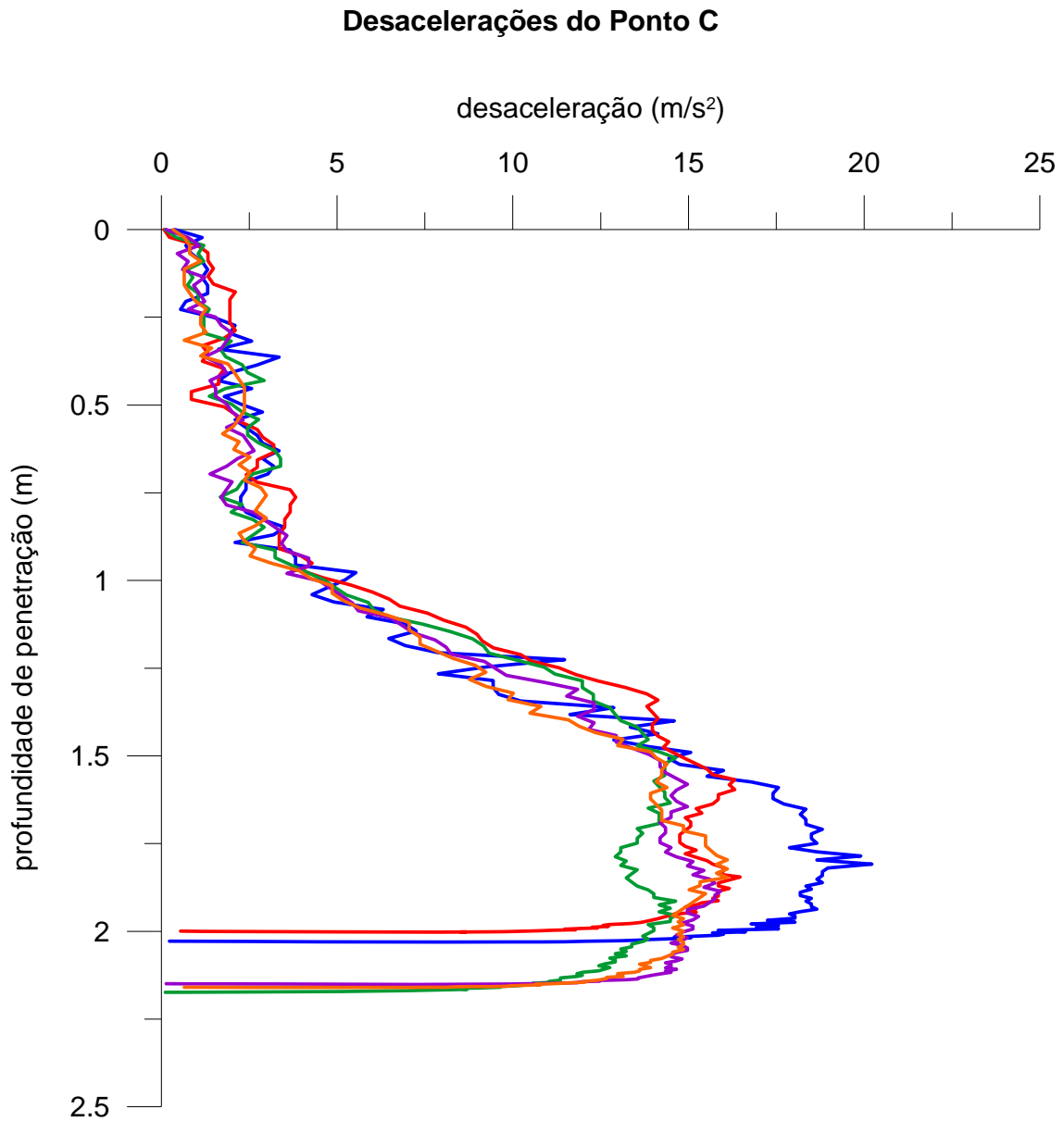
Figura 5.12 – Sinais de desaceleração pela profundidade de penetração no solo obtidos no ponto A



**Legenda:**

- Lançamento 1
- - - Lançamento 2
- - - Lançamento 3
- Lançamento 4
- Lançamento 5

Figura 5.13 – Sinais de desaceleração pela profundidade de penetração no solo obtidos no ponto B



**Legenda:**

- Lançamento 1
- Lançamento 2
- Lançamento 3
- Lançamento 4
- Lançamento 5

Figura 5.14 – Sinais de desaceleração pela profundidade de penetração no solo obtidos no ponto C

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. Interpretação dos Sinais de Aceleração do Penetrômetro com Base no Conceito de Pulso

Os sinais adquiridos na marina do Rio Grande Yacht Club são caracterizados por variações na magnitude das acelerações.

A ABNT NBR 7497 (1982) define que o vetor que especifica a derivada da aceleração em relação ao tempo chama-se pulso (*jerk*).

Os estudos das variações de aceleração, *jerk*, fazem parte da física dos movimentos caóticos. Sistemas governados por equações diferenciais com ordem igual e/ou superior a três descrevem a evolução de uma variável no tempo. O pulso envolve a terceira derivada sucessiva da função no tempo, no caso do sistema mecânico: deslocamento, velocidade, aceleração e pulso (equação 6.1) (Sprott e Linz, 2000; Chlouverakis e Sprott, 2006).

$$\vec{j} = \frac{d\vec{a}}{dt} = \frac{d^2\vec{v}}{dt^2} = \frac{d^3\vec{x}}{dt^3} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Para uma compreensão do movimento do aparelho durante a queda livre e da penetração no solo um dos sinais adquiridos foi interpretado ao conceito do pulso. O sinal analisado pertence ao ponto C do primeiro lançamento (figuras 5.9, 5.10 e 5.11). Este gráfico foi escolhido porque retrata o ponto onde o penetrômetro adquiriu nitidamente a velocidade terminal na água. O gráfico foi dividido em sete segmentos e ajustados manualmente a linhas de tendência para elucidar os movimentos do aparelho (figura 6.1).

#### *Segmento I – Lançamento*

O penetrômetro posicionado na altura do trapiche é solto. Aceleração positiva com máximo pulso, logo adquire aceleração constante no ar, velocidade crescente no tempo e pulso zero.

*Segmento II – Impacto da sapata na água*

A sapata toca na água. Aceleração positiva com pulso negativo. Velocidade crescente.

*Segmento III – Impacto do corpo do penetrômetro na água*

O corpo do penetrômetro entra na água. Aceleração continua positiva, porém o pulso negativo é maior que do segmento anterior. A velocidade continua a crescer, mas a uma taxa menor. A inclinação no gráfico representa o efeito do conjunto corpo e sapata.

