



REALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE UM PROTÓTIPO DO PIEZOCONE TORPEDO

Arthur Veiga Silvério Pinheiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador (es): Fernando Artur Brasil Danziger
Graziella Maria Faquim Jannuzzi

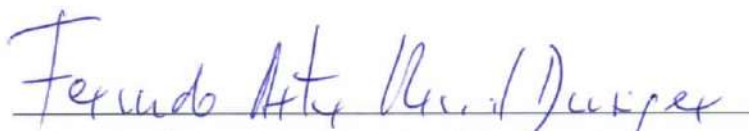
Rio de Janeiro
Abril de 2019

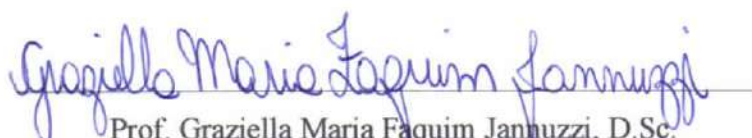
REALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE UM PROTÓTIPO DO
PIEZOCONE TORPEDO

Arthur Veiga Silvério Pinheiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:



Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.


Prof. Graziella Maria Faquim Jannuzzi, D.Sc.


Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, D.Phil.


Prof. Ian Schumann Marques Martins, D.Sc.


Prof. Antonio Marcos de Lima Alves, D.Sc.


Eng. Cláudio dos Santos Amaral, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2019

Pinheiro, Arthur Veiga Silvério

Realização e interpretação de ensaios de um protótipo do piezocone torpedo / Arthur Veiga Silvério Pinheiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

VIII, 143 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger

Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 132-143.

1. Piezocone Torpedo. 2. Estaca Torpedo. 3. Capacidade de Carga. I. Danziger, Fernando Artur Brasil *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus e à minha família por todo o apoio durante esta longa caminhada. Aos meus pais Valdemar e Glaucia, agradeço por todo o amor e apoio dados durante minha vida acadêmica. Aos meus irmãos Allan e André por toda ajuda para que o mestrado fosse possível. Agradeço à minha namorada Raquel Gabriela Alves Campos por toda paciência, carinho, amizade e por toda motivação dada desde o ensino médio no CEFET-RJ/Maracanã.

Ao professor Fernando Artur Brasil Danziger pela orientação, apoio e ensinamentos e à professora Graziella Maria Faquim Jannuzzi por toda orientação durante a execução deste trabalho. Aos amigos de trabalho no Laboratório de Geotecnia Edgard Luis dos Santos Bispo, Gustavo Santos Domingos, Matheus Candal Reis Fernandes, Gustavo Vaz de Mello Guimarães e Luiz Roberto Rocha Marinho que contribuíram de maneira importante para a execução desse trabalho. Ao professor Ian Schumann Marques Martins pela dedicação e empenho durante suas aulas do mestrado, sempre com bons ensinamentos, até mesmo para a vida.

Agradeço aos pesquisadores Elisabeth Porto e Claudio Amaral, do CENPES PETROBRAS, e ao engenheiro Silvio Pinheiro da Silva Junior pelo auxílio na interpretação dos resultados relacionados especialmente ao sistema de aquisição de dados.

À CAPES e à PETROBRAS pelo auxílio financeiro para a presente pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE UM PROTÓTIPO DO PIEZOCONE TORPEDO

Arthur Veiga Silvério Pinheiro

Abril/2019

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger

Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Programa: Engenharia Civil

As três campanhas de ensaio de piezocone-torpedo, realizadas no Campo Experimental de argila mole de Sarapuí II, em 2009, 2013 e 2014, foram analisadas. Problemas e soluções relacionados ao sistema de aquisição de dados e à manutenção da saturação dos elementos porosos foram apresentados e discutidos. As velocidades de impacto dos ensaios realizados variaram entre 3,07 m/s e 9,40 m/s (150 a 470 vezes a velocidade do ensaio de piezocone convencional, de 20 mm/s), para alturas de queda de 0,38 m a 4,38 m. A velocidade do piezocone-torpedo ainda aumentou no interior do solo, antes de diminuir e finalmente parar, o que ocorreu em camadas de solo subjacentes ao material mole. A combinação dos resultados obtidos nos diversos transdutores, especialmente a aceleração, a resistência de ponta e as poro-pressões, permite a compreensão nítida do mecanismo de penetração do equipamento no solo. A determinação da poro-pressão de equilíbrio em ensaios de dissipação revelou-se procedimento valioso para a determinação da profundidade máxima alcançada pelo equipamento. A velocidade apresenta um efeito significativo nos valores de resistência de ponta e atrito lateral, quando estes valores são comparados com a velocidade tradicional de 20 mm/s. O efeito é mais pronunciado no caso do atrito lateral. Também as poro-pressões são afetadas pelo efeito de velocidade, mais no caso de u_1 do que de u_2 . Uma metodologia para obter as forças de penetração do piezocone-torpedo, com base na geometria e nos resultados de resistência de ponta e atrito, foi desenvolvida. Os valores da resistência não drenada puderam ser obtidos de modo consistente através da medida da resistência de ponta, uma vez tenha sido feita uma calibração a partir de ensaios convencionais de piezocone.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TORPEDO PIEZOCONE PROTOTYPE TEST AND DATA INTERPRETATION

Arthur Veiga Silvério Pinheiro

April/2019

Advisors: Fernando Artur Brasil Danziger

Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Department: Civil Engineering

Three series of torpedo-piezocone tests, performed at the Sarapuí II soft clay test site in 2009, 2013 and 2014 have been analysed. Problems and solutions related to the data acquisition system and the maintenance of saturation of the filters, have been presented and discussed. Impact velocity were in the range 3,07 m/s - 9,40 m/s (150 to 470 times the rate of conventional piezocone tests, 20 mm/s), for fall heights between 0,38 m and 4,38 m. The velocity still increased inside the soil, before reducing and eventually stop in soil layers beneath the soft clay. The combination of the measurements from the various transducers, especially acceleration, cone resistance and pore pressure, allows a clear perception of the penetration mechanism into the soil. The determination of equilibrium pore pressure, from dissipation tests, was proven to be a valuable tool for the determination of the maximum depth reached by the penetrometer. Cone resistance and sleeve friction were very much affected by the velocity, with respect to the regular penetration rate of 20 mm/ from the conventional test. The rate effect is more pronounced in the case of the sleeve friction. Rate effect was also noticed in the pore pressures u_1 and u_2 , more significantly in u_2 . A method to estimate the penetration forces on the penetrometer, during penetration, based on the penetrometer geometry, the cone resistance and the sleeve friction, was proposed. The undrained shear strength was properly estimated from the torpedo-piezocone, based on a calibration with regular piezocone tests.

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Motivação do trabalho	2
1.4. Organização do Trabalho	2
2. Penetrômetros de queda livre	4
2.1. Penetrômetros de queda livre em solo marinho – o artigo de Alves e Danziger (2008)4	
2.2. Um caso recente da utilização de penetrômetros de queda livre para caracterização no Golfo do México - CPT Stinger – (Young et al., 2011).....	13
2.3. Ensaios com Penetrômetros de queda livre no Ártico – (Stark et al., 2016) ...	20
2.4. Ensaios com Penetrômetros de queda livre em centrífuga – (Chow et al., 2017) 24	
3. Um estudo sobre a influência da viscosidade na resistência das argilas e uma análise dos dados do CPTU torpedo em centrífuga	27
3.1. A tese de Martins (1992) – O Comportamento viscoso dos solos sob carregamento quasi-estático.....	30
3.2. Comportamento dinâmico durante a cravação do torpedo – Proposta para interação dinâmica estaca-solo de Randolph (1990).....	35
3.3. Tratamento dos dados de penetrômetros de queda livre considerando o efeito da velocidade com base no artigo de Randolph et. al (2018)	36
3.3.1. Hidrodinâmica e arraste do solo	37
3.3.2. Resistência no fuste.....	39
3.3.3. Resistência de ponta e obtenção da resistência não drenada (S_u).....	40
3.3.4. Efeito viscoso em função da velocidade de cravação	41
4. O campo experimental de Sarapuí II.....	46
4.1. Introdução	46
4.2. Características geológico-geotécnicas de Sarapuí II	47
5. Piezocone torpedo desenvolvido e a campanha de 2009	53
5.1. Introdução	53
5.2. O desenvolvimento do equipamento	54
5.3. Calibração	56
5.4. Saturação dos elementos porosos.....	63

5.5.	Procedimentos de realização dos ensaios	64
5.6.	Interpretação realizada em 2009	68
6.	As campanhas de 2013 e 2014	81
6.1.	Generalidades	81
6.2.	Método de tratamento dos dados	83
6.3.	Ensaio realizados em 2013	84
6.3.1.	Resultados dos ensaios em função do tempo.....	85
6.4.	Ensaio realizados em 2014	93
6.4.1.	Resultados dos ensaios em função do tempo dos ensaios da segunda campanha	94
7.	Análise dos resultados	101
7.1.	Altura de queda e velocidade de impacto	101
7.2.	Profundidades atingidas nos ensaios	102
7.3.	Comparação entre a aceleração de pico e a velocidade de impacto	107
7.4.	Análise global dos resultados (q_t , f_s , u_1 e u_2).....	108
7.5.	Aplicação ao projeto de estaca torpedo	111
7.5.1.	Comparação entre os valores de força estimados por medidas no piezocone torpedo e a força medida durante a cravação obtida a partir da aceleração	111
7.5.2.	Correção dos efeitos de velocidade para uma aplicação do piezocone torpedo sob os métodos já existentes para o piezocone convencional.....	124
8.	Resumo, conclusões, considerações adicionais e sugestões para pesquisas futuras 129	
8.1.	Resumo, conclusões e considerações adicionais	129
8.2.	Sugestões para Pesquisas Futuras	131
	Referências Bibliográficas	132

1. Introdução

1.1. Generalidades

A investigação dos parâmetros geotécnicos através de ensaios in situ dos solos marinhos é de fundamental importância para a engenharia offshore, e cada vez mais tem se tornado um desafio maior, diante das maiores profundidades atingidas nos locais atuais de exploração.

A indústria offshore começou em 1947 com a instalação da primeira plataforma em apenas 6 m de profundidade, fora da costa de Louisiana nos Estados Unidos. Atualmente existem mais de 7000 plataformas offshore ao redor do mundo localizadas em diversas profundidades, as quais começam a ultrapassar 2000 m. Essa evolução forçou a mudança no conceito de águas profundas, conhecido na década de 70 como profundidade entre 50 e 100 m, agora esse conceito refere-se a profundidades em torno de 800 m. Com isso, um novo conceito foi criado para referir-se às profundidades maiores que 1000 m, as águas ultra profundas (Abreu, 2014).

Com o avanço da exploração de petróleo em águas profundas, há uma crescente necessidade de ensaios de alta qualidade nos solos da superfície marinha. Em águas ultra profundas os solos da superfície marinha são frequentemente solos moles com baixa resistência ao cisalhamento. Por isso uma avaliação detalhada do solo mole marinho tem se tornado cada vez mais importante. O piezocone tem se tornado uma ferramenta importante em investigações offshore, embora penetrômetros de fluxo, como T-bar e o fall-cone, também tenham se tornado populares em sedimentos moles (Robertson e Bogress, 2010).

A possibilidade de obtenção de parâmetros geotécnicos do solo a partir de dados obtidos da cravação de estacas torpedo a tempo de utilizá-los nos projetos e reduzir custos das campanhas geotécnicas motivou a criação do equipamento de investigação geotécnica desenvolvido para aplicação offshore em águas ultra profundas designado piezocone torpedo (Porto et. al, 2010). O equipamento tem funcionalidades equivalentes ao do piezocone desenvolvido pela COPPE/UFRJ, com isso é capaz de registrar as resistências de ponta (q_c), e de atrito (f_s), as poro-pressões na face (u_1) e na base (u_2) do cone e a temperatura durante a penetração do torpedo, o qual é lançado em queda livre. O equipamento tem acoplado no seu trecho superior a “garrafa”, dispositivo aonde são feitas

as leituras de aceleração e giro em três eixos perpendiculares (x, y, z), além dos sensores do piezocone. A partir dos dados de aceleração A_z (eixo axial da garrafa), são obtidos por integração da aceleração a velocidade e, por conseguinte o deslocamento a partir de uma nova integração, tal como no caso das estacas torpedo.

O autor do presente trabalho teve a oportunidade de participar do projeto de desenvolvimento do piezocone torpedo durante a iniciação científica. O autor participou dos processos de saturação dos elementos porosos, calibração dos transdutores de poro-pressão e células de carga, bem como da análise dos dados obtidos nos ensaios. Além disso, auxiliou nas atividades de campo durante a realização dos ensaios.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo: (i) aprofundar a interpretação dos dados do piezocone torpedo; (ii) sugerir aprimoramento do equipamento para trabalhos futuros; (iii) aprimorar as correções existentes para estimativa de parâmetros geotécnicos a serem utilizados no projeto de estacas torpedo; (iv) avaliar as metodologias atuais para determinar os parâmetros de projeto de estacas torpedo a partir de dados dos ensaios de piezocone torpedo realizados.

1.3. Motivação do trabalho

Este trabalho foi motivado pela necessidade de uma análise mais aprofundada acerca do piezocone torpedo, principalmente sua aplicação para projeto de estacas torpedo. Assim, são discutidos aspectos referentes ao ensaio e sua aplicação, evolução nos tratamentos dos dados considerando efeito da velocidade de cravação, problemas ocorridos e solucionados durante as três campanhas e reunidos todos os resultados de piezocone torpedo obtidos nas campanhas realizadas desde 2009 até 2014 no depósito de solo mole de Sarapuí II.

1.4. Organização do Trabalho

Segue-se a esta Introdução o capítulo 2, que se refere a um histórico dos penetrômetros de queda livre, baseado no trabalho de Alves e Danziger (2008), e em atualizações mais recentes. O capítulo 3 apresenta uma breve revisão bibliográfica: um estudo da influência da viscosidade na resistência das argilas e uma análise realizada em ensaios de piezocone-torpedo em centrífuga. O capítulo 4 apresenta o campo experimental de Sarapuí II, com

a descrição das suas principais características geológico-geotécnicas. O capítulo 5 apresenta o histórico do piezocone torpedo, desenvolvido em um projeto conjunto COPPE-UFRJ/ PETROBRAS-CENPES. São mencionados também neste capítulo: (i) os procedimentos anteriores à ida ao campo, dentre eles, as calibrações dos transdutores de poro-pressão e das células de carga de ponta e atrito lateral e a saturação dos elementos porosos; (ii) os procedimentos empregados no campo para a realização dos ensaios; (iii) os procedimentos necessários após a realização dos ensaios no retorno ao laboratório. Neste capítulo também são apresentados os resultados dos ensaios realizados em 2009, sendo relacionadas ainda as dificuldades obtidas com o sistema de aquisição e com a análise dos dados. No capítulo 6 são apresentados os resultados das campanhas de 2013 e 2014, bem como os problemas encontrados e as soluções com o novo método de análise de dados. O capítulo 7 aborda a análise global de todos os ensaios com o intuito de refinar a análise, permitindo uma comparação com os ensaios de piezocone convencionais e aplicação ao projeto de estaca torpedo com a determinação da resistência não drenada a partir dos ensaios de piezocone torpedo. As conclusões e sugestões para pesquisas futuras estão incluídas no capítulo 8, e em seguida encontram-se listadas as referências bibliográficas.

2. Penetrômetros de queda livre

2.1. Penetrômetros de queda livre em solo marinho – o artigo de Alves e Danziger (2008)

No presente item são ilustrados aspectos gerais, com base no trabalho de Alves e Danziger (2008), da caracterização geotécnica de solos marinhos através de ensaios de penetrômetros de queda livre. Uma atualização sobre este assunto é apresentada em itens seguintes, dentre os quais é ilustrado um penetrômetro de queda livre recentemente utilizado na obtenção do perfil de resistência não drenada, S_u , do solo marinho no Golfo do México (Jeanjean et al, 2012), e também o trabalho de Chow et al. (2017) com penetrômetros de queda livre em centrífuga.

Uma revisão acerca desses penetrômetros é feita em Alves e Danziger (2008), junto com a discussão sobre a base teórica dos métodos mais usados para retroanálise dos dados obtidos durante os ensaios, porém este tema não será objeto do presente trabalho.

Segundo Alves e Danziger (2008), o conhecimento de propriedades geotécnicas de solos marinhos é de grande importância em muitas aplicações de engenharia, como portos e projetos de portos, cabos submarinos, plataformas para exploração e produção de petróleo, estudo de transporte de sedimentos, operações de dragagem, e penetração de objetos de impacto como âncoras e artefatos militares. Entretanto, a caracterização dos solos marinhos tem certas peculiaridades e requerem diferentes técnicas, com respeito às aquelas usadas para depósitos de solos “onshore”. Os procedimentos dos tradicionais ensaios de campo e amostragem apresentam dificuldades em relação à logística e operação, devido à crescente profundidade das lâminas d’água alcançadas e às condições ambientais enfrentadas (ondas e correntes).

Além disso, coletar amostras indeformadas pode se tornar impraticável mesmo sob pequena profundidade, devido à baixa resistência ao cisalhamento usualmente encontrado nas camadas superficiais (frequentemente um solo muito mole, “vaza”).

Métodos geofísicos têm se tornado uma interessante alternativa para a caracterização qualitativa de solos marinhos, entretanto tais métodos têm limitações em estimar os parâmetros geotécnicos relacionados a grandes deformações (por exemplo, a resistência ao cisalhamento).

Portanto, esforços têm sido feitos por muitos centros de pesquisa em torno do mundo, para desenvolver novas técnicas e equipamentos para realizar caracterização de solos marinhos.

Segundo Alves e Danziger (2008), a ideia de relacionar a penetração de objetos em queda às propriedades do solo não é recente. Desde o século XV muitos estudos teóricos e experimentais baseados em balística têm sido publicados sobre o assunto em questão. As aplicações foram diversas, variando de previsões de penetração de objetos como âncoras e artefatos militares, a caracterização de regiões de difícil acesso, tais como solos lunares, florestas e territórios marinhos. Esses estudos podem ser encontrados em Wang (1971) e Dayal e Allen (1973).

No fim da década de 1960, os artigos pioneiros que abordam um amostrador de gravidade são: Scott (1967); Scott (1970); Preslan (1970) sobre projéteis, Thompson e Colp (1970). Nesses artigos, o uso de acelerômetros é proposto para registrar o sinal de aceleração durante a queda livre, impacto e penetração dos objetos. Duas integrações em relação ao tempo resultam nas curvas de velocidade e deslocamento, respectivamente. Uma importante ferramenta das propostas é o uso do sinal de desaceleração, medido durante a penetração do projétil no solo marinho, para a estimativa da resistência do solo, pelo menos num nível qualitativo.

A figura 2-1 mostra um exemplo das curvas de aceleração, velocidade e deslocamento versus tempo, obtidos com um amostrador instrumentado de 6,5 m de comprimento, 7,3 cm de diâmetro externo, que foi solto de uma certa posição acima do solo marinho.

Alves (2019), ao analisar os resultados apresentados por Scott (1970), constatou que o gráfico de aceleração está invertido no tempo. Tal fato é justificado através das leituras de aceleração, que tiveram valores equivalentes ao da gravidade no caso das leituras entre 3 e 4 segundos. Dessa forma, o trecho em queda livre no fluido corresponde ao intervalo de tempo entre 2 e 4 segundos, e o trecho no qual houve penetração entre 0 e 2 segundos. Ou seja, a indicação fluido e solo está invertida. A curva velocidade versus tempo está igualmente invertida. Quanto ao deslocamento, faz sentido apenas se o deslocamento de referência (inicial) é de 24 m.

Depois da soltura, o projétil ganha velocidade sob influência da gravidade. Entretanto, enquanto o projétil se move na água, resistências hidrodinâmicas tomam lugar e a

aceleração diminui gradativamente. Se a queda livre continuasse indefinidamente, a aceleração reduziria para zero, e o projétil alcançaria sua velocidade terminal. No momento que o projétil toca o solo marinho, a aceleração, até agora negativa, desaparece rapidamente e se torna positiva (o projétil começa a desacelerar, sob a influência das forças resistivas mobilizadas na massa de solo). Depois de alcançar o seu valor máximo, sua velocidade diminui continuamente até sua parada, quando a penetração cessa.