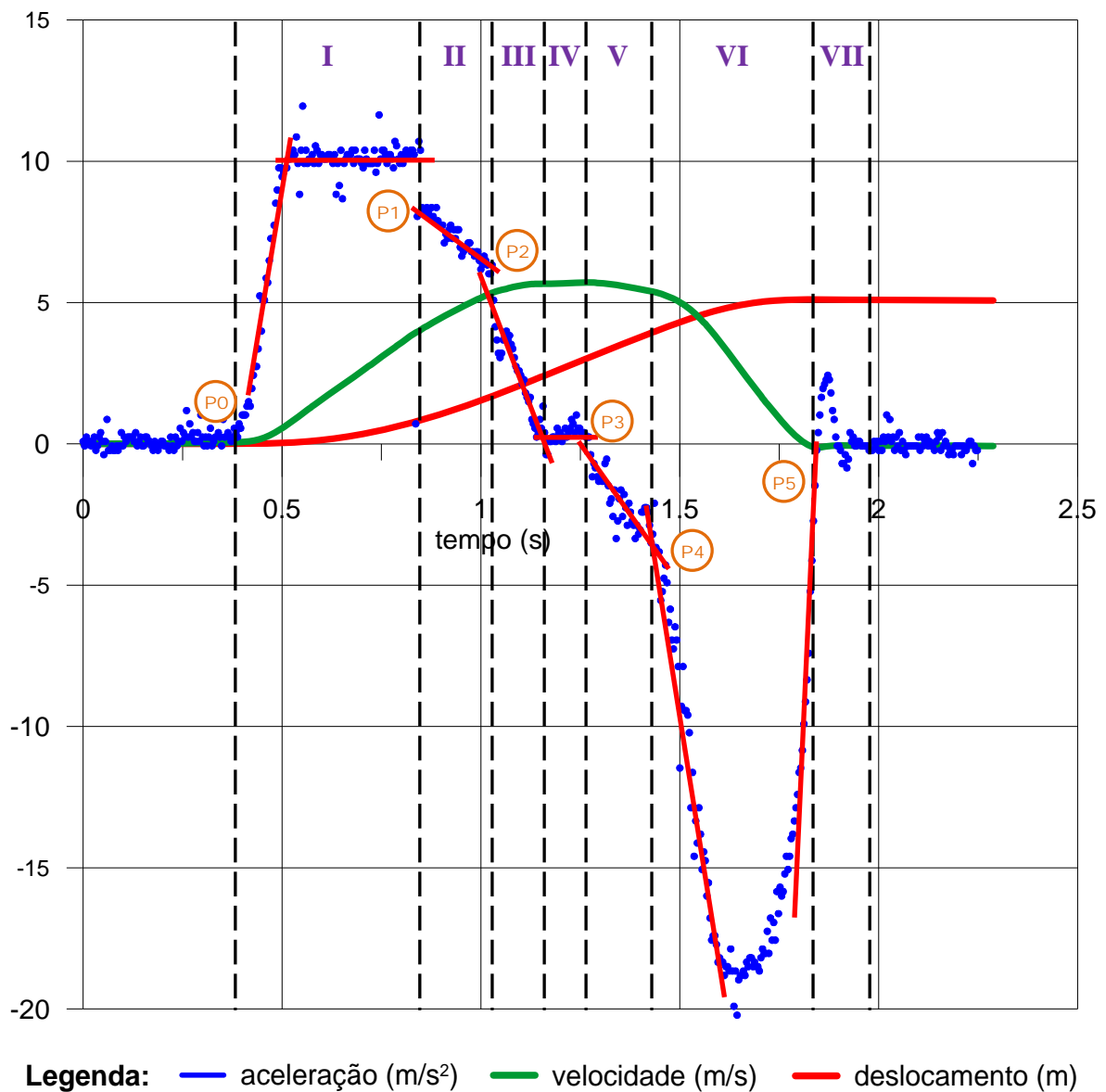


Figura 6.1 – Posicionamento do penetrômetro ao longo do tempo do lançamento 1 no ponto C

*Segmento IV – Velocidade terminal*

O penetrômetro está submerso. O peso do aparelho se iguala as forças hidrodinâmicas, a velocidade se torna constante. O deslocamento aumenta linearmente com o tempo. A aceleração e pulso são iguais a zero.

*Segmento V – Impacto da sapata no solo*

A sapata toca no leito marinho. Há mudança no sentido da aceleração. O penetrômetro está sendo desacelerado. O pulso é negativo, mas com taxa ligeiramente maior de quando houve o impacto na água. A velocidade começa a diminuir.

*Segmento VI – Impacto do corpo do penetrômetro no solo*

O corpo do penetrômetro entra no solo. O máximo pulso negativo. Alcança a máxima aceleração negativa. Logo, a aceleração aumenta com o pulso positivo. A velocidade diminui abruptamente até o aparelho alcançar o repouso, atingindo seu deslocamento máximo.

*Segmento VII – Movimento elástico do solo*

Oscilação após o impacto. É uma consequência das propriedades elásticas dos sedimentos e pode ser usado para quantificar o módulo elástico de cisalhamento (Dayal *et al.*, 1973, Spooner *et al.*, 2004).

## **6.2. Comparação dos Sinais Adquiridos pelo Acelerômetro com as Distâncias Medidas em Campo**

Com base na interpretação da figura 6.1 é possível identificar vários pontos onde há mudança no valor do pulso. Como todos os sinais adquiridos na marina têm aspecto similar, é possível utilizar estes pontos de referência obtidos nas curvas de aceleração pelo tempo para comparar os deslocamentos correspondentes com as medições feitas em campo no dia dos ensaios.

O *ponto P1* identificado na figura 6.1 retrata o ponto de impacto da sapata com a água, a distância percorrida entre o *ponto P1* e o *ponto P0* (lançamento do aparelho) corresponde a distância entre o trapiche e o nível da água no dia do ensaio. Neste dia mediu-se o nível da



água a partir do nível do atracadouro, sendo que nos pontos de ensaio A e B há mais de um valor de nível medido, pois o atracadouro era desnivelado.

A tabela 6.1 apresenta a comparação dos valores calculados numericamente com os medidos no dia do ensaio.

Tabela 6.1 – Valores (em metro) referentes ao nível da água em relação ao atracadouro

Nível da água em relação ao atracadouro			
Local	Número do lançamento	Deslocamento correspondente ao	
		extraído do sinal	medição <i>in-situ</i>
Ponto A	1	0,632	0,535
	2	0,616	
	3	0,637	
	4	0,560	
	5	0,573	0,550
	Média	0,604	0,543
	Variação	0,061	
	erro	11,26%	
Ponto B	1	0,412	0,358
	2	0,343	
	3	0,406	
	4	0,371	
	5	0,364	0,370
	Média	0,379	0,364
	Variação	0,015	
	erro	4,18%	
Ponto C	1	0,787	
	2	0,726	
	3	0,719	0,704
	4	0,738	
	5	0,686	
	Média	0,731	0,704
	Variação	0,027	
	erro	3,86%	

O ponto P2 refere-se ao momento em que o corpo do penetrômetro entra na água. A distância percorrida entre os pontos P2 e P1 correspondente ao tamanho da haste do dispositivo de 0,86 metros. A tabela 6.2 apresenta os valores obtidos.

Tabela 6.2 – Valores (em metros) referentes ao deslocamento do penetrômetro em relação ao comprimento da haste em consideração ao nível da água.