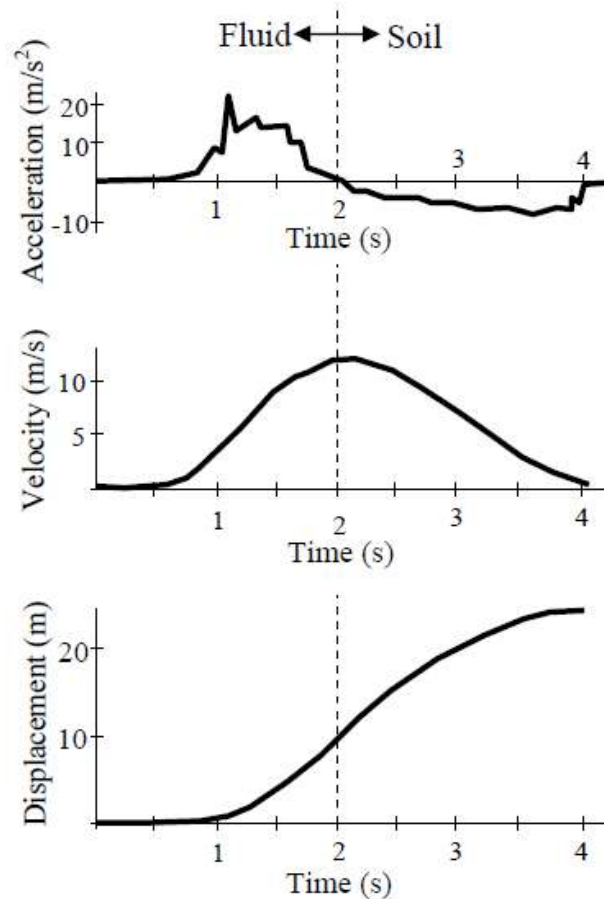


Figura 2-1– Exemplo de aceleração, velocidade e deslocamento versus tempo, (Scott, 1970, segundo Alves e Danziger, 2008)

O conhecimento disponível até aquele momento, em relação aos mecanismos de interação dinâmica entre o solo e o penetrômetro, sugeriam que o sinal de aceleração, somente, não seria o suficiente para uma estimativa razoável da resistência do solo. Pesquisando uma determinação direta do perfil de resistência do solo, Dayal e Allen (1973) propuseram o uso de um cone de penetração em queda livre, incorporando células de carga para medir resistência de ponta e atrito lateral (similar ao tradicional equipamento CPT), mas também equipado com acelerômetros.

A figura 2-2 mostra a representação do Cone de Impacto Marinho (ICPT- Impact Cone Penetrometer). As velocidades de impacto variavam de 4,6 m/s a 6,1 m/s, quando acionado 9 m acima do solo marinho.

Baseado nos resultados de vários ensaios usando o ICPT, Dayal e Allen (1973) fizeram os seguintes comentários:

- O penetrômetro continua a ganhar velocidade por um determinado tempo após o impacto com o solo marinho. Tal aceleração perdura até a mobilização da resistência do solo se tornar superior ao peso submerso do penetrômetro.
- O penetrômetro então começa a desacelerar, sob a resistência mobilizada do solo, até alcançar a profundidade de penetração máxima.
- A penetração inicial é seguida de um curto período de pequena amplitude, oscilações amortecidas, até que a sonda chega ao repouso definitivo.

Chari et al. (1981) e Dayal (1981) apresentam outras versões do ICPT e mais resultados e análises usando o penetrômetro.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, surgiu uma classe de instrumentos chamada Penetrômetros de Sedimentos Marinhos (MSP). O MSP foi projetado para ter um desempenho hidrodinâmico ideal durante a queda livre, e é composto de um corpo cilíndrico, uma ponta cônica e haletas para estabilidade direcional (similar a um foguete ou torpedo). A figura 2-3 mostra uma representação esquemática da segunda geração do MSP, onde Φ representa o diâmetro da sonda. O peso total do penetrômetro é 450 N e a velocidade máxima esperada durante o impacto é de 30 m/s. Dados do acelerômetro são transmitidos para um dispositivo gravador, por meio de um cabo que segue por trás do penetrômetro.

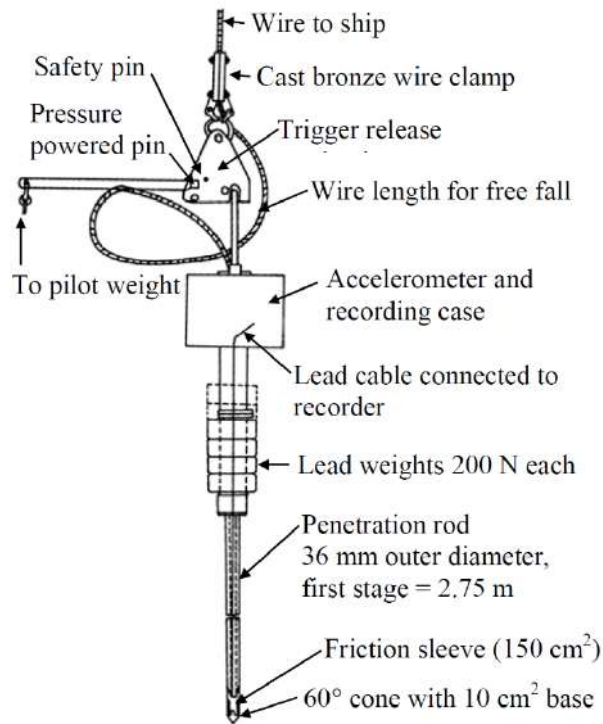


Figura 2-2- Representação do Cone de Impacto Marinho (ICPT- Impact Cone Penetrometer), (Dayal e Allen, 1973, segundo Alves e Danziger, 2008).

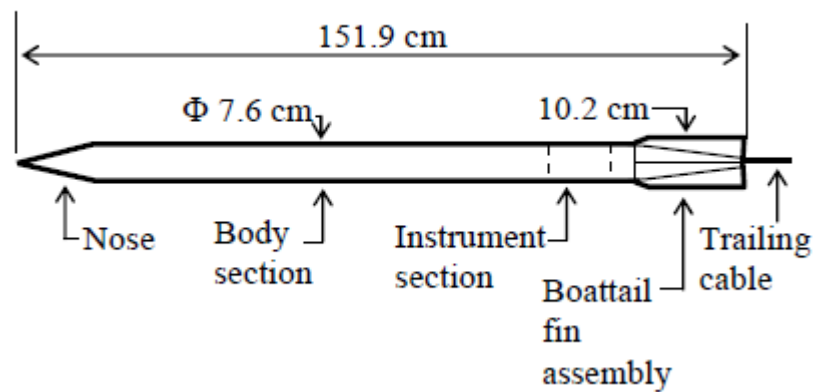


Figura 2-3 - Representação esquemática da segunda geração da MSP, (Colp e Caudle, 1975, segundo Alves e Danziger, 2008).

Segundo Alves e Danziger (2008), seguindo o projeto geral dos primeiros protótipos, vários tipos de penetrômetros instrumentados de queda livre têm sido feitos desde então. Uma série de sondas, genericamente chamadas de XBT (Expendable bottom penetrometers), foram desenvolvidas em muitos centros de pesquisa. Tais penetrômetros são equipados com um acelerômetro, e dados são transmitidos para um navio ou até mesmo para uma balsa com um radiotransmissor (permitindo o uso de um avião para obter as gravações). Como o nome sugere, a sonda não é recuperada depois do lançamento.

Akal e Stoll (1995) mostram resultados de laboratório e ensaios marinhos com o XBP, e sugerem duas análises independentes: a) o sinal de desaceleração, durante a penetração no solo marinho, que pode ser usado para uma estimativa da resistência do solo na ruptura (grandes deformações); b) as oscilações amortecidas após o início da penetração têm uma frequência que depende do módulo de cisalhamento dinâmico do sedimento (pequenas deformações).

A figura 2-4 mostra um modelo de um XBP (Aubeny e Shi, 2006). A sonda tem um peso total de 7 N, e alcança uma velocidade terminal de 7 m/s. A penetração máxima alcançada é de cerca de 25 cm. As desacelerações de pico tipicamente excedem 10 g, mesmo em depósitos de solo mole.

O então chamado “Expendable Doppler Penetrometer” (XDP) foi desenvolvido para uma caracterização do solo marinho em águas muito profundas. Ao invés de um acelerômetro, a sonda XDP é equipada com uma frequência constante de fonte sonora. Um receptor aquático de som (hidrofone) é montado no suporte da embarcação ou a alguma profundidade da superfície do mar, para evitar interferência das ondas do barco e da água. O movimento relativo do penetrômetro em relação ao receptor hidrofone, durante a queda livre e após o impacto com o solo marinho, causa uma mudança na frequência do sinal recebido, devido ao princípio Doppler. Essa mudança é proporcional à velocidade da sonda (Beard, 1981). Portanto, é possível determinar a curva velocidade versus tempo e então estimar a resistência do solo (Bowman et al., 1995).

De acordo com os tamanhos usualmente adotados (figura 2-5), o peso total de um XDP varia de 70 N a 1410 N, alcançando velocidades terminais de 6 m/s a 27 m/s. Penetrações

no solo marinho variam de 60 cm a 9 m, e altura de queda pode alcançar 6000 m. Freeman e Schuttenhelm (1990) relatam o uso mais intenso de XDPs, pesando aproximadamente 18 kN, com penetrações bem sucedidas de 58 m.

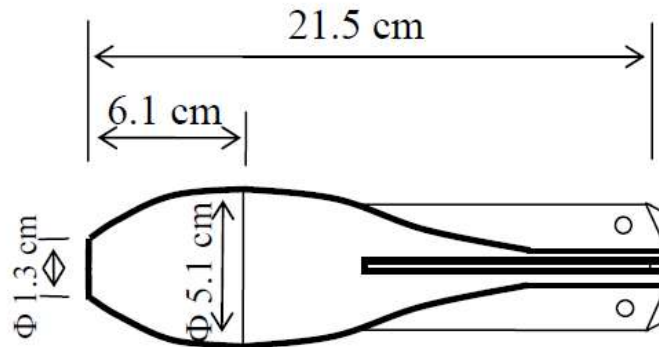


Figura 2-4- Modelo de um XBP, (Aubeny e Shi, 2006, segundo Alves e Danziger, 2008).

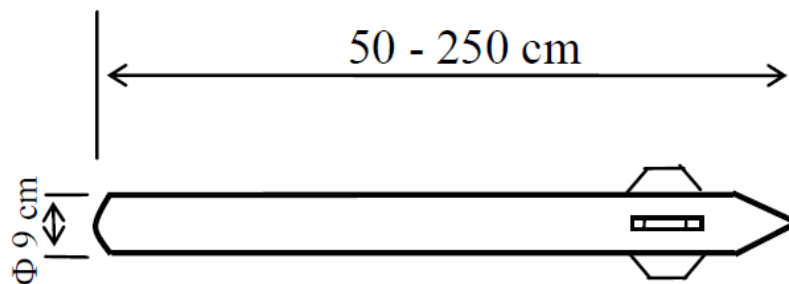


Figura 2-5- XDP (Thompson et al., 2002, segundo Alves e Danziger, 2008).

Os mesmos conceitos que deram origem aos ICPT na década de 70 levaram ao desenvolvimento de um tipo de equipamento conhecido como Penetrômetro de Cone de Queda Livre (FF-CPT). A figura 2-6 apresenta 2 diferentes exemplos de equipamento de FF-CPT recentemente desenvolvidos.

Como o piezocone (CPTU), o FF-CPT é equipado com células de carga para medir a resistência de ponta e o atrito lateral, bem como de transdutor de poro-pressão. Instrumentos adicionais podem ser incluídos, como inclinômetros, termômetros, sensores óticos (para detecção de camadas suspensas de argila mole), e acelerômetros. Um compartimento à prova d'água mantém o sistema de baterias e o sistema de aquisição de

dados. O FF-CPT é sempre recuperado por cabos depois do ensaio. Dados dos instrumentos são gravados por um sistema de aquisição de dados para análises posteriores.

O STING (Seabed terminal impact newton grandiometer) foi desenvolvido pelo departamento de defesa nacional canadense, com a colaboração técnica da A.G.O Environmental Electronics Ltd., que comercialmente fabrica o equipamento sob licença. A figura 2-7 mostra a sonda STING após a realização dos ensaios em 2005 no Rio grande, Brasil, em um depósito de argila muito mole.

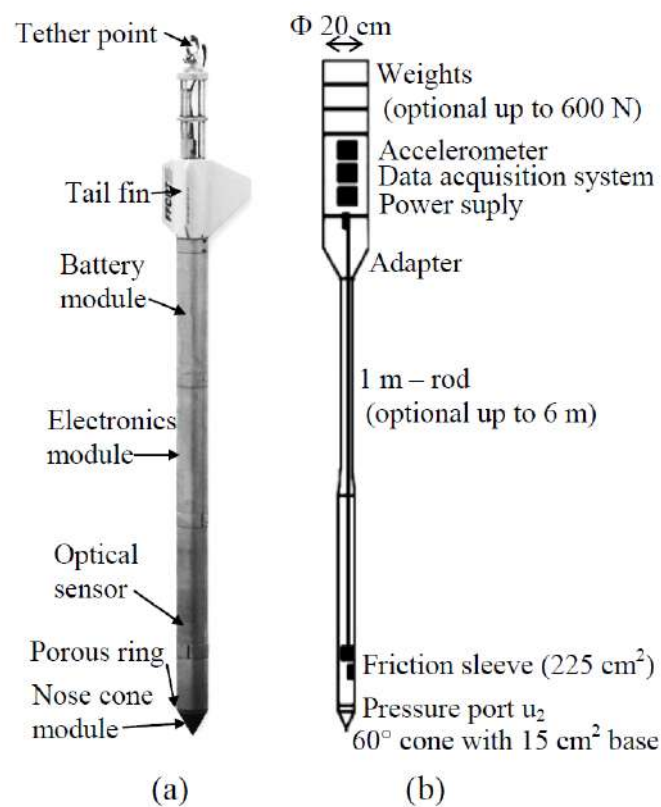


Figura 2-6 - Exemplos de FF-CPT: (a) Extraído de Osler et al., 2006; (b) extraído de Stegmann et al., 2006, segundo Alves e Danziger, 2008.

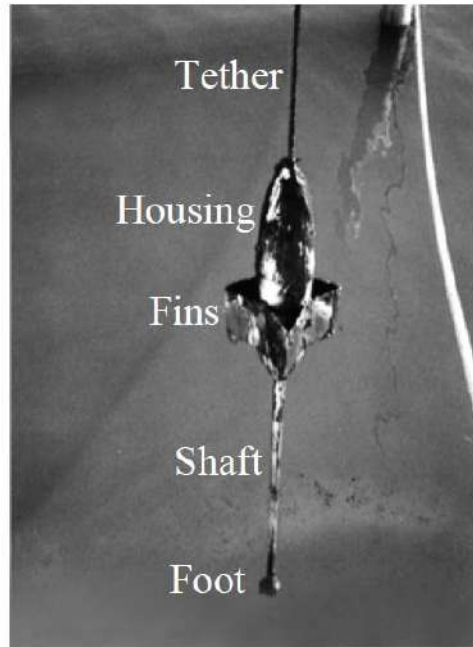


Figura 2-7 - Ensaio Sting em Rio Grande, Brasil (Alves e Danziger, 2008)

O dispositivo Sting é equipado com sensores – acelerômetros e transdutores de pressão – e o sistema de aquisição de dados. Essa câmara é anexada no fuste de 1 m de comprimento, que pode ser estendido para 3 m. Na ponta do conjunto uma base circular é instalada, com diâmetros variando de 25 mm a 70 mm, dependendo do tipo de sedimento a ser caracterizado. A sonda pesa cerca de 160 N, quando os 3 m de fuste são usados e neste caso pode penetrar cerca de 3 m no solo marinho. A altura de queda pode alcançar 300 m. Após a recuperação por meio de uma corrente fixada no sistema, os dados adquiridos são baixados em um computador para processamento.

Spooner et al. (2004) apresentam um outro tipo de penetrômetro de queda livre, com 5 cm de diâmetro externo e cerca de 30 cm de comprimento (figura 2-8). O sistema pesa aproximadamente 30 N e pode operar em profundidades superiores a 15 m. O invólucro acomoda um acelerômetro fixado a um fio condutor. Aletas estabilizantes previnem inclinação durante o movimento de queda na água.



Figura 2-8 - Penetrômetro com cabo de sistema de aquisição (Spooner et al., 2004, segundo Alves e Danziger, 2008)

2.2. Um caso recente da utilização de penetrômetros de queda livre para caracterização no Golfo do México - CPT Stinger – (Young et al., 2011)

Este é um caso particular de penetrômetro de queda livre utilizado como reação para posterior ensaio de piezocone estático em profundidade. O chamado CPT “stinger” (figura 2-9) foi usado para investigar as condições do solo em águas profundas no Golfo do México e posterior obtenção da resistência não drenada. A figura a seguir mostra o penetrômetro montado pronto para cravação em modo curto, com comprimento total de 11,6 m, ficando com um comprimento total de 23,3 m com as hastes do piezocone convencional estendidas. Já o conjunto para cravação em modo alongado possui comprimento total de 34,6 m e com as hastes recolhidas tem um comprimento total de 17,7 m. A penetração total no solo é a soma do trecho de queda livre somado a cravação sob velocidade constante, na qual são estendidas as hastes internas (Young et al., 2011).



Figura 2-9 - CPT-Stinger –. (Young et al. 2011)

Nesse mesmo local dos ensaios foram feitos ensaios geofísicos de alta resolução e amostras foram obtidas através do amostrador JPC (Jumbo Piston Core) que apresentaram excelente correlação com os dados contínuos geotécnicos e geofísicos utilizados para definir a variação espacial das propriedades do solo (figura 2-10).

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (2-1)$$

A resistência não drenada foi obtida utilizando a equação 2-1, adotando um N_{KT} de 17,5 como proposto por Young e Kach (2011). Vários estudos recentes mostraram que esse valor é razoável para a estimativa do resistência em argilas normalmente adensadas nas águas profundas do Golfo do México (Young et al., 2011).

A resistência de ponta no torpedo foi corrigida em 10,5% para cada 10 vezes de aumento na velocidade de cravação em relação à velocidade de cravação convencional (2 cm/s). O valor adotado na pesquisa ficou próximo ao valor de 10% indicado por Lunne et al. (1997) segundo Young et al. (2011).