Deslocamento da sapata na água em relação ao corpo do penetrômetro no ar					
Local	Número do lançamento	Extraído do sinal			comprimento da haste
		Impacto da sapata na água (P1)	Impacto do corpo na água (P2)	diferença	
Ponto A	1	0,632	1,570	0,938	0,860
	2	0,616	1,549	0,933	
	3	0,637	1,567	0,930	
	4	0,560	1,477	0,917	
	5	0,573	1,459	0,886	
	Média			0,921	0,860
	Variação				0,061
	Erro				7,07%
Ponto B	1	0,412	1,329	0,917	0,860
	2	0,343	1,269	0,926	
	3	0,406	1,321	0,915	
	4	0,371	1,282	0,911	
	5	0,364	1,266	0,902	
	Média			0,914	0,860
	Variação				0,054
	Erro				6,30%
Ponto C	1	0,787	1,707	0,920	0,860
	2	0,726	1,618	0,892	
	3	0,719	1,654	0,935	
	4	0,738	1,661	0,923	
	5	0,686	1,609	0,923	
	Média			0,919	0,860
	Variação				0,059
	Erro				6,81%

O ponto P3 mostra o momento do impacto da sapata com o solo. À distância percorrida entre os pontos P3 e P0 correspondente à profundidade local do leito marinho medida a partir do nível do atracadouro. A tabela 6.3 apresenta os valores obtidos.

Tabela 6.3 – Valores (em metros) correspondentes à profundidade do leito marinho em relação ao atracadouro

Profundidade do leito marinho			
Local	Número do lançamento	Deslocamento correspondente ao	
		extraído do sinal	medição <i>in-situ</i>
Ponto A	1	2,217	2,150
	2	2,228	
	3	2,340	
	4	2,170	
	5	2,127	
	média	2,216	2,150
	variação	0,066	
	erro	3,09%	
Ponto B	1	1,992	1,784
	2	1,902	
	3	2,291	
	4	2,115	
	5	2,102	
	média	2,080	1,784
	variação	0,296	
	erro	16,61%	
Ponto C	1	3,057	3,056
	2	2,863	2,858
	3	2,902	2,768
	4	2,907	2,815
	5	2,955	2,820
	média	2,937	2,863
	variação	0,073	
	erro	2,56%	

O ponto *P4* corresponde ao momento em que o corpo do penetrômetro entra no solo. À distância percorrida entre os pontos *P4* e *P3* corresponde ao tamanho da haste do dispositivo, 0,86 metros, no solo (tabela 6.4).

Tabela 6.4 – Valores (em metros) correspondentes ao deslocamento da sapata no solo em relação ao corpo do penetrômetro na água

Deslocamento da sapata no solo em relação ao corpo do penetrômetro na água					
Local	Número do lançamento	Extraído do sinal			comprimento da haste
		Impacto da sapata no solo (P3)	Impacto do corpo no solo (P4)	diferença	
Ponto A	1	2,217	3,119	0,902	0,860
	2	2,228	3,106	0,878	
	3	2,340	3,249	0,909	
	4	2,170	3,043	0,873	
	5	2,127	3,033	0,906	
	média			0,894	0,860
	variação				0,034
	erro				3,91%
Ponto B	1	1,992	2,849	0,857	0,860
	2	1,902	2,720	0,818	
	3	2,291	2,833	0,542	
	4	2,115	2,827	0,712	
	5	2,102	2,792	0,690	
	média			0,724	0,860
	variação				0,136
	erro				15,84%
Ponto C	1	3,057	3,928	0,871	0,860
	2	2,863	3,750	0,887	
	3	2,902	3,793	0,891	
	4	2,907	3,780	0,873	
	5	2,955	3,842	0,887	
	média			0,882	0,860
	variação				0,022
	erro				2,53%

A distância percorrida entre os pontos *P5* e *P0* corresponde ao deslocamento total do penetrômetro, a máxima profundidade adquirida pelo ensaio, a partir do nível do trapiche. A tabela 6.5 mostra os valores calculados e medidos nos pontos de aquisição de dados.

Tabela 6.5 – Valores (em metros) referentes à distância máxima percorrida pelo penetrômetro

Distância total percorrida			
Local	Número do lançamento	Deslocamento correspondente ao	
		extraído do sinal	medição <i>in-situ</i>
Ponto A	1	3,660	3,572
	2	4,000	3,902
	3	3,990	3,765
	4	3,773	3,721
	5	3,689	3,585
	média	3,822	3,709
	variação	0,113	
	erro	3,06%	
Ponto B	1	3,552	3,375
	2	3,016	3,240
	3	3,708	3,551
	4	3,734	3,655
	5	3,599	3,492
	média	3,522	3,463
	variação	0,059	
	erro	1,71%	
Ponto C	1	5,110	4,878
	2	4,840	4,773
	3	5,055	4,828
	4	5,055	4,898
	5	5,113	5,017
	média	5,035	4,879
	variação	0,156	
	erro	3,19%	

De maneira geral, os dados apresentados são condizentes, comparando-se os resultados de deslocamentos extraídos dos sinais de aceleração com os medidos manualmente no local das amostras. Para cada local do ensaio os valores do conjunto de lançamentos estão em torno de sua média. Pode-se observar que quanto maior a profundidade do ensaio, menor o erro apresentado. O ponto B foi o local onde ocorreram os menores deslocamentos do penetrômetro e conseqüentemente os maiores erros percentuais quando comparados aos pontos A e C. Além disso os ensaios naquele ponto apresentaram dois problemas. Em um dos lançamentos houve uma batida do penetrômetro na lateral do trapiche; em outro lançamento,

houve um comportamento anômalo no sinal da desaceleração destoando dos demais sinais coletados.

### 6.3. Estimativa do Perfil de Resistência ao Cisalhamento do Solo

O programa FFP – *Free Fall Penetration* é um aplicativo compilado em Linguagem de programação *FORTRAN* destinado à análise de cravação de projeteis em queda livre (Alves, 2008). A figura 6.2 mostra a sua tela inicial.

O programa funciona através de duas entradas de dados, ambos em formato de texto. O primeiro é o arquivo de entrada de dados, onde são indicados, por exemplo, os dados do penetrômetro, parâmetros dos fluidos e tipo de análise. As informações devem estar situadas em uma mesma linha e ser separados por espaços. A segunda trata dos valores que serão analisados pelo programa, no caso valores de velocidade e deslocamento. Os arquivos, o programa, os dados de entrada e os dados para análise, devem estar no mesmo diretório do sistema operacional para que o programa FFP possa funcionar.



```
D:\Mestrado\Dissertação 2008-09\Penetrometro\Artigos_materiais_Prof Antonio Marcos\FFP v4\FFP...
*****
&&          FFFFFFFF  FFFFFFFF  PPPPP          &&
&&          FF        FF        PP  PP          &&
&&          FFFF      FFFF      PPPPP          &&
&&          FF        FF        PP              &&
&&          FF        FF        PP              &&
&&          *****
"FREE FALL PENETRATION"
Programa para analise da cravacao no solo de projeteis em queda livre

Autor: Antonio M. L. Alves <FURG>

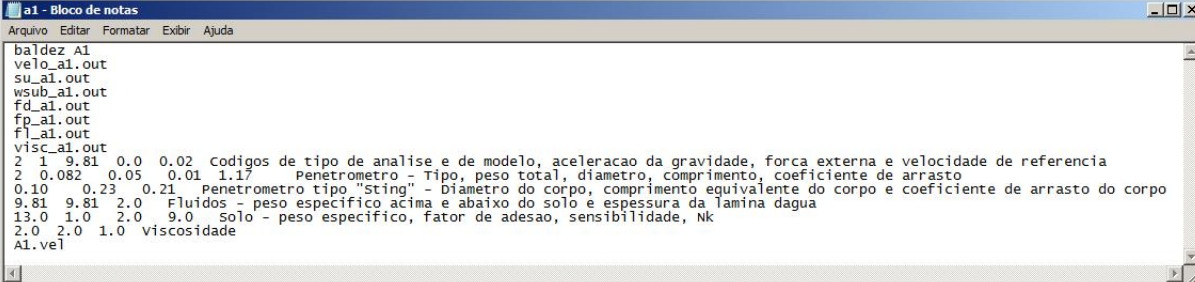
Entre com o nome do Arquivo de Entrada de Dados:
```