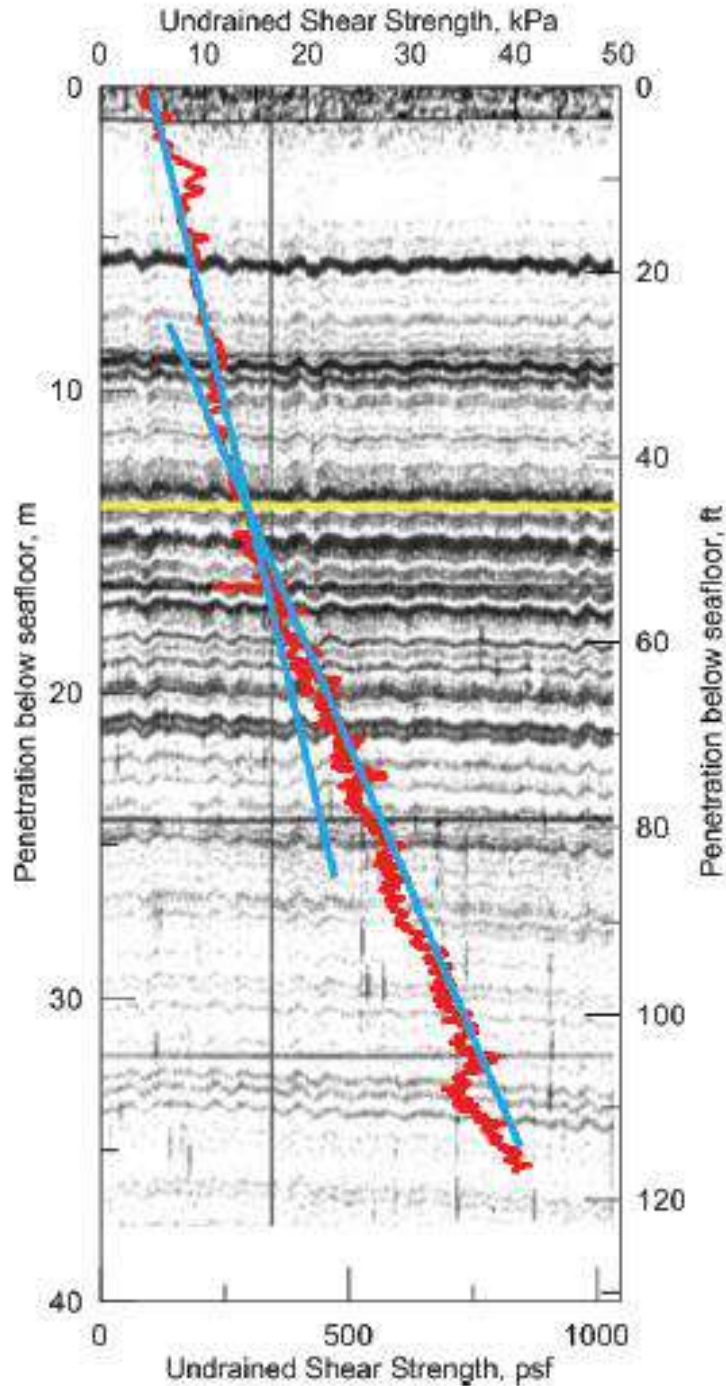


Figura 2-10 -Ensaio geofísicos comparados com os ensaios de CPTu (Young et al., 2011)

Segundo Young et al. (2011) o CPT stinger (figura 2-11) utiliza o mesmo conjunto de equipamentos do amostrador JPC. Mediante a simples substituição do pistão padrão por um sistema de CPT contendo as hastes, os operadores de campo podem rapidamente mudar o amostrador para o modo de ensaio de campo.



Figura 2-11 – Posicionamento do CPT stinger na popa da embarcação (Young et al., 2011)

Os resultados mostram que o novo sistema, assim como o CPTu convencional, fornece estratigrafia com sensibilidade de 5 centímetros e confiança na medida de profundidade. As figura 2-12, figura 2-13, figura 2-14 e figura 2-15 ilustram, o sistema de funcionamento, um resultado dos dados de aceleração e resistência de ponta obtidos, um perfil de resistência de ponta versus profundidade obtido a partir do CPTu em questão e finalmente uma comparação feita entre os valores de S_u obtidos a partir de 8 ensaios de CPTu e ensaios de laboratório, mostrando ótimo desempenho do penetrômetro de queda livre para a determinação de tais parâmetros.

A figura 2-13 mostra as leituras de aceleração e resistência de ponta. O eixo da esquerda representa os valores medidos de resistência de ponta em T_{sf} ($1T_{sf} = 95,7605 \text{ kPa}$), e o eixo da direita os valores medidos de aceleração (em m/s^2).

Algumas conclusões interessantes advêm da observação dos gráficos. A aceleração antes da soltura é diferente da aceleração de parada (repouso, aceleração medida aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$), o que significa que a primeira está sendo influenciada pela

movimentação antes do lançamento. Uma vez solto o penetrômetro, a aceleração vai imediatamente a zero, e ainda na água ocorre uma desaceleração, provavelmente em decorrência da ação do cabo de sustentação. A identificação do toque no solo não é percebida na curva aceleração versus tempo, apenas na curva resistência de ponta versus tempo. Uma brusca redução da aceleração não corresponde a uma brusca variação da resistência de ponta, e deve ser consequência da penetração no solo da parte do penetrômetro de maior seção. Essa questão é abordada mais adiante, para o caso dos ensaios apresentados na presente pesquisa.

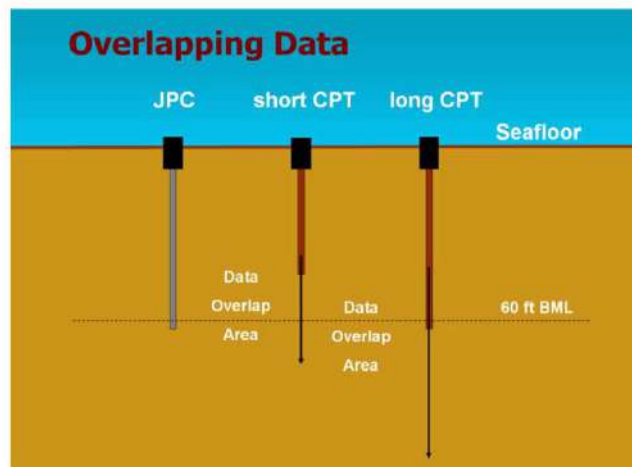


Figura 2-12 – Sistema de ensaio (Young et al., 2011)

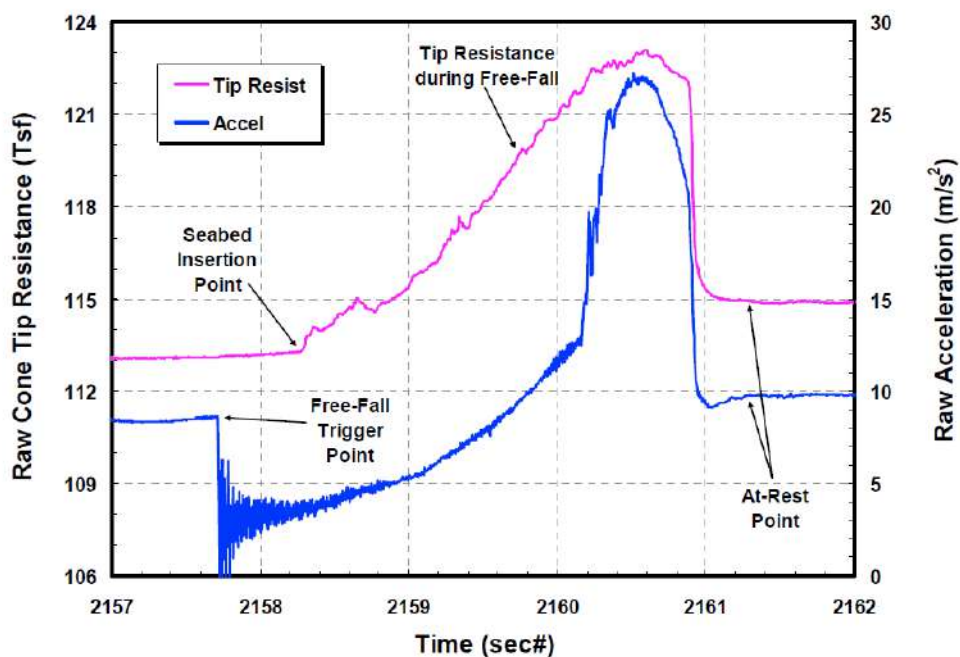


Figura 2-13 – Resistência de ponta e aceleração versus tempo obtida nos ensaios (Young et al., 2011)

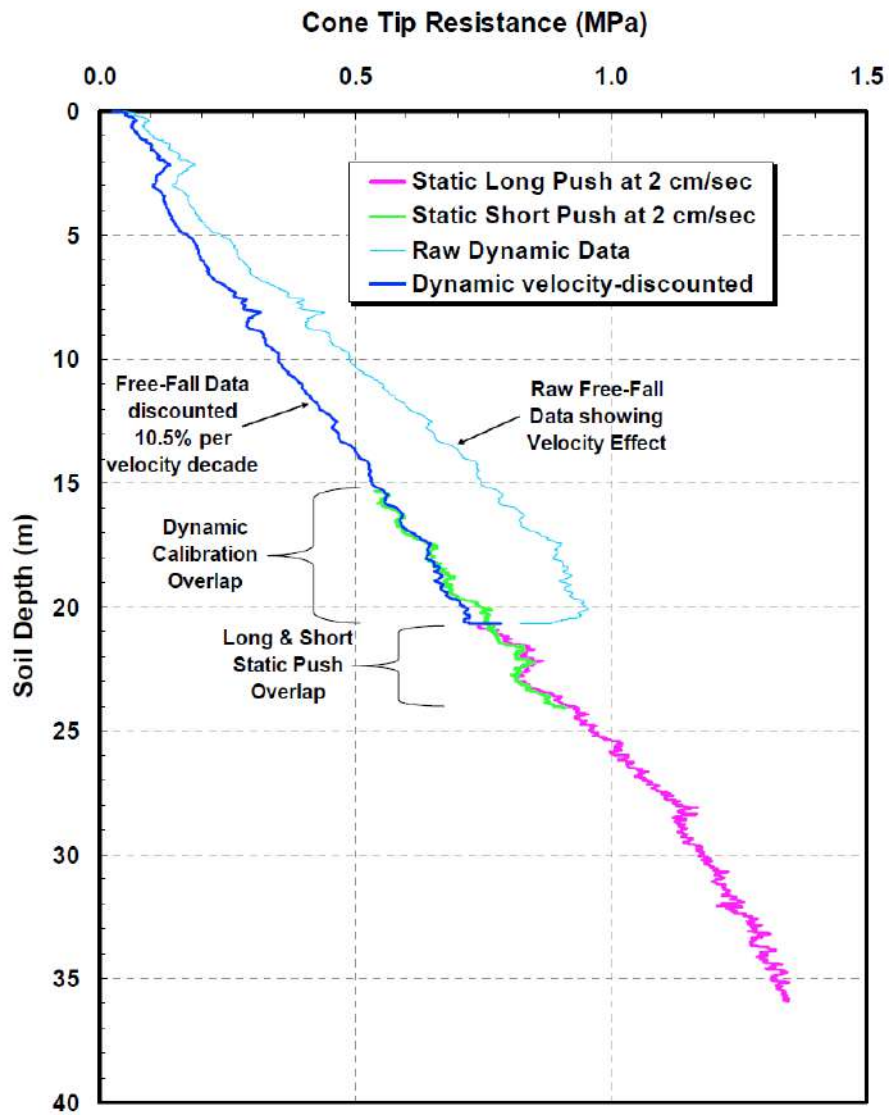


Figura 2-14 – Perfil de resistencia de ponta obtida pelo ensaios de CPT estático, dinâmico corrigido (efeito de velocidade), e dinâmico sem correção mostrando efeito de velocidade (Young et al., 2011)

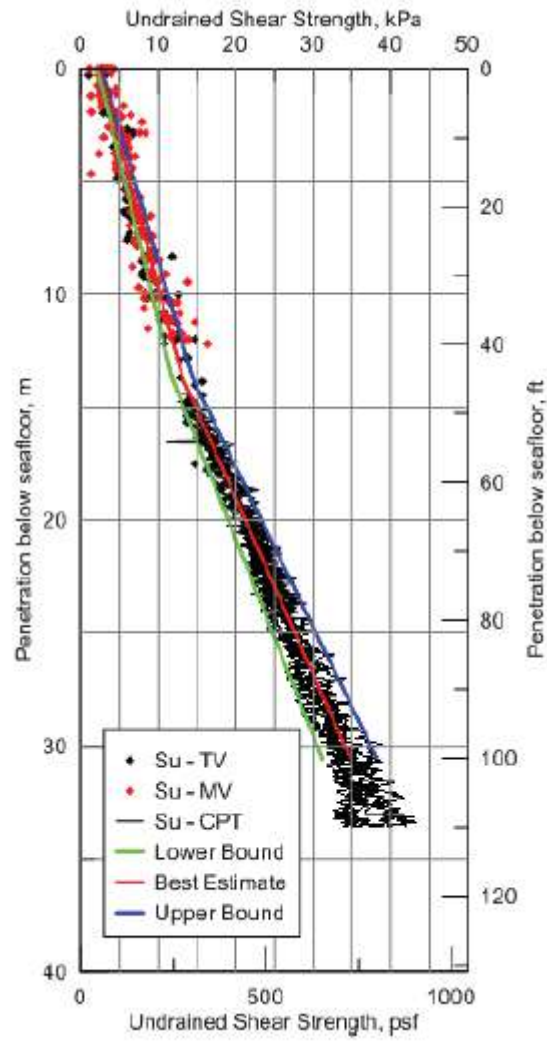


Figura 2-15 – Resistência ao cisalhamento não drenada de 8 ensaios CPTu comparados com ensaios de laboratório (Young et al. 2011)

2.3. Ensaios com Penetrômetros de queda livre no Ártico – (Stark et al., 2016)

O Ártico está constantemente sofrendo rápidas mudanças com relação à extensão do gelo e pergelissolo (tipo de solo encontrado no Ártico) em resposta às mudanças climáticas. O processo de degelo do pergelissolo diretamente impacta a estabilidade dos taludes, enquanto que o recuo do gelo marinho aumenta a chance de as ondas atingirem a costa, facilitando a erosão costeira.

Nessa pesquisa a expedição YUKON14 (nome dado com base no local das pesquisas, Ilha Herschel em Yukon) correlacionou os resultados do penetrômetro de queda livre (FFP – “free fall penetrometer”) com amostras e dados de sonar. Os objetivos do trabalho foram: (1) avaliar a performance de um penetrômetro de queda livre portátil para investigar as características dos sedimentos e processos erosivos e de transporte nos territórios costeiros do Ártico; (2) caracterização geotécnica e estratificação do solo superficial do leito marinho; (3) correlacionar assinaturas geotécnicas com condições geológicas e morfológicas. Segundo Starck et al. (2016), os resultados da pesquisa representam uma parte de um grande projeto que objetiva entender o processo de erosão e deposição na área costeira do Ártico em um contexto interdisciplinar.

O penetrômetro de queda livre portátil denominado “Bluedrop” ilustrado na figura 2-16 foi projetado para ensaios in situ de caracterização de áreas subaquáticas de difícil acesso, e para investigação dos processos erosivos e de deposição subaquáticos (Stark et al. 2016).



Figura 2-16 – Penetrômetro de queda livre portátil “Bluedrop” (Stark et al. 2016)

O FFP bluedrop é instrumentado com 5 sistemas (microeletromecanical systems – MEMS) medindo acelerações de até +/- 250 g (sendo g a aceleração gravitacional) com

acurácia de até $\pm 1,56 \times 10^{-5}$ g. Um acelerômetro de ± 55 g determina a inclinação da sonda. Um sensor de pressão fica na posição equivalente à u_2 do CPTu, podendo medir até 2MPa, com acurácia de $\pm 4,67 \times 10^{-4}$ kPa. Os dados são adquiridos com a frequência de 2kHz. O sensor foi utilizado para inferir a profundidade a partir da pressão, e também para avaliar a poro-pressão. A dissipação de poro-pressão foi testada apenas em 4 pontos em “Pauline cove” (figura 2-17).

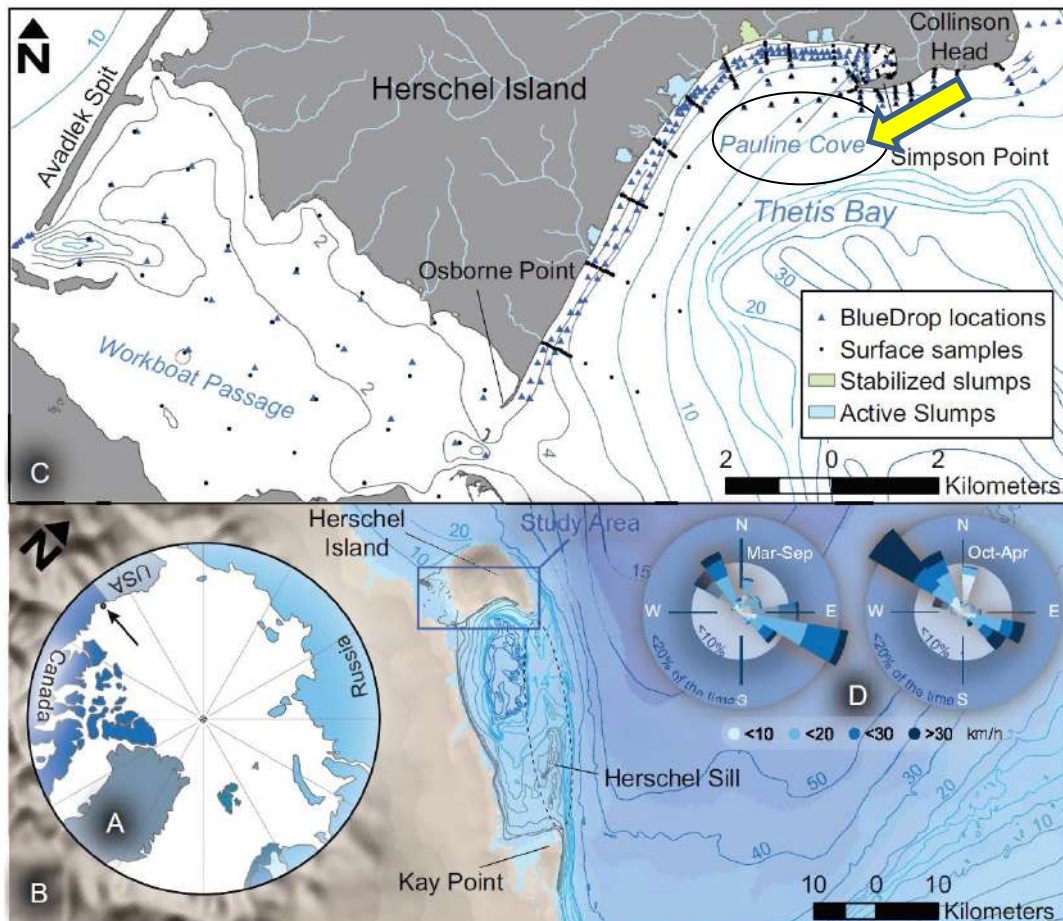


Figura 2-17 – Local dos ensaios no mar canadense de Beaufort (Stark et. al 2016)

Os resultados apresentados na figura 2-18 mostram a importância de se determinar as faixas de resposta esperadas em campo, permitindo assim que os sensores trabalhem dentro de sua especificação e com uma boa sensibilidade. Como pode ser visto na figura a seguir, o acelerômetro com 2 g de capacidade mostrou-se inadequado para a aquisição da aceleração durante a cravação. Processo equivalente ocorreu no projeto da presente pesquisa, sendo necessário, portanto, a troca do acelerômetro, como se verá adiante.

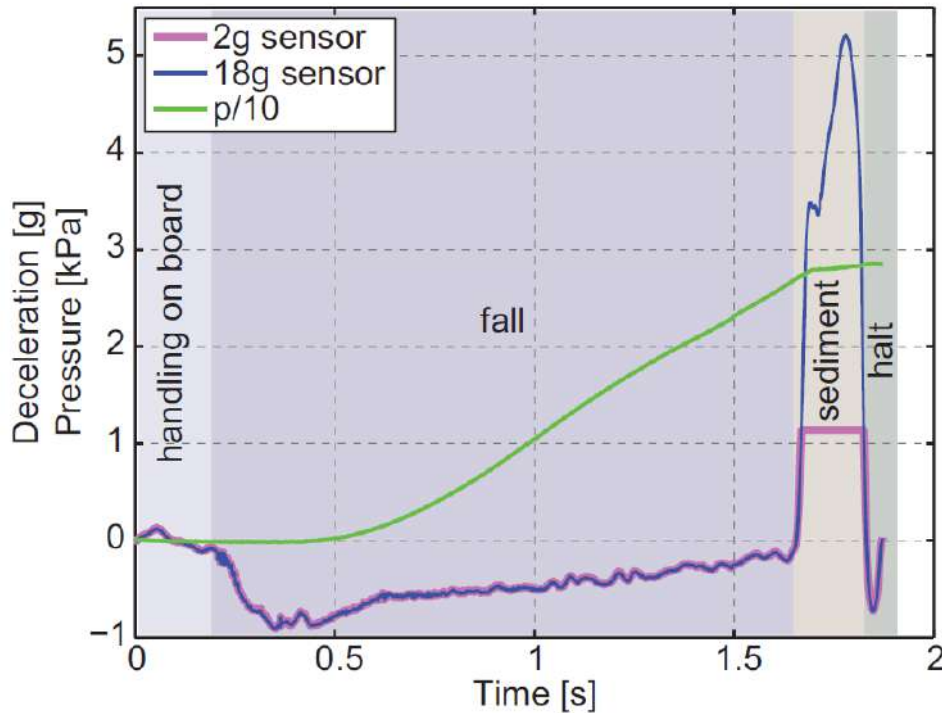


Figura 2-18 – Medidas de dois acelerômetros independentes com diferentes faixa de leitura e sensibilidade, e leituras de pressão. (Stark et. al 2016)

A partir da figura 2-18 observa-se também que a velocidade terminal ($a=0$) não foi atingida devido à pequena espessura de água (<3 m). O ponto de contato pode ser claramente identificado a partir da mudança brusca no gráfico de aceleração.

Os gráficos apresentados na Figura 2-19 mostram 2 casos localizados dentro de “Pauline cove” (WP 793 e WP 802) e 2 casos localizados em “Collinson Head” (WP 787 e WP 774) mostrando os diferentes tipos de solo encontrados e a limitação do equipamento quanto a cravabilidade, causada pelo pequena massa disponível. Para solos com baixa resistência é importante salientar que a determinação do ponto de toque ao solo se torna difícil, dada a pequena oscilação da aceleração gerada por tal solo. Sendo mais eficientes os penetrômetros instrumentados com sensores de ponta, atrito e poro-pressão. De modo qualitativo e para as intenções da pesquisa o FFP se mostrou capaz de executar as tarefas necessárias com a devida acurácia e capacidade de aquisição e tempo de autonomia da bateria.

As profundidades variaram de 0,5 a 11,4 m. Já as velocidades de impacto variaram de 3,5 a 7,3m/s. A inclinação durante o ensaio foi limitada à 8° , não sendo necessário portanto fazer correções nas leituras. (O’Loughlin et al. 2014 segundo Stark et al. 2016). 3 ensaios

ficaram demasiadamente inclinados, e foram eliminados das análises. Profundidades de penetração variaram de 0 até 98 cm, e com desacelerações máximas variando de 4,1g a valores além de 250g, onde os acelerômetros saturaram suas leituras. A capacidade de carga quasi-estática atingiu valores entre 13 e 2613 kPa, mostrando a variação de resistência do solo do leito marinho, permitindo diferenciar o tipo de comportamento de cada ponto. Para o ensaio WP 774 não foram apresentados os dados de poro-pressão pois a profundidade penetrada não foi suficiente para a entrada do sensor no solo. Já no ensaio denominado WP 802 houve problemas com bolhas de ar, o que dificultou o tratamento dos dados.

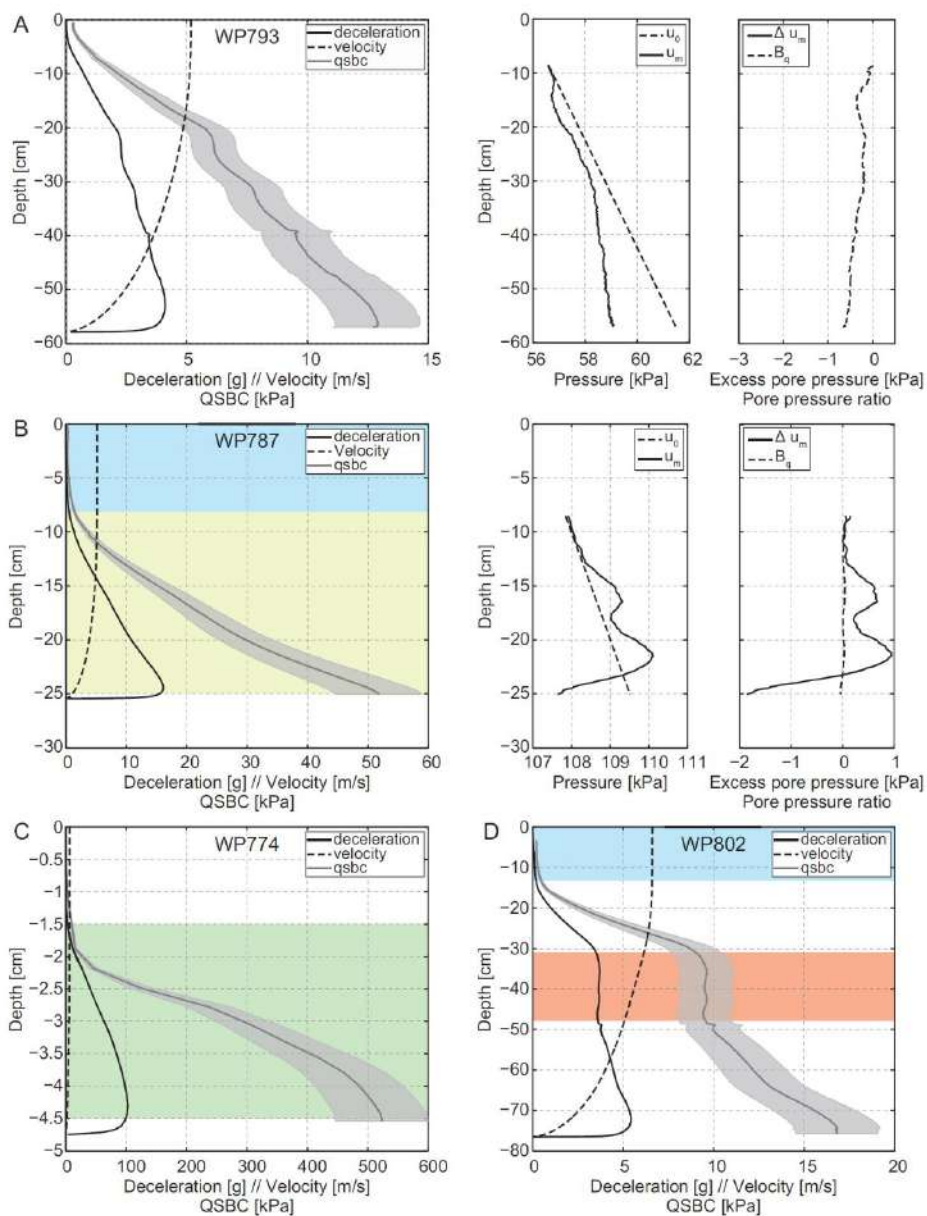


Figura 2-19 - Resultado dos ensaios realizados em 4 pontos

2.4. Ensaios com Penetrômetros de queda livre em centrífuga – (Chow et al., 2017)

O penetrômetro de queda livre utilizado nesse caso foi um modelo reduzido, com uma ponta convencional de 60° e diâmetro de 10 mm, peso de 29 g e comprimento total de 120 mm (figura 2-20). O mesmo piezocone foi utilizado também para os ensaios estáticos (prensados), acoplados a um atuador estático.

O modelo FFP (free fall penetrometer) é instrumentado com células de carga na ponta e atrito, e seu transdutor de poro-pressão fica localizado na posição equivalente a u_2 . O elemento poroso do transdutor de poro-pressão tem 1,3 mm de espessura em formato de anel, fabricado com polietileno. A dimensão dos poros utilizada foi 35 micras, e os diâmetros interno e externo eram respectivamente 8 e 10mm.

A instrumentação do FFP contou também com a utilização de um acelerômetro de único eixo (O’Loughlin et al, 2014 segundo Chow et al., 2017). Os cabos dos sensores tiveram sua saída no topo, tendo um aspecto e efeito similar a corrente de recuperação de um FFP em escala real (figura 2-21).

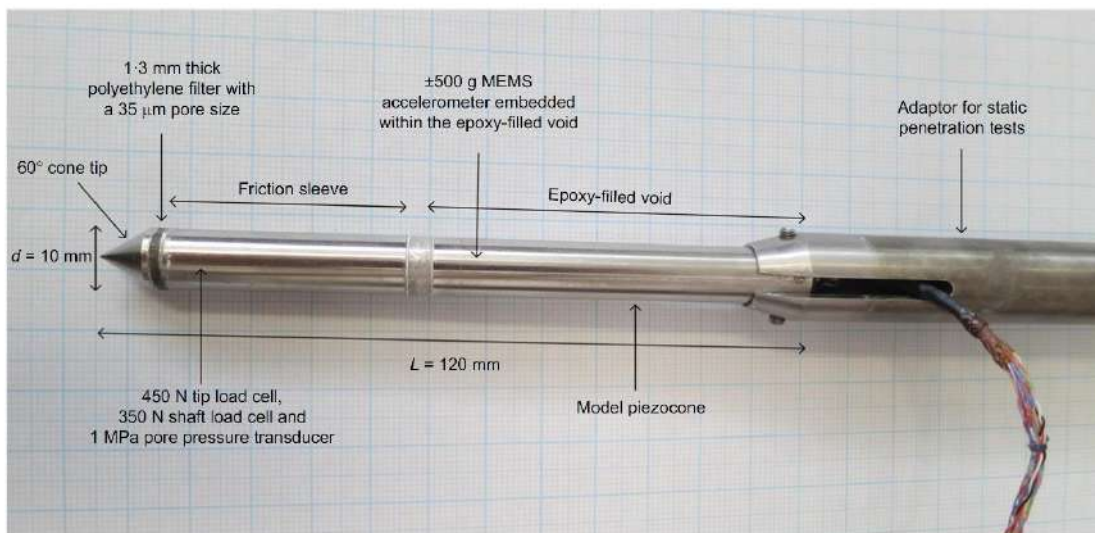


Figura 2-20 - FFP utilizado com adaptador acoplado para ensaio de penetração estática (Chow et al. 2017).

Segundo os autores os limites de liquidez e plasticidade para o kaolin utilizado foram respectivamente 61% e 27%. As velocidades utilizadas nos ensaios de centrífuga partiram de 0,001m/s até 0,1m/s no modo estático (prensado), e de 0,57 a 10,43m/s nos ensaios de FFP.

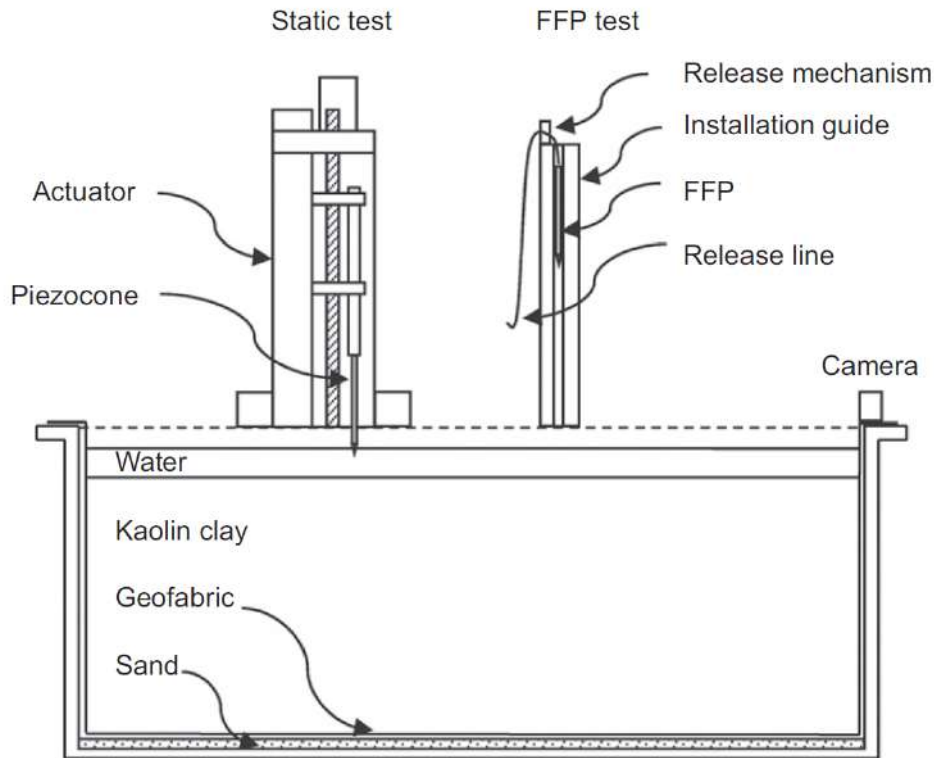


Figura 2-21 – Layout em centrífuga para ensaios de FFP e penetrômetros estático (Chow et al. 2017).

A figura 2-22 apresenta os valores de resistência de ponta obtidos a partir dos ensaios de piezocone com velocidade controlada e em queda livre. O efeito de velocidade fica nítido, e uma análise com base nas equações do Randolph (1990) é feita, de modo a determinar os parâmetros necessários para a compatibilização da resposta estática e dinâmica, assunto esse que será melhor detalhado no capítulo seguinte, onde serão abordados alguns métodos para verificar o efeito da velocidade de cravação na resistência oferecida pelo solo. Resultados utilizando a metodologia de estimativa da resistência não drenada a partir da medida direta da resistência de ponta também mostraram a importância da correção da resistência de ponta deduzindo do valor q_c a influência do arraste (q_d), utilizando o coeficiente C_d indicado por O’Loughlin et al (2013) (segundo Chow et al, 2017) de 0,22. A figura 2-23 mostra o perfil de resistência não drenada obtido na pesquisa utilizando a correção da resistência de ponta com base na estimativa da tensão de arraste e do valor $\beta_{\text{ponta}}=0,06$ (usado para determinar $R_{f,\text{tip}}$) calibrado com base nos ensaios com diferentes velocidades de cravação.

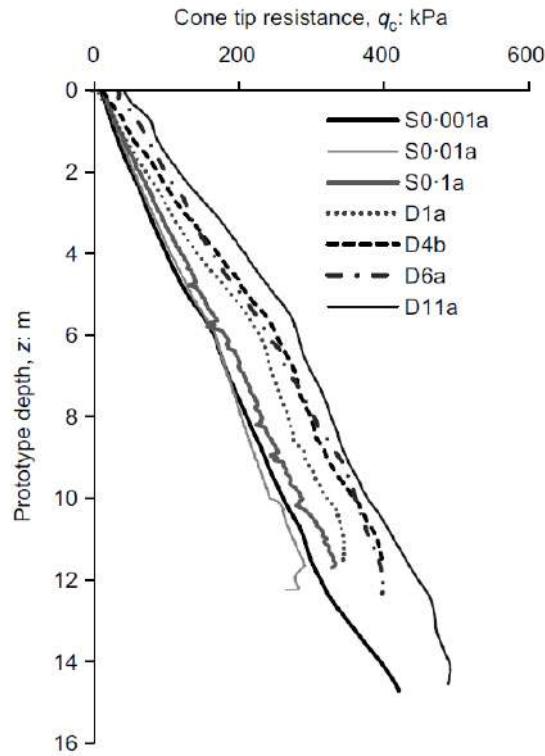


Figura 2-22 – Resultados de resistência de ponta obtido com ensaios estáticos (S0,001 S0,01 e S0,1) e 4 ensaios de FFP (D1a D4b D6a e D11a) (Chow et al. 2017).

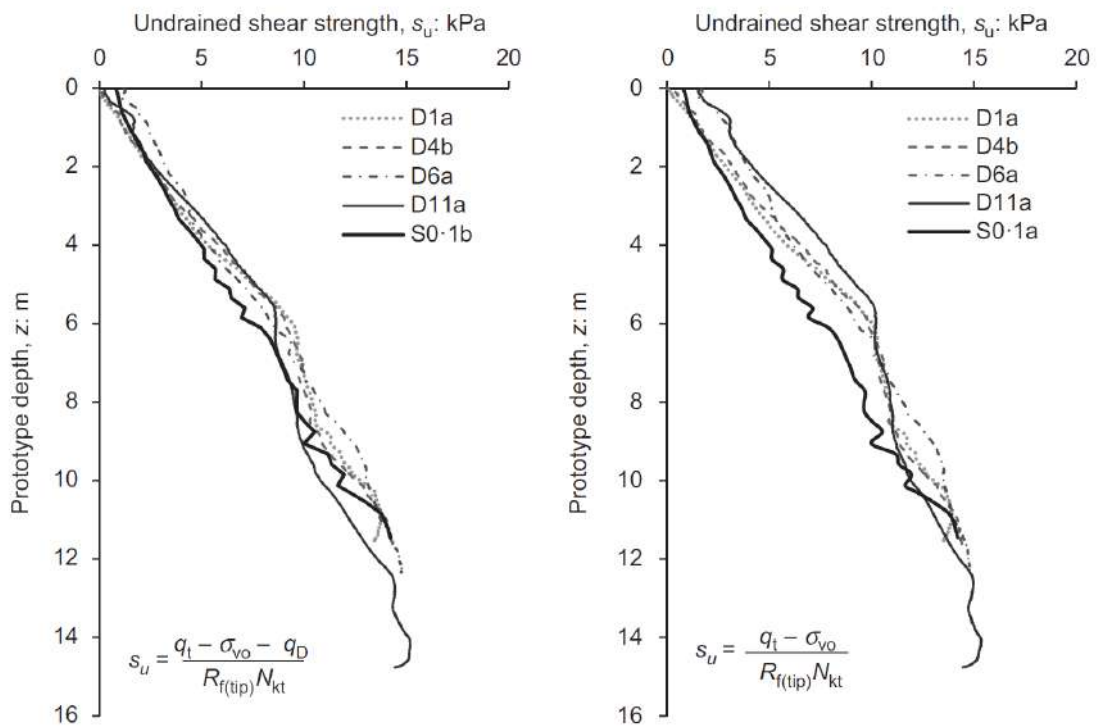


Figura 2-23 – s_u obtido utilizando o método da célula de carga da ponta ($\beta_{ponta}=0,06$): (a) com correção do arraste (b) sem correção do arraste (Chow et al. 2017).

3. Um estudo sobre a influência da viscosidade na resistência das argilas e uma análise dos dados do CPTU torpedo em centrífuga

De acordo com Taylor (1948) todos os materiais viscosos e plásticos apresentam uma resistência ao cisalhamento que varia com a velocidade em que a deformação de cisalhamento ocorre. A figura 3-1 mostra a resistência à compressão de uma argila amolgada azul de Boston (Boston blue clay), com um determinado teor de umidade, sob várias velocidades de compressão axial.

Ainda de acordo com Taylor (1948), foram obtidos dados que indicam que a resistência a qualquer velocidade de cisalhamento em uma argila é aproximadamente proporcional à tensão efetiva. Assim, admitindo que a resistência depende somente da tensão efetiva e da velocidade de cisalhamento, a equação da resistência ao cisalhamento pode ser obtida pela expressão 3-1.

$$s = (\bar{\sigma}_{ff} + p_i) \left[\tan \varphi + f \left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} \right) \right] \quad (3-1)$$

Onde

$\bar{\sigma}_{ff}$ = tensão efetiva normal ao plano de ruptura

p_i = tensão intrínseca, associada à coesão, por sua vez relacionada à tensão de sobreadensamento

φ = ângulo de atrito

ε_s = deformação de cisalhamento

$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t}$ = velocidade da deformação cisalhante

A função da velocidade da deformação cisalhante que aparece nessa equação pode ser obtida a partir de dados similares aos mostrados na figura 3-1 (Taylor, 1948).