Figura 6.2 – Interface de utilização do programa

O arquivo de entrada fornece os dados que serão utilizados pelo programa para realizar a análise de cravação. A figura 6.3 apresenta as linhas de configuração do arquivo.

Cada linha do arquivo representa uma informação de leitura para programa na análise das características do solo. Na primeira linha do arquivo insere-se o título do arquivo. Nas linhas a seguir se configura o bloco de saída gráfica, formados por arquivos em formato de texto gerados pelo programa que representam as informações do que aconteceu durante a penetração do dispositivo, são elas:

- Velocidade x profundidade
- Su x profundidade
- Peso submerso x profundidade
- Força de arrasto x profundidade
- Reação de ponta x profundidade
- Reação lateral x profundidade
- Fator de viscosidade x profundidade



```

a1 - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
baidez A1
velo_al.out
su_al.out
wsul_al.out
fd_al.out
fp_al.out
fl_al.out
visc_al.out
2 1 9.81 0.0 0.02 codigos de tipo de analise e de modelo, aceleracao da gravidade, forca externa e velocidade de referencia
2 0.082 0.05 0.01 1.17 Penetrometro - Tipo, peso total, diametro, comprimento, coeficiente de arrasto
0.10 0.23 0.21 Penetrometro tipo "Sting" - Diametro do corpo, comprimento equivalente do corpo e coeficiente de arrasto do corpo
9.81 9.81 2.0 Fluidos - peso especifico acima e abaixo do solo e espessura da lamina dagua
13.0 1.0 2.0 9.0 Solo - peso especifico, fator de adesao, sensibilidade, Nk
2.0 2.0 1.0 viscosidade
A1.vel

```

Figura 6.3 – Arquivo de entrada no programa

A linha posterior trata do bloco de controle. Nesta linha o primeiro número representa o tipo de análise que pode ser: simulação de cravação ou retroanálise do sinal de velocidade com a profundidade. O segundo número trata do tipo de modelo para a análise que pode ser: True (1976) com sua equação original ou outros tipos de modelos implementados no programa. O terceiro número trata do valor da aceleração da gravidade, esta variável permite que se possam configurar análises para diversas unidades de medidas e também selecionar o valor da gravidade para o local de pesquisa. O quarto e quinto números relacionam-se a uma possível força externa extra que possa estar atuando no penetrômetro e ao valor de uma velocidade de referência para o uso em modelos de viscosidade.

As informações referentes aos dados do penetrômetro são inseridas nas duas linhas seguintes, características como: o tipo de penetrômetro que pode ser cilíndrico ou tipo “Sting”, peso total do penetrômetro, diâmetro externo da parte cravável, comprimento da


parte cravável do penetrômetro e volume da câmara superior, se for do tipo “Sting” e o coeficiente de arrasto.

Os modelos consideram os parâmetros dos fluidos, para isso há uma linha destinada a eles. São considerados o peso específico do fluido acima do solo e o peso específico do fluido abaixo do solo.

Após, existe a linha dos parâmetros do solo. Nesta linha inserem-se os dados referentes ao peso específico do solo, coeficiente de arrasto, fator de adesão lateral, sensibilidade e fator de capacidade de carga.

Além disso, incluem-se parâmetros de viscosidade do solo, no modelo de análise. No caso do modelo de True (1976) com sua equação original utiliza-se coeficiente  $Se$ , coeficiente  $Ce$ , coeficiente  $C_0$ .

Por fim, na última linha, caso for indicado a simulação de cravação insere-se a velocidade de impacto, incremento de penetração  $Su$  na superfície do solo e taxa de crescimento de  $Su$  com a profundidade. Porém, se o programa for utilizado para a retroanálise do sinal de velocidade indica-se o nome do arquivo de entrada com os sinais de velocidades e profundidades medidas, em formato de texto com os valores situados em colunas. A figura 6.4 mostra a forma de entrada dos sinais de velocidade pela profundidade.



The image shows a Notepad window titled "A1 - Bloco de notas" with a menu bar containing "Arquivo", "Editar", "Formatar", "Exibir", and "Ajuda". The text area contains a list of numerical data organized into two columns. The first column represents depth values, and the second column represents velocity values. The data is as follows:

0.00000	5.51840
0.02207	5.51496
0.04411	5.50807
0.06613	5.50056
0.08812	5.49368
0.11008	5.48555
0.13200	5.47585
0.15388	5.46553
0.17572	5.45397
0.19751	5.44084
0.21925	5.42770
0.24094	5.41645
0.26258	5.40457
0.28417	5.39081
0.30570	5.37643
0.32718	5.36330
0.34861	5.35142
0.36999	5.33829

Figura 6.4 – Arquivo de velocidade medida. Na coluna da esquerda dados referentes a profundidade e à direita dados de velocidade



### 6.3.1. Parâmetros utilizados nas análises

Os parâmetros utilizados nas análises foram escolhidos conforme a recomendação bibliográfica de autores que estudaram a resistência dos solos através do uso de equipamentos de penetração comparando os resultados medidos com amostras ensaiadas em laboratório.

Os valores dos diversos parâmetros são inseridos cada qual em sua linha de comando. As primeiras são as definições sobre arquivos de saída gráfica. Após configura os parâmetros do penetrômetro como o peso, com 0,082 k N, diâmetro da parte cravável e comprimento a qual foi usada a sapata de 0,050 metros de diâmetro com 0,010 metros de altura e o volume do penetrômetro determinado pelo programa *Solid Works*, 1 873 052,25 mm<sup>3</sup> ou 0,00187 m<sup>3</sup>.

Beard (1985) considera que o coeficiente de arrasto de um penetrômetro no solo pode, simplificarmente, ser considerado igual ao seu valor na água. Logo, foram considerados os valores usuais da densidade da água 1000 kgf/m<sup>3</sup> ou 9,81 kN/m<sup>3</sup>.

Para o solo, admitido como uma argila orgânica mole o peso específico representado foi 13 kN/m<sup>3</sup>, o fator de adesão considerado 1,0 e o fator de capacidade de carga 9,0 (Alves, 2009).

Para o coeficiente de arrasto, White (1998) apresenta-os para discos em fluxos tridimensionais para números de Reynolds superiores a 10<sup>4</sup>. Para verificar se há a possibilidade do uso de seus parâmetros estima-se o Número de Reynolds pela equação 6.2.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Eq. 6.2}$$

Substituindo os valores de densidade e viscosidade da água, o diâmetro da sapata e o valor da velocidade terminal, encontrada experimentalmente, por  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ,  $D = 0,05 \text{ m}$  e  $v = 5,7 \text{ m/s}$  respectivamente, encontra-se

$$Re = 2,85 \cdot 10^5$$

como o valor do Número de Reynolds para o penetrômetro é superior ao valor proposto, logo, segundo White (1998), o coeficiente de arrasto para o disco em fluxos tridimensionais é de 1,17.

Com relação a sensibilidade de solos marinhos Beard (1981) sugere os valores transcritos na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Valores recomendados para sensibilidade dos sedimentos  
(adaptado de Beard, 1981)

<b>Tipo de sedimento</b>	<b>Sensibilidade</b>
Argila Pelágica	3
Vaza Calcária	4 – 6
Argila Litogênica	3
Silte Argiloso	2
Areia Siltosa ou Silte Arenoso	2

Assim, segundo as recomendações do autor o valor da sensibilidade assumido foi 2, para solos argilosos.

Nos parâmetros de viscosidade do solo  $Se$ ,  $Ce$  e  $C_0$  do modelo de True (1976) foram considerados de acordo com a proposta de Rocker (1985), abaixo apresentada pela tabela 6.7. Com base nesta tabela optou-se em utilizar para os parâmetros  $Se$ ,  $Ce$  e  $C_0$  os valores 2,0, 2,0 e 1,0 respectivamente.

Tabela 6.7 – Valores das constantes usadas para o modelo de True (1976)  
(adaptado de Rocker, 1985)

<b>Condições de uso em problemas de penetração</b>	<b>Parâmetros</b>		
	$Se$	$Ce$ ( $kN.s / m^2$ )	$C_0$
Penetrômetro cilíndricos longos	4,0	0,2	0,11
Penetrômetros com outros formatos onde a penetração inadequada é motivo de atenção	3,0	0,5	0,25
Penetrômetros com outros formatos, onde a penetração em excesso é motivo de atenção primordial	2,0	2,0	1,0

### 6.3.2. Resultados gerados pelo programa FFP

Com a definição dos parâmetros para o programa FFP montou-se os arquivos entrada com as velocidades e deslocamentos do penetrômetro no solo, sendo um arquivo para cada lançamento.

Com isso o programa FFP gera os arquivos no bloco de saída. O arquivo que caracteriza o perfil da resistência ao cisalhamento não drenada ao longo da profundidade é gerado para cada lançamento.

Os arquivos gerados são compilados e apresentados na figura 6.5 onde cada linha representa um lançamento e cada cor representa um local de ensaio. Os lançamentos indicados por linha tracejada azul são os resultados de sinais de aceleração que destoaram dos demais lançamentos.

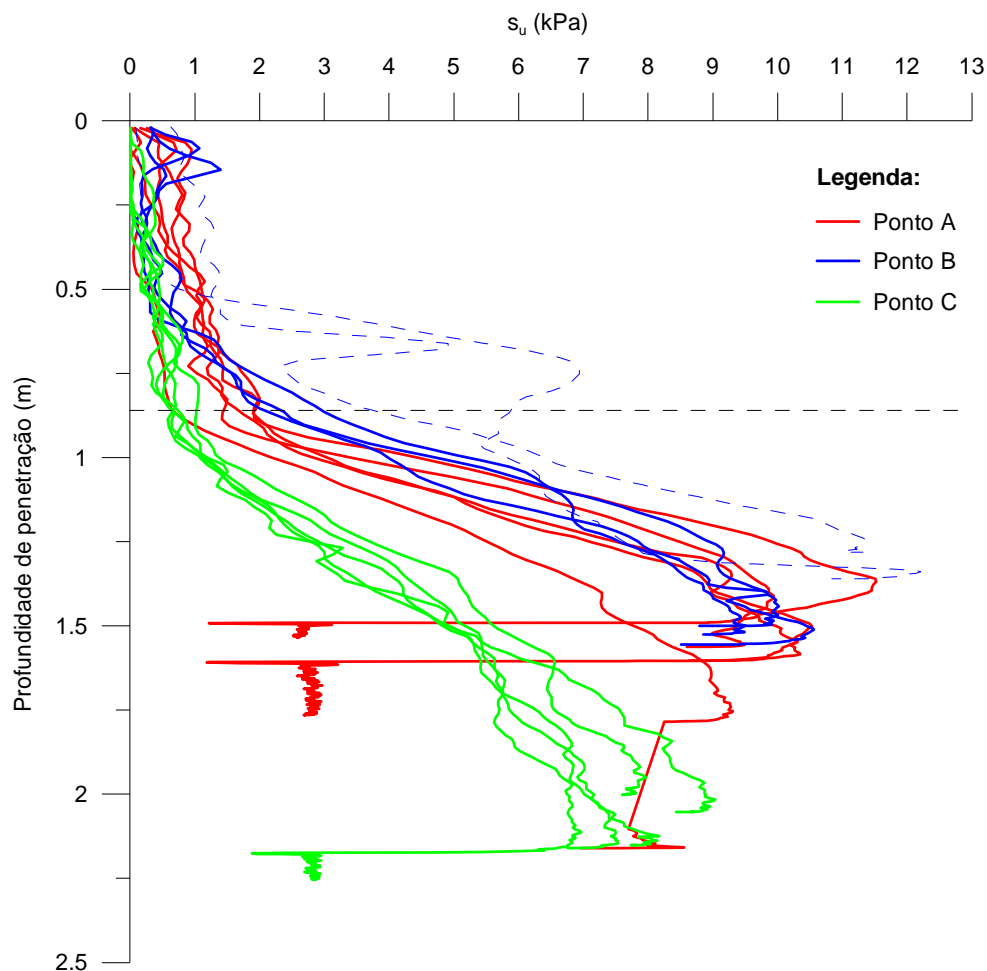


Figura 6.5 – Resistência ao cisalhamento dos sedimentos na marina do Rio Grande Yacht Club

Os resultados apresentados na figura 6.5 são realísticos até a profundidade de 0,86 metros (indicado por uma linha tracejada horizontal), que corresponde ao comprimento da haste do penetrômetro. A partir desta profundidade o corpo do penetrômetro passa a penetrar também no solo, modificando a geometria para uma forma bastante complexa não representada pelo programa FFP.

Reed *et al.* (2009) realizaram um estudo com os depósitos de lama *offshore* na Praia do Cassino (Rio Grande – RS) e correlacionaram com os resultados do penetrômetro comercial STING MKII com os valores de ensaios de palheta de laboratório realizados com amostras retirados do local. A comparação entre os perfis de resistência ao cisalhamento obtidos com os resultados do STING MKII e os valores medidos em laboratório mostra uma razoável concordância para a faixa de variação encontrada.