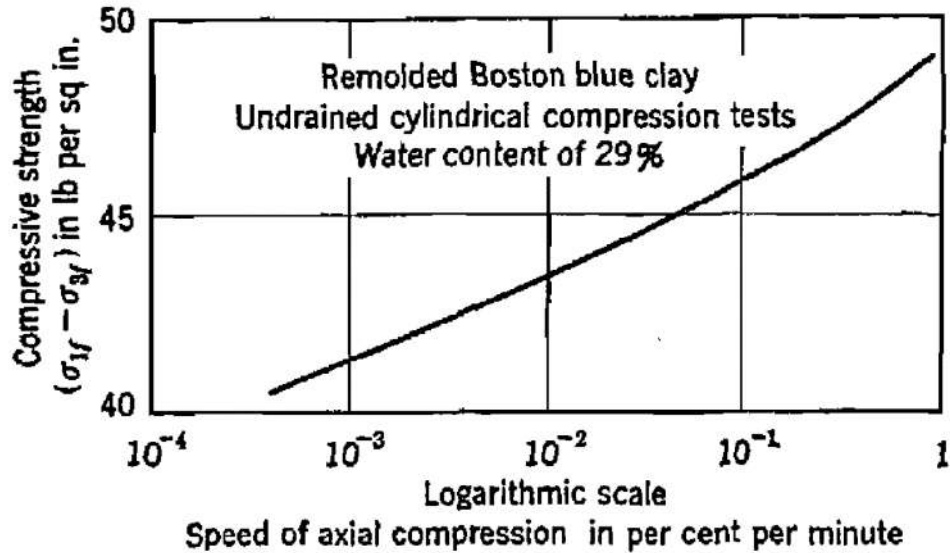


Figura 3-1 – Efeito da velocidade de cisalhamento em ensaio de compressão em argila (Taylor, 1948)

Sabe-se que esse efeito destacado por Taylor em 1948 é proveniente da água adsorvida nos grãos de argila, essa água tem propriedades diferentes da água livre nos vazios do solo, tendo uma viscosidade tão maior quanto mais próximos estão os grãos, como pode ser observado no gráfico a seguir, apresentado por Martins (1992) em sua tese de doutorado. Essa água adsorvida, por apresentar um alto coeficiente de viscosidade (μ), pode suportar tensões cisalhantes importantes, ao contrário da água em seu estado líquido livre para circular nos vazios do solo (figura 3-2).

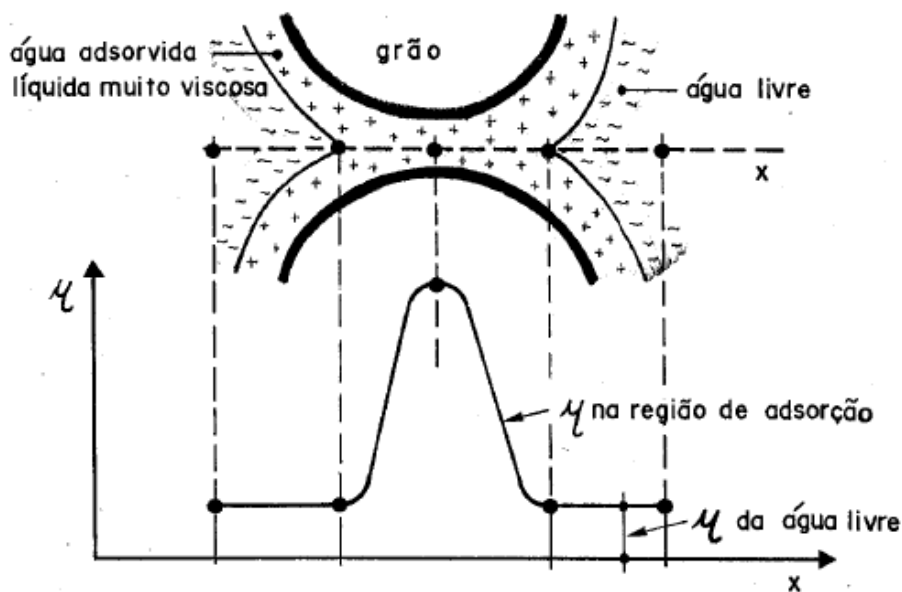


Figura 3-2 – Possível variação de μ ao longo de um “contato” feito por água adsorvida líquida muito viscosa (Martins 1992)

Segundo Alves (2004) a viscosidade da água no solo pode ter então duas funções na interação dinâmica entre estaca e o solo, mas que também pode ser aplicado a interação FFP e solo para a presente pesquisa: (1) No caso da cravação de estacas, a existência de vínculos viscosos nos grãos causa um tipo de amortecimento material (ou histerético) no solo. Pelas propriedades mecânicas da água adsorvida, este amortecimento material será dependente da frequência de excitação do solo. Este efeito tem importância principalmente na fase anterior à ruptura. (2) A viscosidade tem influência no valor da máxima tensão cisalhante suportável na interface estaca-solo ou para o caso da presente pesquisa na interface piezocone torpedo-solo. A existência de vínculos viscosos no solo, nesse caso, provocará uma parcela de resistência ao cisalhamento proporcional a velocidade de deformação cisalhante na interface. Esta parcela se soma à parcela de resistência por atrito (função apenas da deformação cisalhante), fazendo crescer, portanto a resistência última à ruptura. Este efeito terá maior importância durante e após a ruptura no caso de estacas, e aplicando o mesmo conceito, durante a cravação do piezocone torpedo nas leituras de resistência de ponta e atrito lateral.

Segundo Dayal et al (1973) a questão da sensibilidade da taxa de deformação na resistência ao cisalhamento do solo surge sempre que estruturas no solo são carregadas ou deslocadas repentinamente. Taylor (1948), Casagrande e Shannon (1949), e Whitman (1957) descobriram que a resistência da argila aumenta sob carregamento dinâmico, enquanto apenas um pequeno ganho foi observado em areias. Hampton e Yoder (1958) também demonstraram um aumento significativo da resistência de solo argiloso em um ensaio rápido, esse aumento é de até 160% em amostras pouco compactadas. Os experimentos em areias de Witman and Healy (1962) mostraram que o valor do ângulo de atrito interno muda cerca de 2-3% sob uma velocidade de carregamento de até 254cm/s. Schimming et al. (1966) chegaram a mesma conclusão, afirmando que “efeitos dinâmicos são mínimos” para solos não coesivos.

Baseados nos resultados experimentais de Casagrande e Wilson (1951), Crawford (1959), Osterberg e Perloff (1960), e de seus próprios resultados, Peck (1962) indica que como uma primeira aproximação, a mudança na resistência do solo para muitas argilas, e solos argilosos pode ser representada pela seguinte equação empírica 3-2 :

$$\frac{S_d - S_s}{S_s} = 0,10 \log_{10} \frac{\alpha_d}{\alpha_s} \quad (3-2)$$

Onde S_d é a resistência ao cisalhamento dinâmica na velocidade de deformação α_d e, S_s a resistência ao cisalhamento estática na velocidade de deformação α_s .

O efeito viscoso no comportamento dos solos também tem sido amplamente estudado pelo professor Ian Schumann da COPPE/UFRJ. Em sua tese de doutorado, com o objetivo de apresentar um modelo geral para comportamento de solos moles saturados que explicasse os principais fenômenos observados nesse solo, considerou os efeitos da velocidade, a fluência ou “creep” e a relaxação explicando estes fenômenos com base na viscosidade.

Segundo Martins (1992), sendo a viscosidade um fenômeno que deve se manifestar de forma mais acentuada quanto mais plástico for o solo, deve-se esperar que haja uma relação direta entre o índice de plasticidade do solo e os valores da função que determinam a correlação entre a velocidade de deformação do solo e sua resistência ao cisalhamento. No subcapítulo seguinte será feito um resumo dos principais comportamentos destacados por Martins em 1992.

3.1. A tese de Martins (1992) – O Comportamento viscoso dos solos sob carregamento quasi-estático

Como dito anteriormente a influência da viscosidade no comportamento mecânico dos solos vem sendo estudada por anos na COPPE/UFRJ a partir de ensaios executados no laboratório de reologia do professor Ian Martins. De acordo com Alves (2004), apesar deste modelo, a princípio, não abordar carregamentos dinâmicos (onde as acelerações são importantes), o modelo contribui muito para o entendimento qualitativo dos efeitos viscosos no solo.

Martins (1992), em sua tese de doutorado, baseado em ideias de Taylor, nas quais a resistência ao cisalhamento dos solos é composta de duas parcelas – atrito, função da deformação, e viscosidade, função da velocidade de deformação - aborda os fenômenos dependentes do tempo nos solos. Martins enuncia o princípio das tensões expandido, o qual é composto de duas partes:

1ª parte: “Em qualquer plano de um elemento do solo saturado no qual estejam atuando a tensão normal σ e a tensão cisalhante τ , estarão atuando internamente: como reação à σ a soma ($\sigma'+u$), sendo σ' a tensão normal efetiva e u a poro-pressão; e como reação à τ a soma das resistências por atrito e por viscosidade”.

Matematicamente pode ser expresso pelas seguintes equações 3-3 e 3-4:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3-3)$$

$$\tau = \sigma' \tan \theta_{mob} + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (3-4)$$

2ª parte: “Toda vez que houver variação da parcela de atrito mobilizado haverá deformações cisalhantes e reciprocamente toda vez que houver deformações cisalhantes haverá variação da parcela de atrito mobilizado (casos não drenados).

Com base no princípio anteriormente citado, o círculo de Mohr, o qual apresenta as tensões no interior da massa de solo, é composto, portanto de duas parcelas: uma devido à resistência puramente por atrito (τ_f) e a outra devido à resistência ao cisalhamento por viscosidade (τ_v).

Martins (1992) demonstrou que como decorrência do princípio das tensões efetivas expandido (1ª parte) conclui-se que as ordenadas do círculo de Mohr das tensões efetivas representam, em cada plano, a soma das tensões cisalhantes de atrito e de viscosidade, que se analisadas de forma individual, tem cada uma o formato de uma elipse. Sendo a elipse da viscosidade batizada por Martins de elipse de Taylor (figura 3-3), e a elipse referente ao atrito também batizada de elipse de Coulomb (figura 3-4).

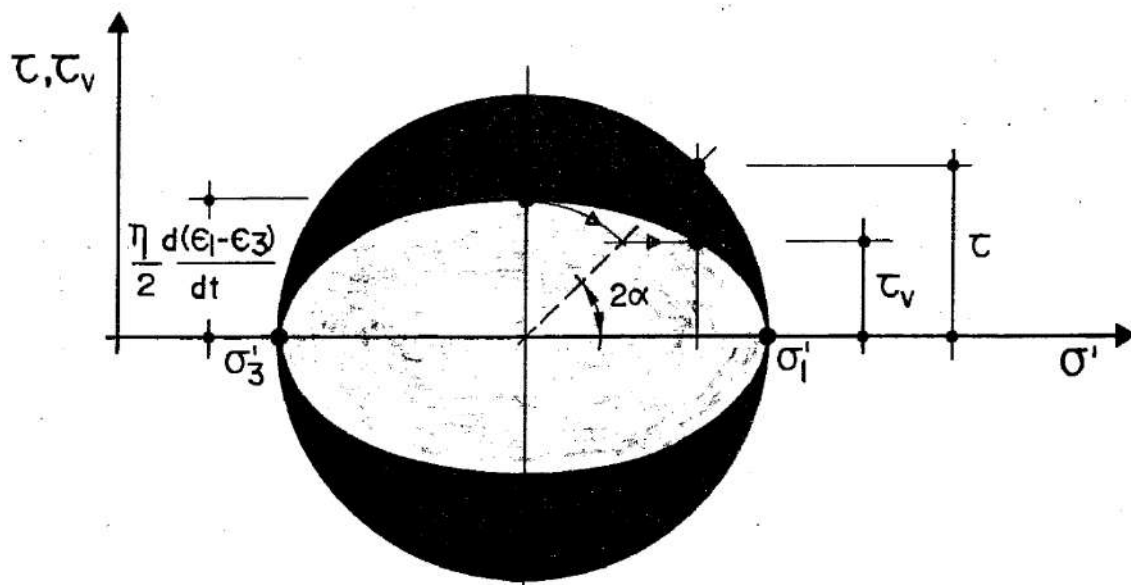


Figura 3-3 - O círculo de Mohr e a Elipse de Taylor (Martins, 1992)

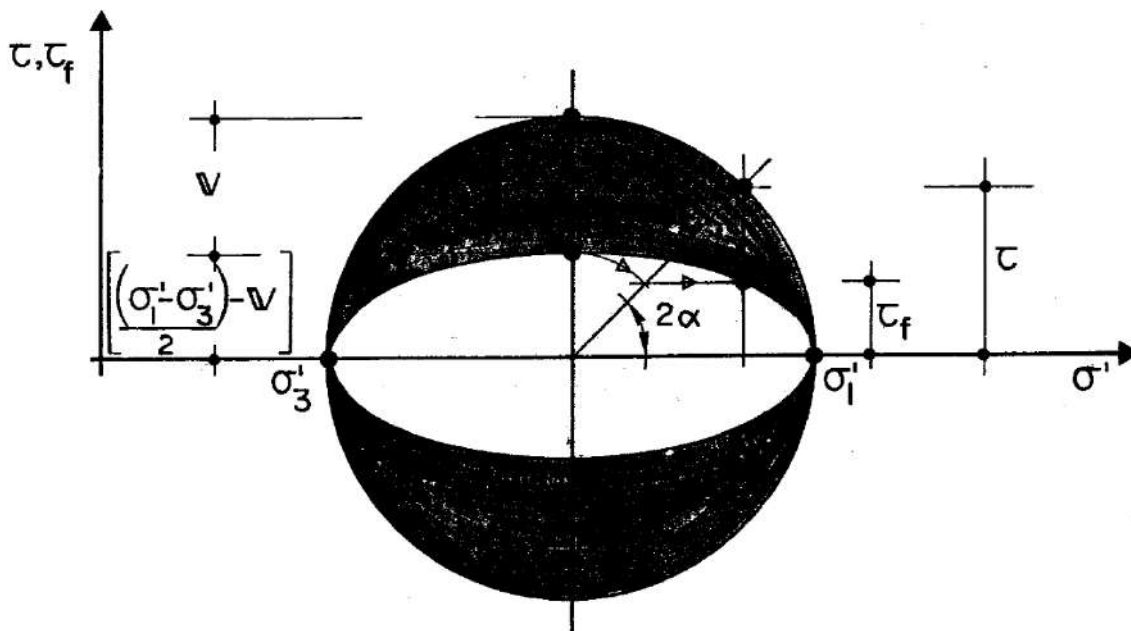


Figura 3-4 - O círculo de Mohr e a Elipse de Coulomb (Martins, 1992)

Martins (1992) ressalta ainda que como é o círculo de Mohr quem somente satisfaz às condições de equilíbrio estático, a elipse de Taylor e a elipse de Coulomb não podem, isoladamente, representar um estado de tensões. Caso as tensões cisalhantes de atrito

sejam nulas isto significa que a elipse de Taylor se degenera no círculo de Mohr. De forma análoga quando as tensões cisalhantes por viscosidade forem nulas a elipse de Coulomb se confunde com o círculo de Mohr.

A partir das ideias apresentadas por Martins é possível explicar o efeito da velocidade, o “creep” e a relaxação de tensões. Em seu trabalho apresenta os caminhos hipotéticos de tensões efetivas normalizados e linhas de mesmo atrito mobilizado. Fica clara a ligação, ao menos qualitativa, dos fenômenos levantados por ele em relação à velocidade de deformação nos ensaios não drenados com os resultados de piezocone torpedo obtidos na literatura e com os ensaios da presente pesquisa. Isso posto, apresenta-se a seguir o gráfico normalizado, figura 3-5, apresentado por Martins em sua tese de doutorado indicando os caminhos de tensões efetivas possíveis para diferentes velocidades de ensaios, ou ainda para ensaio de “creep”, sob tensão desviadora constante, passando pelos pontos B, C, D, E e F.

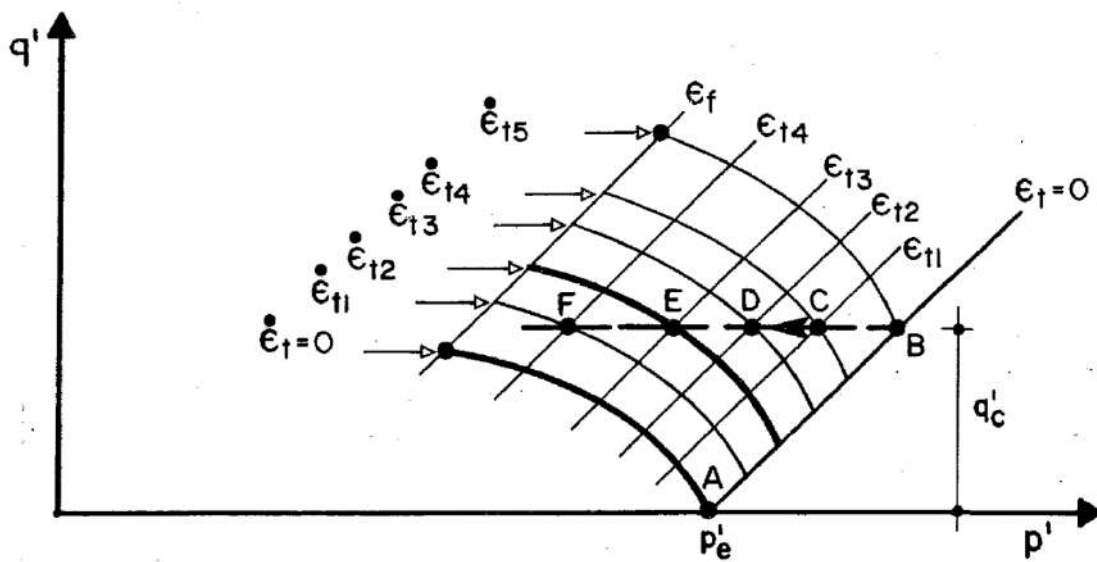


Figura 3-5 – Caminhos de tensões efetivas normalizados e linhas de mesmo atrito mobilizado (Martins, 1992)

Para a avaliação da aplicação de seu modelo para explicação dos fenômenos observados, Martins usou os ensaios de Lacerda (1976) para a verificação dos diversos pontos do seu modelo, que se mostraram em concordância. (Alves 2004)

A continuação das pesquisas pelo grupo de reologia da COPPE/UFRJ tem mostrado boa concordância entre o modelo e os resultados de ensaios de laboratório. (Guimarães,2000 segundo Alves (2004). Porém, diferentemente do imaginado por Martins a parcela dependente da velocidade parece não ser linear, mas conter um expoente como na equação 3-5 (Alexandre, 2000 segundo Alves, 2004).

$$\tau = \tau_f + \tau_v = \sigma' \tan \theta_{mob} + \eta \frac{d\gamma}{dt}^\beta \quad (3-5)$$

Onde:

τ_f = tensão resistente da parcela de atrito

τ_v = tensão resistente da parcela viscosa

θ_{mob} = ângulo de atrito mobilizado

σ' = tensão efetiva no plano de ruptura

η, β = Fatores de viscosidade

$\frac{d\gamma}{dt}$ = taxa de deformação

3.2. Comportamento dinâmico durante a cravação do torpedo – Proposta para interação dinâmica estaca-solo de Randolph (1990)

Randolph possui trabalhos sobre a interação dinâmica entre estaca e solo. Em seu trabalho original, os autores não consideravam a influência da viscosidade do solo na interação pós deslizamento da estaca. Para complementar o modelo, Randolph em 1990 propõe então utilizar uma equação empírica 3-6 para simulação da tensão viscosa na interface:

$$\tau_v = \tau_s \alpha \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^\beta \quad (3-6)$$

Onde:

τ_s - tensão cisalhante estática

Δv - velocidade relativa de deslizamento entre estaca e solo

v_0 - velocidade de referência, necessária para “adimensionalizar” a relação (por conveniência, tomada como 1 m/s)

α, β - fatores de viscosidade

Sendo a tensão viscosa determinada a partir da tensão cisalhante estática, a equação da tensão final oferecida fica da seguinte maneira (equação 3-7) :

$$\tau_u = \tau_s \left[1 + \alpha \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^\beta \right] \quad (3-7)$$

Segundo Alves (2004) tal relação empírica é justificada por observações experimentais (por exemplo, Gibson e Coyle, 1968, Litkouhi e Poskitt, 1980), que mostram a dependência da tensão cisalhante na interface com a velocidade da estaca.