Os autores relatam que a máxima a resistência ao cisalhamento em seus ensaios são de aproximadamente 3,6 kPa um pouco antes do penetrômetro STING MKII completar a profundidade de penetração. A figura 6.6 mostra os seus resultados.

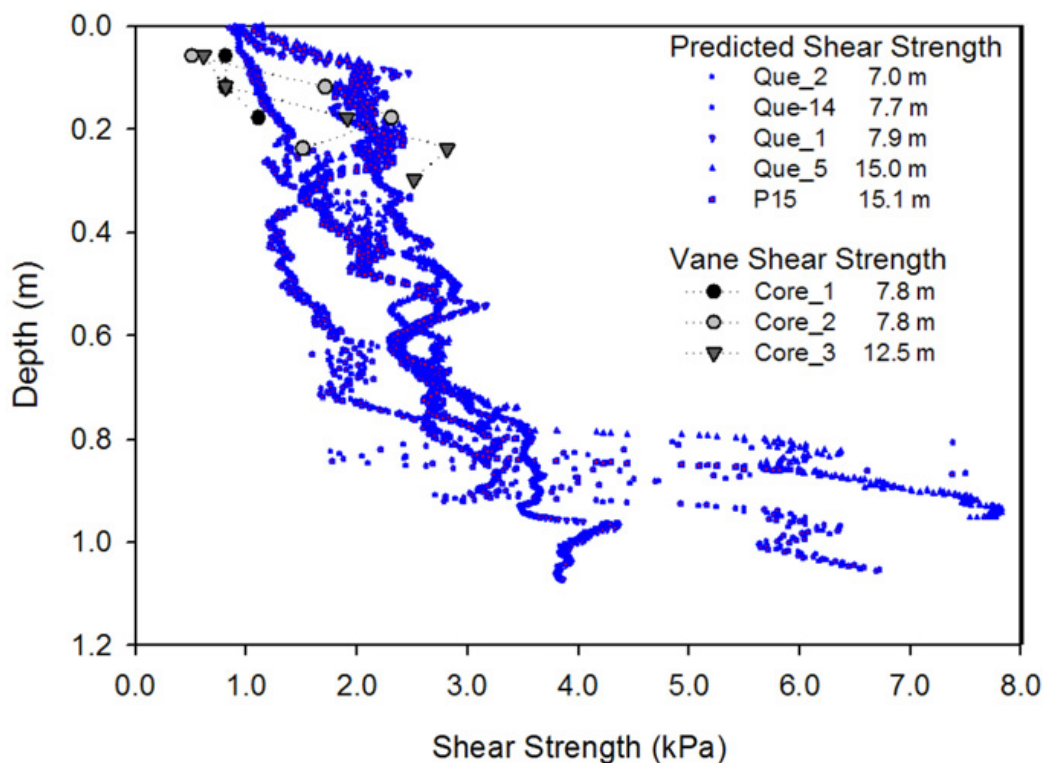


Figura 6.6 – Resistência ao cisalhamento na lama da Praia do Cassino  
(extraído de Reed *et. al.*, 2009)

Com o uso do penetrômetro de queda livre construído e com a utilização dos dados recomendados pelos autores na configuração dos parâmetros do programa FFP pode-se

concluir que a resistência ao cisalhamento do solo na marina do Rio Grande Yacht Club está na mesma ordem de grandeza dos dados medidos na lama da Praia do Cassino.

Entretanto o que existe de semelhante nos dois casos é o tipo de sedimento de fundo que tanto na marina como na costa (onde foram feitas as amostragens de Reed *et. al*, 2009) são praticamente o mesmo, bolsões lamínicos, com forte presença de lama fluida em suspensão, proveniente da descarga de sedimentos da laguna.

## 7. CONCLUSÕES

O penetrômetro desenvolvido e apresentado neste trabalho constitui-se uma excelente alternativa para caracterização superficial de solos marinhos, por tratar-se de um instrumento de pequeno porte, leve (neste estudo com 8,2 kg) e de simples operação quando comparado com técnicas tradicionais de ensaio de solos.

O aparelho, durante a etapa de testes, quando em queda livre no local de estudo, mostrou-se bem balanceado do ponto de vista dinâmico, não mostrando tendências de deslocamentos laterais. O sistema eletrônico e de aquisição de dados mostrou-se capaz de adquirir e armazenar com qualidade o máximo número de dados possíveis permitido pelo sistema utilizado.

Com isto, os sinais gerados pela desaceleração imposta ao aparelho em cada lançamento, para cada ponto de amostragem, apresentavam uma excelente repetitividade dos registros, indicando que o penetrômetro estava funcionando perfeitamente.

Em relação aos sinais obtidos, foi possível caracterizá-los pelas variações na taxa de variação das acelerações, pulso (*jerk*). A curva de acelerações foi dividida em sete segmentos e analisada segundo a sua posição durante o seu deslocamento no ar, na coluna d'água e no sedimento.

Com os dados obtidos nos testes de campo foi possível estimar a velocidade terminal do penetrômetro como sendo da ordem de 5,7 m/s, obviamente para as condições locais dos testes.

Os resultados de resistência ao cisalhamento gerados pelo programa FFP são na ordem de 2,0 kPa, sendo realísticos até a profundidade de 0,86 metros, que corresponde ao comprimento da haste. A partir desta profundidade o corpo do penetrômetro passa a penetrar no solo, modificando a geometria para uma forma complexa não representada pelo programa.

A resistência ao cisalhamento na marina (2 kPa) está na mesma ordem de grandeza de dados medidos na lama da Praia do Cassino (3 kPa), onde o tipo de sedimento de fundo nestes casos são similares sendo que são proveniente da descarga de sedimentos da laguna.

## 8. RECOMENDAÇÕES

Sugere-se:

- 1° A utilização de um programa de desenho técnico que desenvolva desenhos cujas formas possam representar fidedignamente perfis de geometrias complexas;
- 2° Um estudo sobre perfis hidrodinâmicos para escoamento em fluxos reais;
- 3° Um estudo e a programação do sistema computadorizado do torno CNC que permita a inserção de equações matemáticas que permitam a usinagem de quaisquer formas geométricas;
- 4° A adoção de um projeto que reduza as paredes internas do corpo do penetrômetro aumentando o espaço interno disponível para uma possível instalação de um sistema eletrônico de aquisição de dados embarcado no aparelho;
- 5° Redução da razão entre a área da aleta e a superfície total do corpo do penetrômetro, pois a razão entre eles neste estudo ficou em 19,2%, muito maior que a área de um leme em relação à superfície submersa (calado) de um navio, enquanto esta relação fica entre 1,7 a 2,5% (Fonseca, 1985);
- 6° A construção de hastes de maior comprimento (1, 2 e 3 metros de comprimento) com respectivos sistemas de encaixes para aumentar a profundidade de ensaio do leito marinho e também a construção de sapatas com outros diâmetros (35 mm, 70mm, ...) para que se possa estudar diferentes tipos de solos marinhos;
- 7° Em ensaios de campo, sejam realizadas coletas de amostras de sedimentos para que possam ser feitos testes em laboratório. E os resultados comparados com os registros do penetrômetro a fim de calibrar o equipamento e validar os resultados obtidos.