3.3. Tratamento dos dados de penetrômetros de queda livre considerando o efeito da velocidade com base no artigo de Randolph et. al (2018)

Segundo Randolph et al (2018), o objetivo principal de um ensaio de penetrômetro de queda livre em solos moles é determinar a resistência não drenada. Tal determinação deveria ser feita através da resistência de ponta de uma maneira convencional, assim como é feito a partir do CPT estático, mas com o devido cuidado com as altas velocidades de deformação resultantes da alta velocidade de penetração. Idealmente, os penetrômetros de queda livre deveriam medir a resistência de ponta diretamente, entretanto, para os penetrômetros que não possuem célula de carga na ponta, a estimativa de resistência de ponta envolve inúmeras etapas e incertezas. Nesses casos, a resistência de ponta é determinada a partir da equação 3-8 a seguir (True 1976, Rocker 1985, O'Loughlin et al. 2004, Chow et al.2017, segundo Randolph et al. 2018).

$$q_{t,FFP} = \frac{W_b - mv \left(\frac{dv}{dz} \right) - Q_s - F_D - F_b}{A_{tip}} \quad (3-8)$$

sendo

v = velocidade do penetrômetro

z = penetração

$$v \left(\frac{dv}{dz} \right) = \left(\frac{dz}{dt} \right) \left(\frac{dv}{dz} \right) = \left(\frac{dv}{dt} \right) = a$$

W_b = peso submerso do penetrômetro na água

Q_s = resistência lateral ao longo do fuste

F_D = resistência ao arraste (devida à inércia do solo)

F_b = força devida ao empuxo igual ao peso efetivo do solo deslocado

A_{tip} = área transversal da ponta

O desafio dessa equação é identificar corretamente a magnitude de cada termo. Uma complicação é que, uma vez que a resistência não drenada (obtida da resistência de ponta q_{tFFP}) contribui na resistência no fuste, uma abordagem iterativa é necessária para

determinar a resistência de ponta. Isso é evitado em penetrômetros de base estendida, tais como o “Free-fall sphere” e o STING, uma vez que a resistência no fuste pode ser excluída da equação (Randolph et al., 2018).

3.3.1. Hidrodinâmica e arraste do solo

Conforme pode ser observado do item anterior, o problema da dinâmica de ensaios de penetrômetros de queda livre emprega conceitos de dinâmica dos fluidos.

Segundo Feghali (1974), nos fluidos não há ligações entre as partículas, e toda vez que uma ou mais forças atuam modificando o estado primitivo de movimento, a única reação é a força de inércia, cuja consideração é da maior importância no estudo do movimento.

Ainda segundo aquele autor, sabe-se da Mecânica Geral que a força de inércia é, a cada instante, igual e diretamente oposta à resultante das forças atuantes, e sua intensidade é o produto da massa da partícula pelo módulo da aceleração. Na mecânica dos fluidos a massa fica definida pela massa específica ρ e pelo volume, sendo este decorrente de uma medida linear, o comprimento D (ou R). A aceleração depende da velocidade e do comprimento. Em última análise, a força de inércia resulta do comprimento, da velocidade e da massa específica, isto é, de uma grandeza geométrica, de uma cinemática e de uma dinâmica.

A força de inércia, através do uso de análise dimensional, pode ser obtida pela equação 3-9 (Feghali, 1974).

$$F_i = C D^2 V^2 \rho \quad (3-9)$$

Sendo

C = constante

D = comprimento

V = velocidade

ρ = massa específica

Randolph (2018), abordando a resistência ao arraste, estabelece a equação 3-10, oriunda da Dinâmica dos Fluidos, para a sua estimativa.

$$F_d = 0,5 C_d \rho_s A_{tip} v^2 \quad (3-10)$$

Sendo

ρ_s = massa específica do solo saturado

C_d = coeficiente de arraste, valor que depende da geometria do penetrômetro

A_{tip} = área de ponta

v = velocidade

A simples comparação entre as equações 3-9 e 3-10 permite a conclusão que se trata da mesma grandeza, ou seja, a força de inércia da mecânica dos fluidos é também designada como força de arraste. De fato, a diferença entre as duas equações é apenas relativa aos valores das constantes.

No caso da aplicação prática, Randolph et al. (2018) mencionam que a massa específica deve ser estimada (na falta de amostras) e existe incerteza no coeficiente de arraste. Ainda segundo Randolph et al. (2018), é comum estimar o coeficiente de arraste do solo como o mesmo de um fluido, que tende a variar de 0,15 (aumentando com a relação comprimento/diâmetro, L/D) para penetrômetros cilíndricos com pontas hemisféricas, até 0,26 para esferas.

Se o coeficiente de arraste do solo e fluido forem considerados os mesmos, a influência da corrente que sustenta o penetrômetro nas características de arraste devem ser consideradas. Dependendo da massa da sonda, geometria, altura de queda em água, características da corrente, a velocidade de impacto de penetrômetros acorrentados pode ser reduzida à metade, ou menos, como indicado na figura 3-6, onde são apresentados os ensaios offshore UT1 e UT2 (sem corrente) e T1 e T2 (com corrente). Por ocorrência do impacto com o leito marinho a corrente tende a folgar, mudando a resistência de arraste.

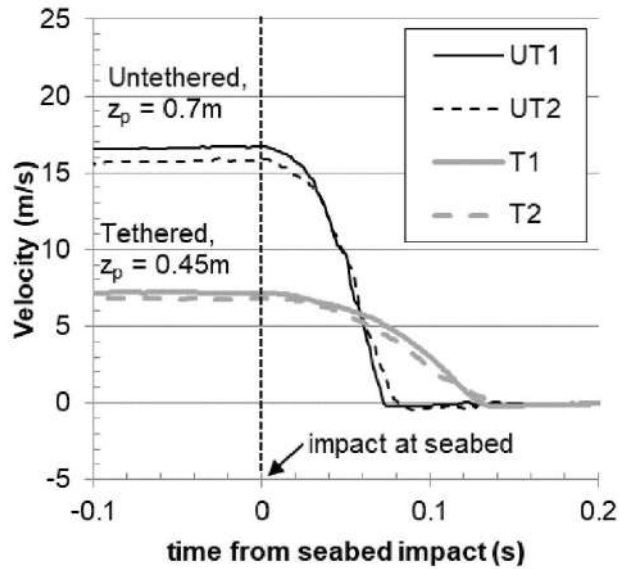


Figura 3-6 - Influência da corrente na penetração do penetrômetro NAVFAC XDP em queda a 30 m da superfície marinha em argila de baixa plasticidade, com S_u de 10 a 20 kPa nos primeiros 0,75 m (Randolph et al., 2018).

3.3.2. Resistência no fuste

Para penetrômetros que somente medem aceleração ou velocidade, o atrito no fuste deve ser subtraído da resistência total para se determinar a resistência de ponta. Tal valor pode ser determinado segundo Randolph et al. (2018) baseado na resistência não drenada obtida a partir de um fator de adesão, α , que é comumente estimado pelo valor inverso da sensibilidade do solo. O atrito total em qualquer penetração pode ser determinado pela equação 3-11.

$$Q_s = \sum \Delta A_{shaft} R_{f,shaft} \alpha S_u \quad (3-11)$$

Sendo

$$R_{f,shaft} = \frac{f_{s,d}}{f_{s,s}}$$

$f_{s,d}$ = atrito lateral medido a uma velocidade d

$f_{s,s}$ = atrito lateral medido à velocidade s , padronizada, de 20 mm/s

Embora não definido por Randolph et al. (2018) em seu artigo, o termo ΔA_{shaft} deve se referir à variação da área do penetrômetro. Dessa forma a força é calculada ao longo do penetrômetro de seção variável.

A incerteza na sensibilidade do solo e conseqüentemente no fator (α), e como esta varia com a profundidade, irá se propagar até a acurácia da resistência de ponta estimada. O atrito no fuste sofre maior influência da velocidade que a resistência de ponta e, portanto, o valor do parâmetro $R_{f, shaft}$ é maior do que $R_{f, tip}$ (Steiner et al. 2014, Chow et al. 2017 segundo Randolph et al. 2018). A incerteza na sensibilidade e no parâmetro $R_{f, shaft}$ são os fatores mais importantes para uma determinação acurada da resistência do solo quando somente é usado o acelerômetro.

3.3.3. Resistência de ponta e obtenção da resistência não drenada (S_u)

Segundo Randolph et al. (2018), uma estimativa aperfeiçoada da resistência do solo pode ser realizada a partir da medida da resistência de ponta diretamente com uma célula de carga. A interpretação então pode ser feita de maneira similar ao ensaio de piezocone estático, com a necessidade de reduzir a resistência ao arraste do solo e descontar o efeito da velocidade na resistência do solo, de acordo com as seguintes equações (3-12 e 3-13).

$$S_u = \frac{q_{c, FFP} - q_d + u_2(1 - \alpha_{cone}) - \sigma_{v0}}{R_{f, tip} N_{kt}} \quad (3-12)$$

$$S_u = \frac{q_{net, d}}{R_{f, tip} N_{kt}} \sim \frac{q_{net, static}}{N_{kt}} \quad (3-13)$$

Sendo

$q_{c, FFP}$ = resistência de ponta medida

u_2 = poro-pressão medida na base do cone

α_{cone} = razão de áreas do cone

σ_{v0} = tensão vertical total

q_d = resistência de arraste

$$R_{f, tip} = \frac{q_{net, d}}{q_{net, s}}$$

N_{kt} = fator do cone

$q_{net,d}$ = resistência de ponta medida a uma velocidade d subtraída de σ_{v0}

$q_{net,static}$ = resistência de ponta medida à velocidade convencional de 20mm/s subtraída de σ_{v0} .

3.3.4. Efeito viscoso em função da velocidade de cravação

Segundo Randolph et al. (2018), a altíssima velocidade de penetração de um penetrômetro de queda livre (especialmente em baixas profundidades) faz com que o solo sofra altas velocidades de deformação que aumentam a resistência do solo para valores além dos nominalmente não drenados. O efeito da velocidade de deformação pode ser modelado usando tanto uma função semi-logarítmica (ou função inversa do seno hiperbólico) ou função de potência (incluindo a formulação de Herschel-Bulkley) de acordo com a equação 3-14.

$$R_{f,tip} = \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^{\beta} = \left(\frac{v/D}{(v/D)_{ref}} \right)^{\beta} \geq 1 \quad (3-14)$$

Sendo

$\dot{\gamma}$ = a velocidade de deformação

$\dot{\gamma}_{ref}$ = a velocidade de deformação de referência (piezocone convencional)

β = parâmetro de velocidade de deformação

v = velocidade de penetração

D = diâmetro do penetrômetro

Essa simples função de potência tem sido mais utilizada pois ela estima os efeitos da velocidade melhor do que as funções logarítmicas sob maiores faixas de velocidade de deformação (Biscontin & Pestana 2001 segundo Randolph et al. 2018). A média da velocidade de deformação deve ser relacionada diretamente à velocidade normalizada, v/D . Devido ao diferente efeito da velocidade observado para a resistência de ponta e para o atrito lateral, diferentes parâmetros de velocidade de deformação, β_{shaft} (fuste) e

β_{tip} (ponta), são recomendados para estimar $R_{f,tip}$ e $R_{f,shaft}$ das equações apresentadas anteriormente.

Para penetrômetros de queda livre com diâmetro de 100 mm, em queda livre sob velocidade de 10 m/s, $v/d = 100s^{-1}$, ou seja, um valor duas ordens de grandeza maior que a de um ensaio de piezocone convencional (10 cm²). Para essa magnitude de variação em velocidade de deformação, o parâmetro β_{tip} varia tipicamente na faixa de 0,03 a 0,09 (Lehane et al. 2009, O’Loughlin et al. 2013, 2016 segundo Chow et al. 2017).

Exemplos de resultados de penetrômetros de queda livre em centrífuga em kaolin (Chow et.al 2017) são apresentados nas figura 3-7, figura 3-8 e figura 3-9. A interpretação baseada somente na medida da aceleração (efeitos da corrente de recuperação são desprezíveis em centrífuga) superestima a resistência deduzida do piezocone estático em aproximadamente 50%, mesmo quando diferentes parâmetros de velocidade de deformação (β_{tip} e β_{shaft}) são aplicados, determinados a partir de medidas realizadas diretamente na ponta e no fuste de penetrômetros de queda livre (figura 3-8). Essa discrepância é causada pelas incertezas em determinar a resistência dinâmica do fuste de modo confiável (Chow et al. 2017).

A figura 3-9 mostra (para o mesmo ensaio de centrífuga, Chow et al. 2017) que quando a interpretação é baseada na medida da célula de carga na ponta e na medida de poro-pressão (u_2), os valores da resistência não drenada determinados pelo FFP e pelo ensaios de piezocone convencionais são indistiguíveis. A interpretação da figura 3-9 usa o valor intermediário $\beta_{tip}=0,06$, com variações de β_{tip} (de 0,035 até 0,085), levando a variações na interpretação de $\pm 10\%$.

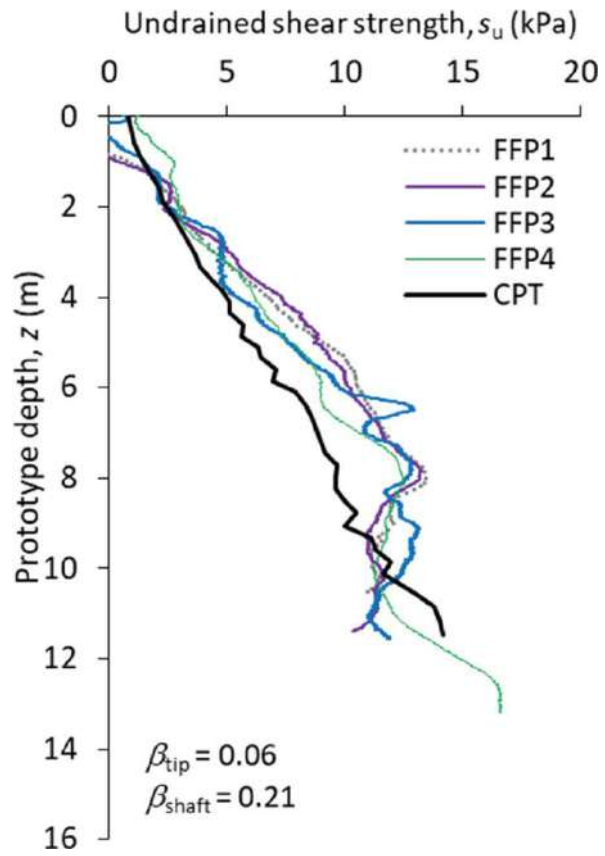


Figura 3-7 – Estimativa de S_u com a profundidade a partir do “método do acelerômetro” (Chow et al. 2017 aput Randolph et al. 2018)

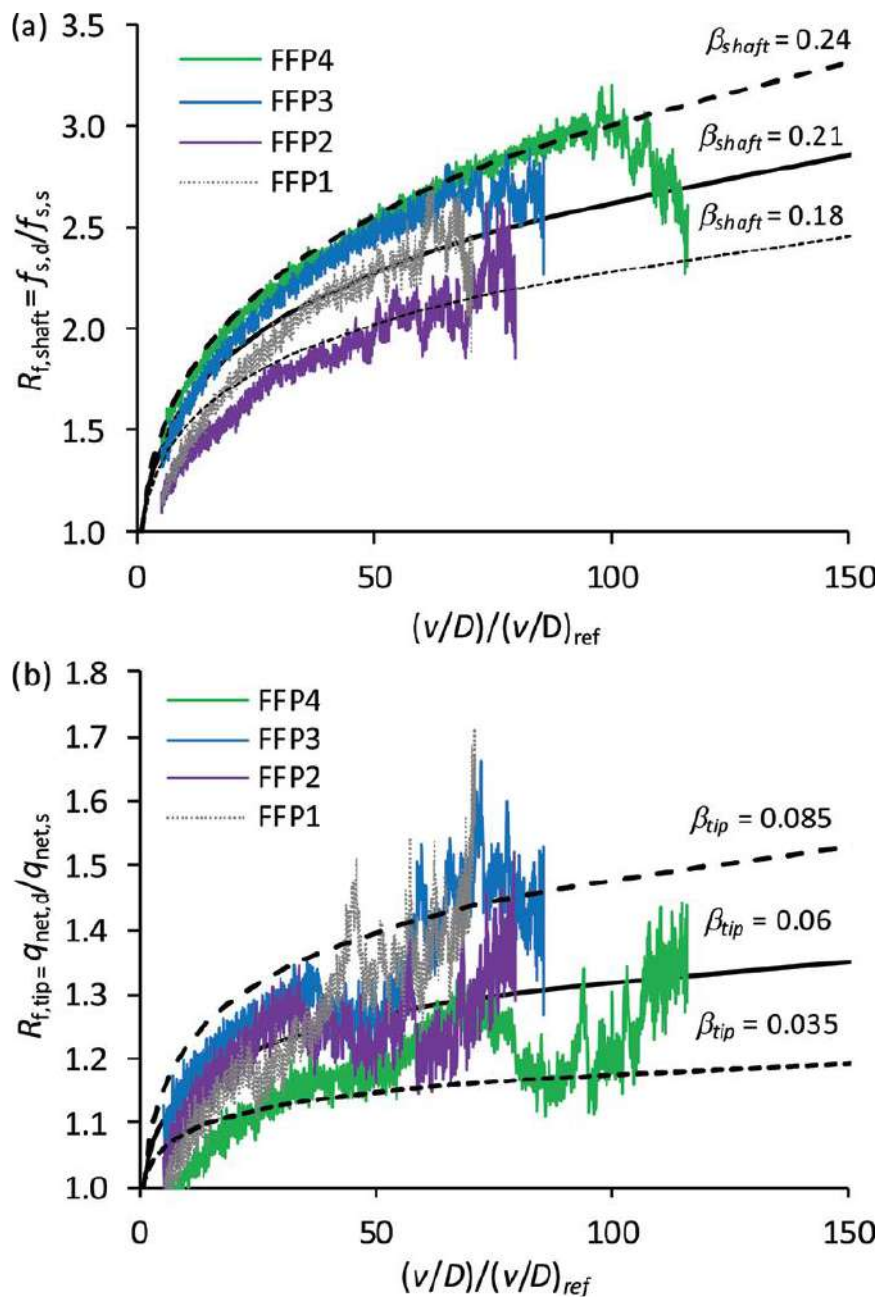


Figura 3-8 – Ajuste para os parâmetros de velocidade de deformação (a) resistência no fuste (b) resistência de ponta normalizada

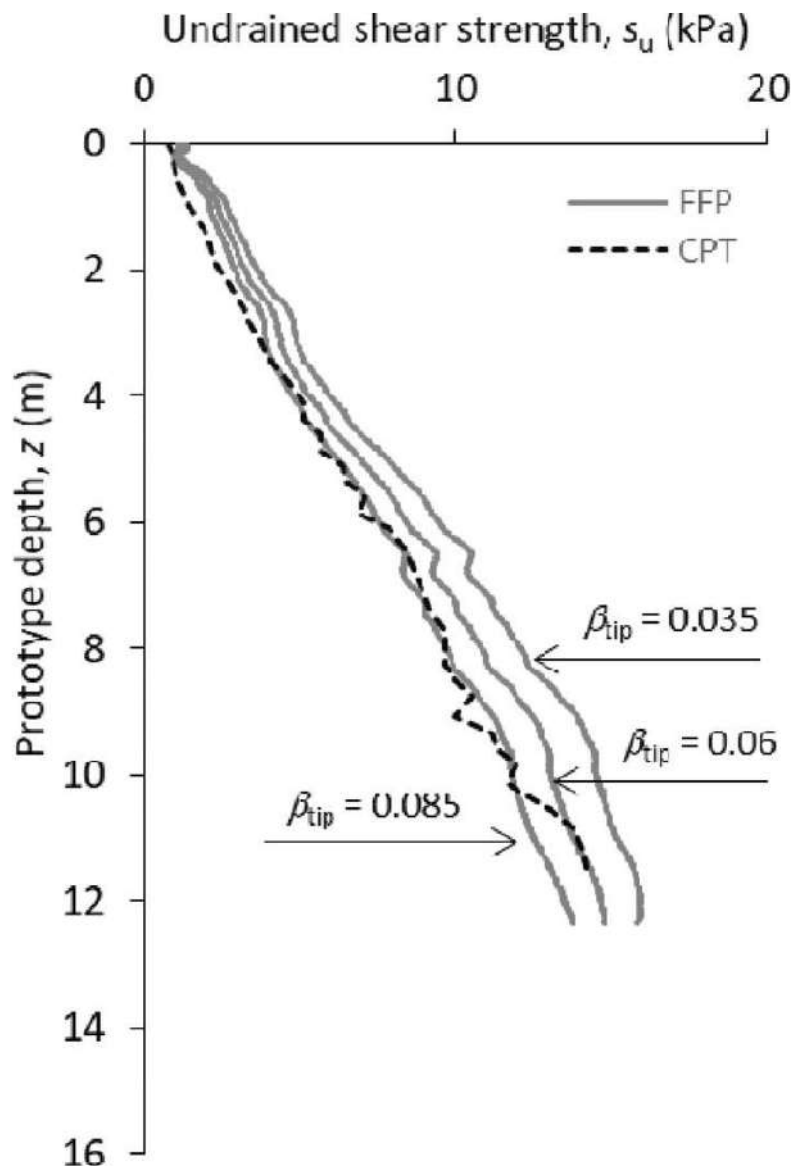


Figura 3-9 – s_u com a profundidade determinado com penetrômetros instrumentados com célula de carga na ponta (Chow et al. 2017)

4. O campo experimental de Sarapuí II

4.1. Introdu o

Os ensaios iniciais com o piezocone torpedo deveriam, naturalmente, ser realizados em terra, a fim de se testar o mecanismo como um todo, em um local cujas propriedades do solo fossem semelhantes às encontradas no solo submarino. O campo experimental de Sarapuí II foi selecionado para esse propósito, após inúmeras tentativas infrutíferas de implanta o do Campo Experimental no interior da REDUC, em Duque de Caxias, Rio de Janeiro (Henriques Junior et al., 2010).

Segundo Jannuzzi (2009), os primeiros estudos na região do campo experimental de Sarapuí foram realizados por Pacheco Silva (1953). Entretanto, o campo experimental de Sarapuí foi estabelecido oficialmente em meados dos anos 1970 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (IPR-DNER), visando o estudo de aterros sobre argilas moles, um problema enfrentado por aquele órgão ao longo de todo o país (Ortigão e Lacerda, 1979). Um abrangente projeto de pesquisas foi iniciado em 1974, sob a supervisão do Professor Willy Lacerda, da COPPE/UFRJ.

Pesquisas foram conduzidas numa coopera o entre IPR-DNER, COPPE/UFRJ e PUC-Rio. Várias pesquisas, envolvendo ensaios de campo e laboratório, instrumenta o de aterros e escava o, foram realizadas (e.g., Lacerda et al., 1977, Werneck et al., 1977, Ortigão et al., 1983, Sayão, 1980, Danziger et al., 1997). Artigos abrangentes envolvendo as pesquisas no campo experimental de Sarapuí foram elaborados por Alves e Santa Maria (2001), Almeida e Marques (2002), Almeida et al. (2005) e Cavalcante et al. (2006). Situado em uma área junto   Ba ia de Guanabara, na margem esquerda do rio Sarapuí, cerca de 7 km da cidade do Rio de Janeiro, suas coordenadas m dias são 22 44'39'' (S) e 43 17'23'' (W). Todavia, nos últimos 25 anos, aspectos associados, sobretudo,   segurança fizeram com que a utiliza o do depósito de Sarapuí se tornasse problemática. Assim, e com o apoio da Marinha, foi instalado um novo campo experimental designado Sarapuí II dentro da área da Esta o Rádio da Marinha no Rio de Janeiro. O novo campo situa-se na margem esquerda do rio Sarapuí, a cerca de 1,5 km de Sarapuí I (figura 4-1).



Figura 4-1- Sarapuí I e Sarapuí II em relação à rodovia Washington Luiz BR 040 (adaptado de Jannuzzi, 2013)

4.2. Características geológico-geotécnicas de Sarapuí II

As duas primeiras pesquisas em Sarapuí II foram relacionadas a fundações (Francisco, 2004 e Alves, 2004). Várias outras se seguiram, relacionadas à caracterização e estudo de comportamento do depósito através de ensaios de campo (Jannuzzi, 2009) e laboratório (Jannuzzi, 2013, Tortureli, 2016, Aguiar, 14), ao desenvolvimento do piezocone torpedo (e.g., Porto et al., 2010) e ao desenvolvimento da estaca-torpedo (Freitas, 2014, Guimarães, 2015).

Segundo Jannuzzi (2013), os ensaios de granulometria forneceram a seguinte composição média ao longo do perfil: 60 % de argila, 35-40 % de silte e 0-5 % de areia (figura 4-2 a). Os valores do limite de liquidez, w_L , de Sarapuí II aumentam com a profundidade, de cerca de 105% perto da superfície, até 2,5-3,0 m de profundidade, quando alcançam maiores valores, em torno de 210%. A partir dessa profundidade, w_L decresce com a profundidade até atingir aproximadamente 125% na base do material muito mole. Menores valores de w_L são encontrados abaixo de 8 m de profundidade, referindo-se ao silte argiloso amarelo do subjacente ao pacote muito mole. Os valores do limite de plasticidade, w_P , mantêm-se praticamente constantes, em torno de 35 a 45% ao longo de todo o perfil. Em consequência, os valores do índice de plasticidade, IP, apresentam um crescimento com a profundidade, de cerca de 70% na superfície a 160-170% a 2,5-3,0 m

de profundidade, a seguir decrescem com a profundidade até aproximadamente 80-90% na base do material muito mole. Valores menores, em torno de 35-50% abaixo de 8 m de profundidade, referem-se ao silte argiloso. O teor de umidade natural, w_n , indica valor de 180% da superfície a 4 m de profundidade, de 140% de 4 m a 7,5 m e de 40% de 8 m a 9 m (figura 4-2 b). O peso específico saturado do solo, γ_{sat} é de 12,7 kN/m³ na superfície e 14,0 kN/m³ a 7,5 m de profundidade (figura 4-2 c). Pode-se dizer que o teor de matéria orgânica (MO) decresce com a profundidade até 3,0 m, de uma faixa de 11-18 % para 5-6 % aproximadamente, e de 3,0 m a 5,5-6,0 m é aproximadamente constante, em torno de 5-6%; de 6,0 a 8,0 m é também aproximadamente constante na faixa de 7-9%. Na camada de silte argiloso amarelo abaixo de 8,0 m o teor de matéria orgânica varia de 1 a 2% (figura 4-2 d). No que diz respeito ao OCR, pode-se verificar que até em torno de 3,0 m de profundidade o solo se encontra sobreadensado, após esta profundidade, pode-se dizer que se encontra levemente sobreadensado, com uma razão de sobreadensamento em torno de 2 (figura 4-2 e). A resistência não drenada obtida no ensaio de palheta variou de 8,5 kPa na superfície a 17,9 kPa a 7 m. Nos ensaios de DSS os valores de resistência não drenada variaram de 4,5 -5,0 kPa em torno de 1,5 m chegando a 10 kPa em torno de 6,0 m.

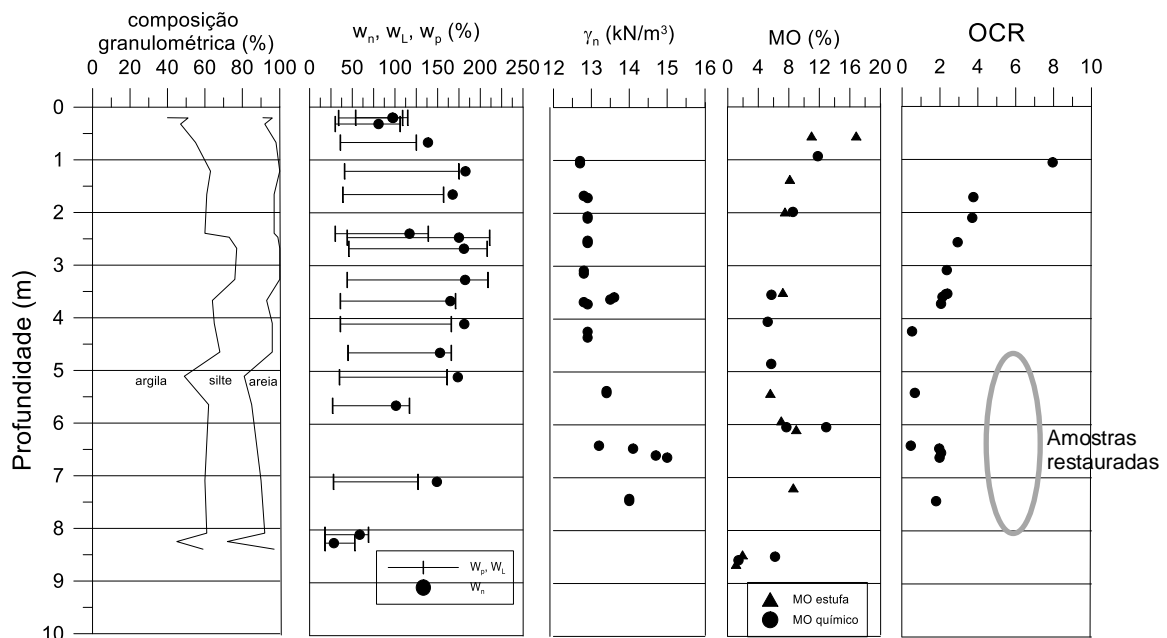


Figura 4-2 - Dados de Sarapuí II: (a) composição granulométrica; (b) w_n , w_L , w_p , (c) peso específico natural; (d) teor de matéria orgânica e (e) OCR (adaptado de Jannuzzi, 2013)

Foram realizados no campo experimental de Sarapuí II os seguintes ensaios de campo: 6 sondagens à percussão, 5 verticais de palheta elétrica (a cada 0,50 m), 4 verticais de barra cilíndrica (T-bar), 7 verticais de piezocone, 18 verticais de piezocone torpedo. A figura 4-3 ilustra a localização dos ensaios, o perfil geotécnico obtido através de sondagens a percussão é apresentado na figura 4-4. A camada de argila muito mole possui espessura variando entre 6,5 m e 10,0 m na região ensaiada. A camada de solo muito mole é sobrejacente a uma camada de silte argiloso cinza, por sua vez sobrejacente a camadas de areia argilosa, silte argiloso e argila siltosa amarela.

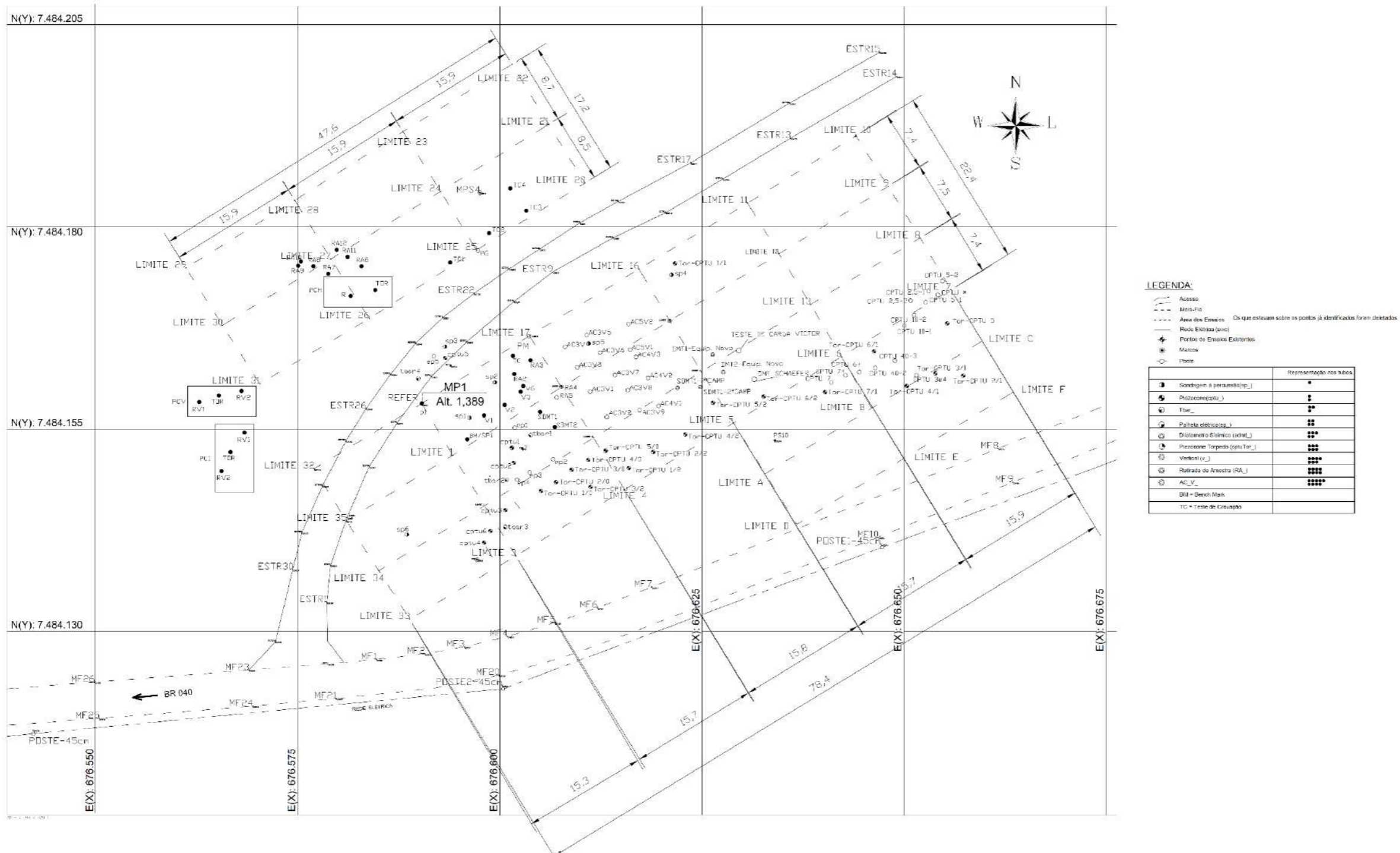


Figura 4-3 - Localização dos ensaios (Adaptado de planta de localização dos ensaios de campo)

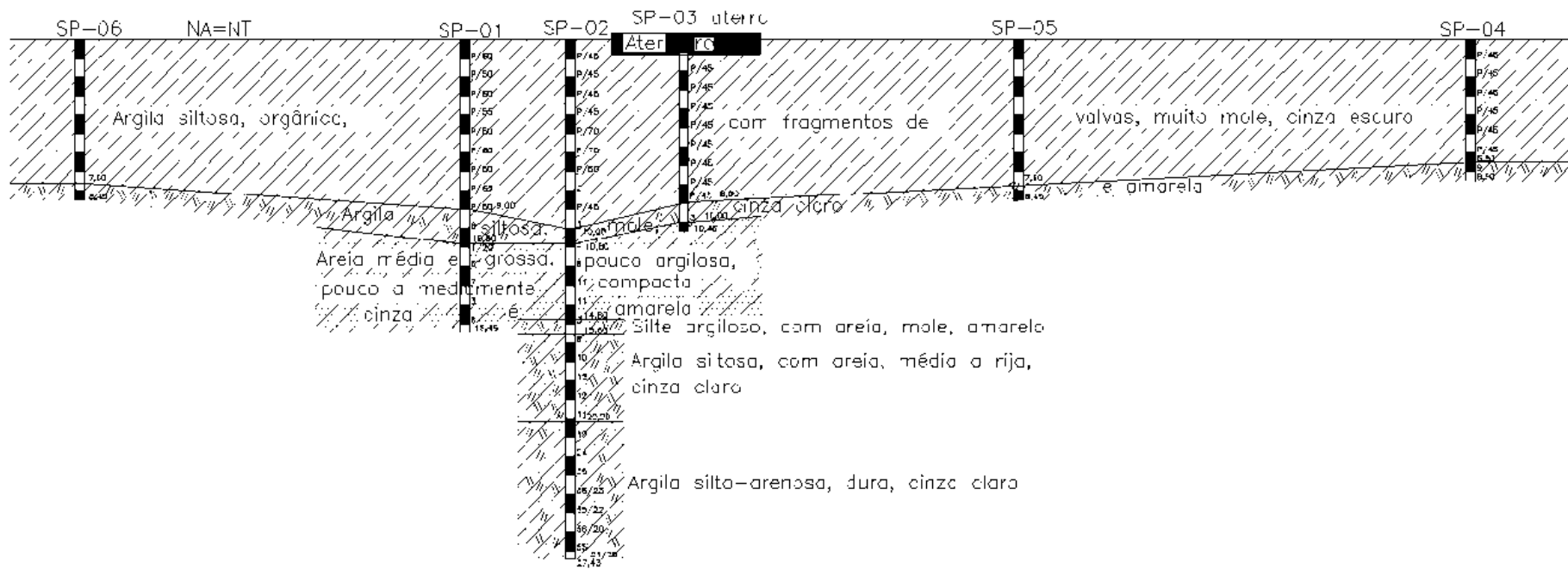


Figura 4-4 - Perfil geotécnico traçado a partir das sondagens a percussão (Jannuzzi 2009)

Um resultado típico de ensaio de piezocone convencional é apresentado na figura 4-5, onde a parte inferior dos resultados dos ensaios de piezocone, subjacente à camada de argila mole de aproximadamente 8 m de espessura, refere-se à camada de silte argiloso amarelo.

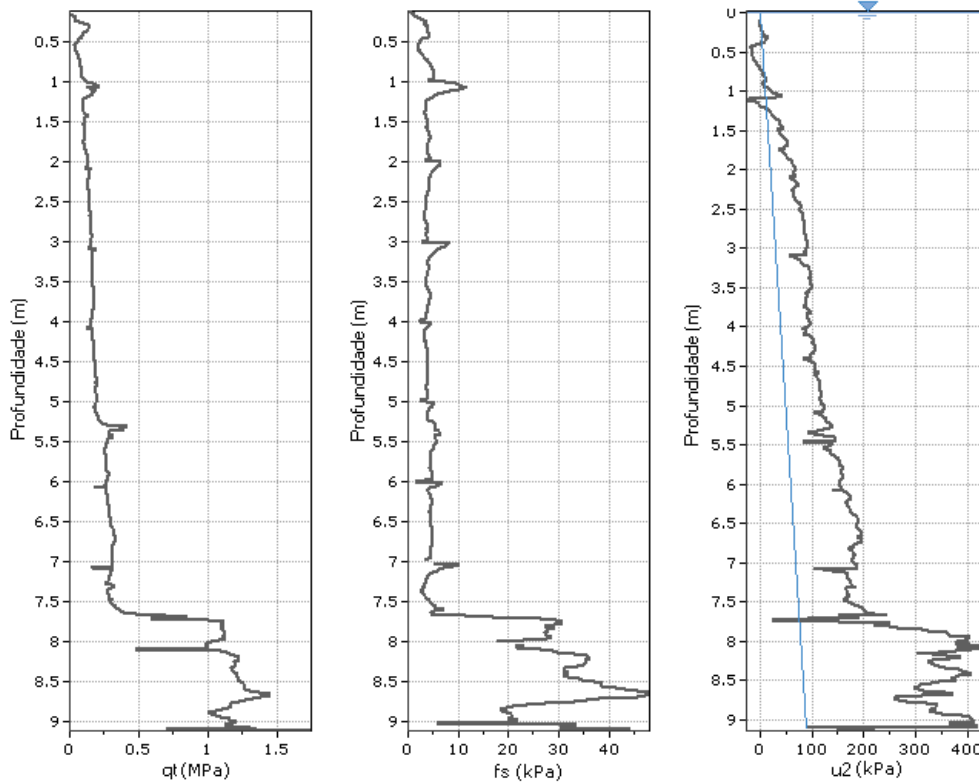


Figura 4-5 - Resistência de ponta corrigida (q_t), atrito lateral (f_s), e poro-pressão na base do cone (u_2) de um ensaio de piezocone típico no campo experimental de Sarapuí II (adaptado de Jannuzzi, 2009)

O peso específico saturado do solo, γ_{sat} , em Sarapuí II, varia de 12,7 kN/m³ na superfície a 14,0 kN/m³ a 7,5 m de profundidade. No presente trabalho será adotado o valor de γ_{nat} variando com a profundidade, segundo recomendações de Jannuzzi (2013), conforme pode ser visto na tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Peso específico por profundidade (Jannuzzi, 2013)

Profundidade (m)	γ_{nat} (kN/m ³)
0 a 2	12,7
2 a 5	12,9
5 a 7	13,5
7 a 8	14

5. Piezocone torpedo desenvolvido e a campanha de 2009

5.1. Introdução

Segundo Danziger et al (2010), penetrômetros de queda livre vem sendo usados nos últimos 30-40 anos, mas a maioria deles é capaz de penetrar no solo apenas alguns poucos metros (Alves e Danziger, 2008, 2010). A necessidade de penetração em profundidades elevadas em águas profundas, combinada com a de reduzir custos de investigações geotécnicas, levou a PETROBRAS ao desenvolvimento de um equipamento em que um piezocone é instalado na extremidade de uma estaca-torpedo. O novo equipamento, desenvolvido conjuntamente pela PETROBRAS e COPPE/UFRJ, com o auxílio da empresa GROM Acústica e Automação, passou a ser denominado piezocone-torpedo (Medeiros Jr. et al., 2004, Porto et al., 2010).