## ANEXO A – ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE ARRASTO NO CORPO DO PENETRÔMETRO

Partindo da representação do diagrama do corpo livre, modelando o sistema pela Segunda Lei de Newton.

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = w_{sub} - F_D - F_P - F_L \quad \text{Eq. A.1}$$

Onde a força de arrasto foi dividida em duas partes; força de arrasto da sapata e a força de arrasto do “resto” (corpo, aletas, haste, ...).

$$m' v_i \frac{v_{(i+1)} - v_{(i-1)}}{Z_{(i+1)} - Z_{(i-1)}} = w_{sub} - F_{D(fluido)} - F_{D(solo)} - F_P - F_L \quad \text{Eq. A.2}$$

Na velocidade terminal, a aceleração, a força de ponta e a força lateral

$$\frac{v_{(i+1)} - v_{(i-1)}}{Z_{(i+1)} - Z_{(i-1)}} = F_P = F_L = 0$$

Logo a equação fica

$$w_{sub} = F_{Df} + F_{Ds} \quad \text{Eq. A.3}$$

como

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 \quad \text{Eq. A.4}$$

Substituindo a Eq. A.4 na Eq. A.3 referente a cada termo



$$w_{sub} = \frac{1}{2} C_{Df} A_{Df} \rho_f v^2 + \frac{1}{2} C_{Ds} A_{Ds} \rho_s v^2 \quad \text{Eq. A.5}$$

considerando  $\rho_f = \rho_s = \rho$ , logo:

$$w_{sub} = \frac{1}{2} \rho v^2 (C_{Df} A_{Pf} + C_{Ds} A_{Ps}) \quad \text{Eq. A.6}$$

onde  $w_{sub}$  é o peso submerso do penetrômetro

$$\begin{aligned} w_{sub} &= w_P - E \\ w_{sub} &= m_P \cdot g - \rho_f \cdot V_P \cdot g \\ w_{sub} &= g(m_P - \rho_f \cdot V_P) \end{aligned}$$

Assim a Eq. A.6 fica

$$g(m_P - \rho_f \cdot V_P) = \frac{1}{2} \rho v^2 (C_{Df} A_{Pf} + C_{Ds} A_{Ps}) \quad \text{Eq. A.7}$$

Substituindo os valores na equação Eq. A.8

$$\begin{aligned} m_p &= 8,2 \text{ kg} & A_{Ps} &= 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ V_p &= 0,00187 \text{ m}^3 & A_{Pf} &= 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_f = \rho_s = \rho &= 1000 \text{ kg/m}^3 & v &= 5,7 \text{ m/s} \\ g &= 9,81 \text{ m/s}^2 & C_{Ds} &= 1,17 \end{aligned}$$

Encontra o coeficiente de arrasto teórico para o corpo do penetrômetro, como sendo:

$$C_{Df} = 0,21$$

Este valor encontrado para o coeficiente de arrasto no corpo do penetrômetro é comparável a um cilindro de extremidade arredondada onde a razão entre o comprimento e o diâmetro são 5. O coeficiente de arrasto para corpos cilíndricos é apresentado pela figura A.1 extraído de Hoerner (1965).

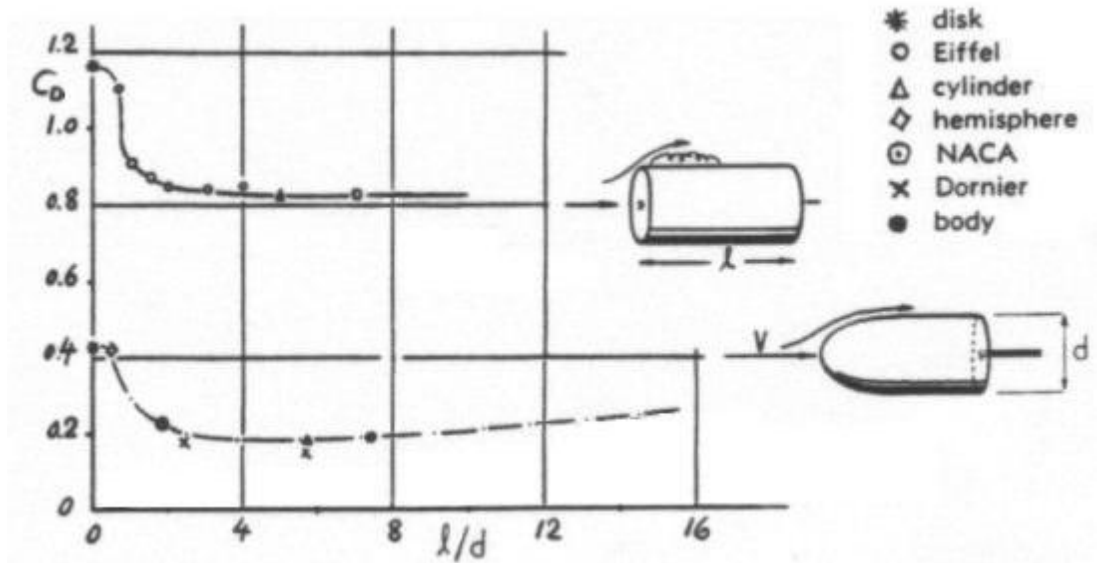


Figura A.1 – Coeficiente de arrasto em corpos cilíndricos de extremidades retas e arredondadas com razão  $l/d$  e com fluxos axiais (extraído de Hoerner, 1965)

No entanto o coeficiente de arrasto determinado para o corpo do penetrômetro compreende as todas as partes do aparelho como as aletas, cabos, haste,... excluindo apenas o disco que possui o coeficiente de arrasto tabelado.

## ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DO PENETRÔMETRO

- Corpo

	Nariz	Cauda
Área Lateral	34 043,38 mm <sup>2</sup>	63 208,45 mm <sup>2</sup>
Volume externo	673 005,89 mm <sup>3</sup>	1 200 046,36 mm <sup>3</sup>
Volume interno	403 051,93 mm <sup>3</sup>	581 540,98 mm <sup>3</sup>
Massa Total <sup>3</sup>	7,160 kg	

- Haste

Comprimento	86 mm
Massa	0,880 kg

- Sapatas

	sapata 1	sapata 2
Diâmetro	50 mm	25 mm
Altura	10 mm	5 mm
Massa	0,160 kg	0,020 kg

<sup>3</sup> A massa considerada é do corpo do penetrômetro concluído, com o acelerômetro e o lastro de chumbo instalados na cavidade interna.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAL, T., STOLL, R.D. 1995. An expendable penetrometer for rapid assessment of seafloor parameters. Proceedings, Oceans'95 Conference, IEEE, 1822-1826.
- ALVES, A. M. L. 2008. Programa FFP – Manual de Utilização.
- ALVES, A. M. L. 2009. Comunicação pessoal.
- ALVES, A. M. L.; DANZIGER, F. A. B. 2008. Geotechnical characterization of marine soils by means of freefall penetration tests - An overview. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference - Geotechnics in Maritime Engineering. Gdansk, Poland. 15 - 18 September.
- ANTIQUERA, J. A. F.; CALLIARI, L. J. 2005. Características Sedimentares da Desembocadura da Laguna dos Patos. GRAVEL. Porto Alegre. p 39-46.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7497 - Vibrações mecânicas e choques. Rio de Janeiro, 1982.
- 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.
- AutoCAD Mechanical 2008. Version 17.0.51.0. Autodesk, Inc. 1996-2006. 1 DVD-ROM.
- BEARD, R. 1977. Expendable Doppler penetrometer; A performance evaluation. Civil Engineering Laboratory, U.S. Naval Facilities Engineering Command, Technical Report 855.

- BEARD, R. M. 1981. A penetrometer for deep ocean seafloor exploration. Proceedings, Oceans'81 Conference, IEEE, 668-673.
- BEARD, R. M. 1985. Expandable Doppler Penetrometer for Deep Ocean Sediments Measurements Strength Testing of Marine Sediments. Laboratory and In-situ Measurements, ASTMSTP 883, American Society for testing and materials, p 101-124.
- CHLOUVERAKIS, K. E.; SPROTT J.C. 2006. Chaotic hyperjerk systems. Chaos, Solitons and Fractals. 18 August 2005 p 739 – 746.
- COLP, J.L.; CAUDLE, W.N.; SCHUSTER, C. L. 1975. Penetrometer system for measuring in situ properties of marine sediments. Proceedings, Oceans' 75 Conference, IEEE, 405-411.
- COSTA, R. G. B. 2008. Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- CURRIE, I. G. 2003. Fundamental Mechanics of Fluids. Third Edition. New York, USA. Marcel Dekker, Inc, 525 p. ISBN: 0-8247-0886-5.
- DAYAL, U.; ALLEN, J. H. 1973. Instrumented impact cone penetrometer. Canadian Geotechnical Journal, 10, 397-409.
- DAYAL, U.; ALLEN, J. M.; JONES, J.M. 1975. The use of impact penetrometer for the evaluation of the in situ strength of marine sediments. Mar. Geotechnol. 1: 73–89.
- DAYAL, U.; ALLEN, J.H.; REDDY, D.V. 1980. Low velocity projectile penetration of clay. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, 106, 919-937.
- FONSECA, M. M. 1985. Arte Naval. 4º Edição. Rio de Janeiro, Brasil. Escola Naval, 488p. ISBN 85-7047-051-7.

Grapher. Version 7.0.1870. Golden Software, Inc. 1992-2007. 25 M bytes.

HOERNER, S. F. 1965. Fluid Dynamic Drag. Bakersfield, CA. Hoerner Fluid Dynamics. ISBN 9781124136226.

Lab Pro. Vernier Software & Technology. Beaverton, Oregon, United States, 2000. Vernier LabPro® User's Manual, p. 31.

Lab Pro. Vernier Software & Technology. Beaverton, Oregon, United States, Revision Date: 08/02/02. Technical Reference Manual, p. 96.

Logger Pro 3. Vernier Software & Technology. Beaverton, Oregon, United States, 2008. Quick Reference Manual, p. 16.

Logger Pro 3.6. Version 8.110. Vernier Software & Technology. 1981-2008. 1 CD-ROM

KUNITAKI, D. M. K. N. 2006. Tratamento de incertezas no comportamento dinâmico de estacas torpedo para ancoragem de sistemas flutuantes na exploração de petróleo offshore. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

MORISON, J. R.; O'BRIEN, M. P.; JOHNSON, J. W.; SCHAAF, S. A. 1950. The force exerted by surface waves on piles. AIME Petroleum Transactions, AIME, 189, 149-154.

OSLER, J.; FURLONG, A.; CHRISTIAN, H.; LAMPLUGH, M. 2006. The integration of the free fall cone penetrometer (FFCPT) with the moving vessel profiler (MVP) for the rapid assessment of seabed characteristics. Proceedings, Canadian Hydrographic Conference, Halifax.

REED, A. H.; FAAS, R. W.; ALLISON, M. A.; CALLIARI, L. J.; HOLLAND, K. T.; O'REILLY, S. E.; VAUGHAN, W. C.; ALVES, A. 2009. Characterization of a mud deposit offshore of the Patos Lagoon, southern Brazil. Continental Shelf Research. p 597-608.

- ROBERTSON, H. P. 1941. Terminal Ballistics. A Preliminary Reporty. Defence Technical Information Center. Natl. Res. Counc., Washinton, DC.
- ROCKER, K. JR, 1985. Handbook for Marine Geotechnical Engineering. Deep Ocean Technology. Naval Civil Engineering Laboratory Port Hueneme. CA 93043. p8-8.
- SCOTT, R.F. 1967. In place measurements of the ocean floor soils by accelerometer. In: Proceedings of the Conference on Civil Engineering in the Oceans-1, ASCE San, Francisco, California, pp. 419–444.
- SCOTT, R. F. 1970. In place ocean soil strength by accelerometer. Reviewed by Technical Council on Ocean Engineering. Journal of the soil mechanics and foudations, pp. 199-211.
- SHEPARD, F. P. 1954 Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Rations Journal of Sedimentary Petrology, 31:196-214.
- SolidWorks 2009 SP 0. Version 17.0.0.6014. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. 1995-2008. 1 DVD-ROM.
- SOUZA, S. R. 2002. Caracterização Morfo-sedimentar do Saco do Arraial – Extremo Sul da Laguna dos Patos/RS. Dissertação de Mestrado. FURG. Rio Grande-RS.
- SPOONER, I. S.; WILLIAMS, P.; MARTIN, K. 2004. Construction and use of an inexpensive, lightweight free-fall penetrometer: applications to paleolimnological research. Journal of Paleolimnology, 32, 305-310.
- SPROTT, J. C.; LINZ, S. J. 2000. Algebraically Simple Chaotic Flows. International Journal of Chaos Theory and Applications. Volume 5, No. 2. p 20.
- STEGMANN, S.; MÖRZ, T.; KOPF, A. 2006. Initial results of a new free fall – cone penetrometer (FF-CPT) for geotechnical in situ characterisation of soft marine sediments. Norwegian Journal of Geology, 199-208.

- THOMPSON, L. J.; COLP, J. L. 1970. Application of earth penetration technology to ocean bottom penetration. Proceedings, 2nd Offshore Technology Conference, OTC 1203, 1, 511-576.
- THOMPSON, J. R. 1977. Method of Determining the physical characteristics of the sea floor, US Patent No. 4,007,633.
- THOMPSON, D.; MARCH, R.; HERRMANN, H. 2002. Groundtruth results for dynamic penetrometers in cohesive soils. Proceedings, Oceans'02 Conference, IEEE, 2117-2123.
- TRUE, D.G. 1976. Undrained vertical penetration into ocean bottom soils. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley.
- WHITE, F. M. 1998. Fluid Mechanics. Fourth Edition. New York, USA. McGraw-Hill College, 460 p. ISBN: 0072281928.
- 25-g Accelerometer. Vernier Software & Technology. Beaverton, Oregon, United States, 28/05/2007. Catálogo técnico, p 8.