O equipamento em desenvolvimento, piezocone-torpedo, deveria ser capaz de medir resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s), poro-pressão na face do cone (u_1) e na base do cone (u_2), além da temperatura, durante a queda e algum tempo após a parada final. As principais dimensões da extremidade inferior do piezocone-torpedo deveriam ser as mesmas do piezocone tradicional, ou seja, 60° de ângulo da extremidade do cone, 10 cm^2 de área de base e 150 cm^2 de área lateral da luva de atrito. A medida da poro-pressão em dois locais (face e base do cone) resulta da experiência adquirida pela COPPE/UFRJ ao longo dos últimos 36 anos (e.g., Bezerra, 1996, Danziger et al., 1997, Danziger, 2007). Os requisitos do novo equipamento deveriam ser, entretanto, bem distintos do piezocone tradicional, em vista de suas particularidades.

A obtenção de parâmetros geotécnicos através do piezocone-torpedo representará significativa redução de custos, tendo em vista que em alguns casos não será necessária a realização de campanha com navios geotécnicos estrangeiros. Estes são contratados a altos custos, somando-se a dificuldade dos longos processos de contratação e disponibilidade na ocasião da demanda. O equipamento necessitará, para sua utilização, apenas de barcos de manuseio de âncora que já se encontram em operação pela PETROBRAS (AHTS).

Os parâmetros geotécnicos obtidos através do piezocone-torpedo poderão ser utilizados em projetos de pontos fixos de ancoragem (estaca-torpedo, âncora de sucção, âncora VLA e âncora de arraste), projeto de fundações de equipamentos submarinos (PLET, PLEM e

Manifold), projetos de cabeça de poço (base torpedo), projetos de dutos submarinos e em análises de estabilidade de taludes marinhos.

5.2. O desenvolvimento do equipamento

Vários desafios estavam associados ao desenvolvimento do equipamento: i) a pressão extremamente elevada, correspondente a 2000 m de profundidade, com as necessidades de vedação dos diversos componentes; ii) as dificuldades relacionadas à medida do excesso de poro-pressão (algumas centenas de kPa no caso de argilas moles) em presença da pressão hidrostática extremamente elevada; iii) a falta de uma poro-pressão de referência durante a queda; iv) as dificuldades de espaço no sistema em uso nas estacas-torpedo para acomodar novos dispositivos e v) o desenvolvimento de um sistema de aquisição capaz de registrar os dados em intervalos de penetração muito pequenos durante um ensaio com velocidade variável, muito elevada no início do ensaio.

Os requisitos i) a iii) acima resultaram na necessidade de desenvolvimento de um sistema de compensação interna de pressão, desenvolvido pela empresa Grom Acústica e Automação, testado com sucesso na câmara hiperbárica do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da PETROBRAS (CENPES).

O piezocone-torpedo foi projetado para ser usado com um torpedo com dimensões semelhantes aos torpedos de 300 kN de peso, utilizados na ancoragem de risers. Uma vez que os primeiros ensaios seriam realizados em terra, decidiu-se que um torpedo menor, de 4,5 m de comprimento, 0,22 m de diâmetro e peso de 12 kN seria inicialmente utilizado. Em ambos os casos, a presença do torpedo não poderia influenciar os resultados medidos no piezocone durante a penetração. Assim, análises efetuadas com base no Método do Caminho de Deformações (Levadoux, 1980, Levadoux e Baligh, 1980, Teh, 1987, Houlsby e Teh, 1988, Teh e Houlsby, 1988) sugeriram o projeto esquematizado na figura 5-1 (Porto et al. 2010). A figura 5-2 mostra o torpedo menor durante o processo de fabricação.



Figura 5-1- Vista esquemática da parte inferior do piezocone-torpedo, adaptado de Porto et al, 2010



Figura 5-2 - Torpedo menor, ainda durante o processo de fabricação , adaptado de Porto et al, 2010

O sistema de aquisição de dados desenvolvido foi baseado naquele utilizado pela estaca-torpedo, também desenvolvida no laboratório, capaz de medir aceleração e rotação em 3 direções. Quanto à frequência de leituras, desejava-se ter pelo menos uma leitura a cada 20 mm no início da penetração. Assim, considerando-se que a estaca-torpedo atinge velocidade de impacto da ordem de 20 m/s (Medeiros Jr., 2002), chega-se a uma frequência de 1000 Hz no início do ensaio. Por outro lado, uma quantidade excessiva de dados seria produzida caso essa frequência fosse utilizada ao longo de todo o ensaio. Além disso, seria preferível empregar a capacidade de armazenamento do sistema para obter dados também após o final da penetração, de modo a se ter uma ideia da dissipação das poro-pressões e das variações das cargas em ambas as células de carga, de ponta e de atrito. Assim, decidiu-se que, após 10 s, o sistema mudaria a frequência de aquisição de 1000 Hz para 10 Hz. As frequências de aquisição podem ainda ser ajustadas, por exemplo, para utilização durante calibrações (Porto et al. 2010).

5.3. Calibração

Este item refere-se às calibrações que o autor do presente trabalho participou e não o realizado previamente em 2009 na COPPE/UFRJ. O piezocone-torpedo foi calibrado empregando-se dois sistemas de aquisição de dados: o sistema usualmente empregado na COPPE/UFRJ e aquele desenvolvido especificamente para ser empregado no piezocone-torpedo pela NavCon. A frequência de 1 Hz é a menor frequência possível no novo sistema, e foi empregada para a calibração, com o intuito de se otimizar a quantidade de dados obtidos.

As calibrações dos sensores do piezocone-torpedo foram realizadas no Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Professor Márcio Miranda Soares, um dos Laboratórios Associados ao Laboratório de Geotecnia Professor Jacques de Medina, antes e após a realização dos ensaios.

Cada transdutor foi calibrado na faixa de carga ou pressão prevista a acontecer no campo. Dessa forma, pode-se verificar se um dado transdutor é capaz de oferecer respostas adequadas na faixa de trabalho em que irá realmente atuar.

Para a calibração da Campanha 2, na qual o autor do presente trabalho teve participação, foram realizadas duas séries de calibrações, uma com o piezocone-torpedo e a outra com o piezocone tradicional. Após a primeira campanha de ensaios, o piezocone-torpedo foi calibrado e se verificou que o transdutor da ponta não estava funcionando adequadamente (aparentemente houve uma mudança na leitura zero da célula de carga), o que justificou os resultados da resistência de ponta nesta campanha. Optou-se então por utilizar o piezocone tradicional acoplado ao torpedo para a realização da segunda campanha, uma vez que não havia tempo hábil para que a célula de ponta do piezocone-torpedo fosse refeita. Por esse motivo o piezocone tradicional foi utilizado e calibrado antes e depois da segunda campanha.

Cabe salientar que esse procedimento é possível apenas em ensaios em terra, de vez que no caso de ensaios offshore há necessidade de emprego do sistema de compensação de pressões, não disponível no piezocone tradicional.

As figura 5-3 e figura 5-4 mostram os dispositivos empregados nas calibrações da ponta e do atrito respectivamente.

A calibração da ponta foi feita em 10 estágios de carga e descarga nos quais eram aplicados pesos padronizados de 5 kgf por estágio totalizando carga final em torno de 55 kgf (somando o peso do piezocone e do pendural), o equivalente a calibrar na faixa de 0 a 550 kPa. O valor final de calibração foi estimado a partir de valores esperados para o depósito de argila mole de Sarapuí II, e obtidos a partir de ensaios anteriormente realizados.

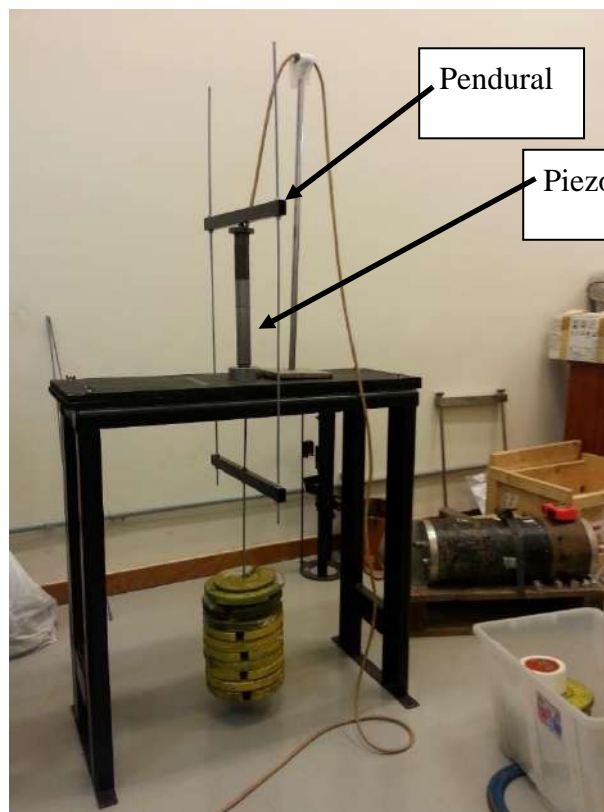


Figura 5-3 – Calibração do transdutor de ponta, adaptado de Danziger et al., 2008

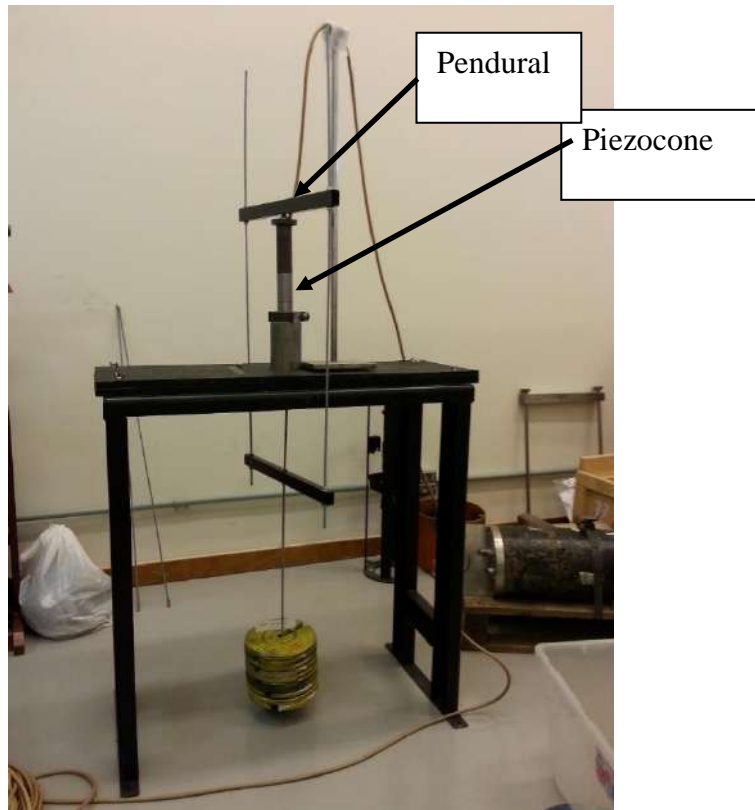


Figura 5-4- Calibração do transdutor de atrito lateral, adaptado de Danziger et al., 2008

A figura 4-5 a apresenta os resultados para um ciclo de carga e descarga obtido durante a calibração do transdutor de ponta do piezocone torpedo, onde se pode verificar o não retorno ao zero, e a figura 4-5b um ciclo de carga e descarga obtido durante a calibração do piezocone tradicional.

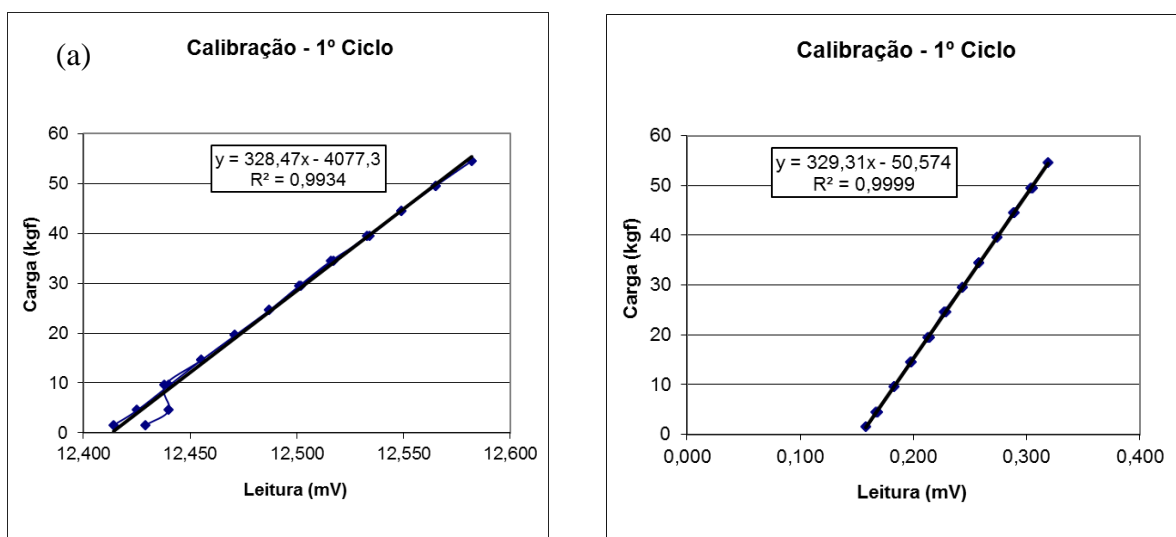


Figura 5-5 – (a) Retas de calibração do transdutor de ponta do piezocone torpedo (b) Retas de calibração do piezocone convencional (Danziger et al, 2008)

A calibração do atrito (figura 5-6) foi feita em 10 estágios de carga e descarga nos quais eram aplicados 2 kgf por estágio totalizando a carga final em torno de 25 kgf (somando o peso do piezocone e do pendural), o equivalente a calibrar na faixa de 0 a 17 kPa.

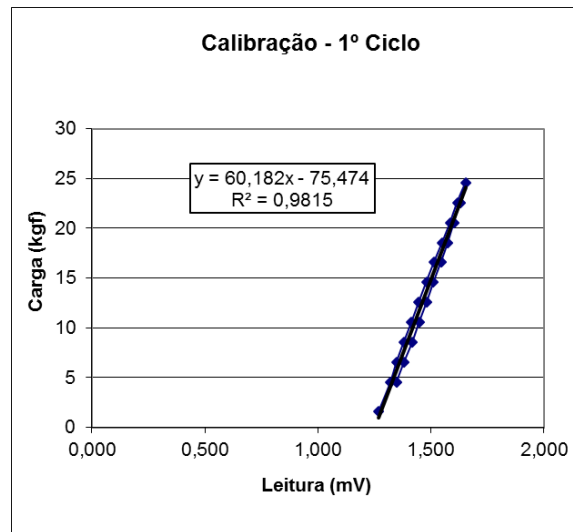


Figura 5-6 – Reta de calibração do transdutor de atrito do piezocone convencional (Danziger et al, 2008)

Um procedimento anterior à calibração dos transdutores de poro-pressão diz respeito à saturação dos mesmos que é realizada muitas vezes em conjunto com os elementos porosos que serão utilizados durante o ensaio. Devido à importância da saturação tanto da sonda como dos elementos porosos este tópico será abordado em um item específico (4.4).

A faixa de pressão a ser utilizada na calibração dos transdutores de poro-pressão 1 e 2 foi estimada a partir de resultados de ensaios anteriormente realizados neste depósito.

A calibração dos transdutores de poro-pressão 1 e 2 foi realizada em 10 estágios de carregamento e descarregamento nos quais eram aplicados 50 kPa por estágio a partir do aparelho FlowTrac, o qual permite a aplicação de pressão no sistema, totalizando pressão final em torno de 500 kPa. O valor final de calibração foi estimado, da mesma forma que para os outros transdutores.

A figura 5-7 mostra o sistema usado para a calibração dos transdutores de poro-pressão e a figura 5-8 apresenta o recipiente de calibração. Na figura 5-9 é apresentado um resultado de uma das calibrações realizadas, neste caso do transdutor de poro-pressão u1.



Figura 5-7 – Sistema de calibração empregado para os transdutores de poro-pressão , adaptado de Danziger et al., 2008

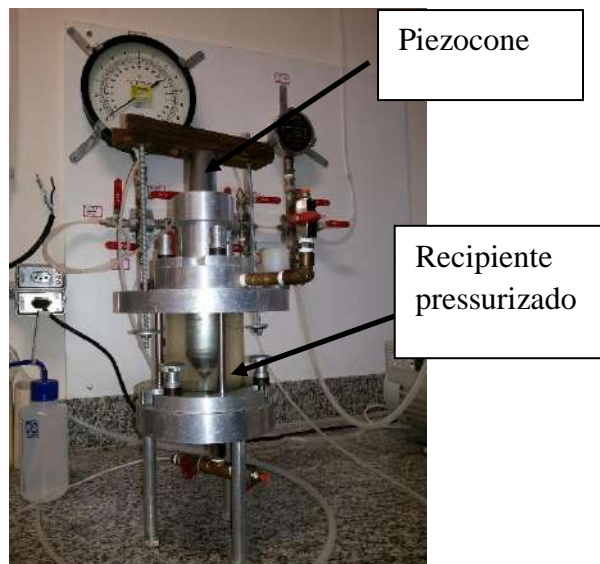


Figura 5-8 – Recipiente pressurizado utilizado nas calibrações dos transdutores de poro-pressões, adaptado de Danziger et al., 2008

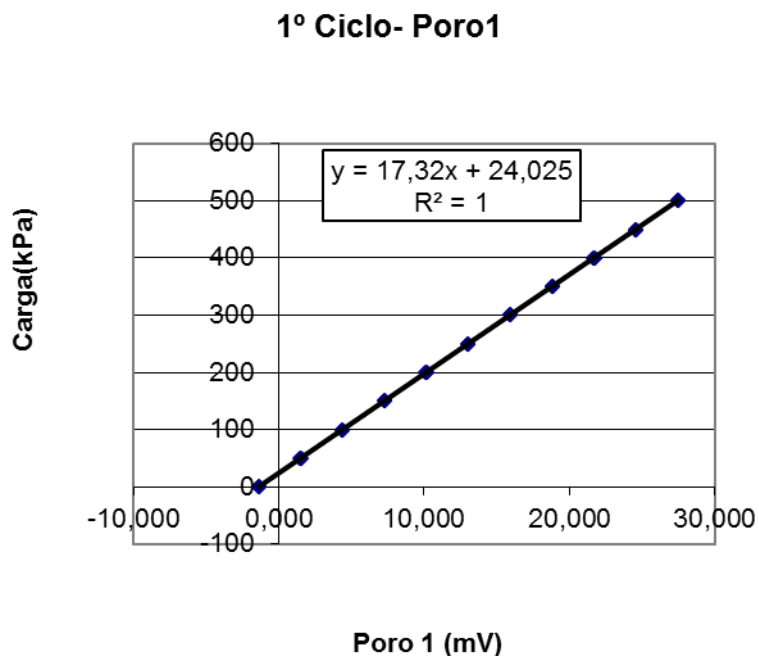


Figura 5-9 – Reta de calibração do transdutor de poro-pressão, adaptado de Danziger et al., 2008

As tabelas 4-1 e 4-2 apresentam, respectivamente, as constantes de calibração do piezocone torpedo, antes e depois das campanhas de ensaio. As constantes de calibração obtidas com o sistema da COPPE/UFRJ, multiplicadas pelo fator de conversão Navcon possibilita a utilização do sistema de calibração da COPPE/UFRJ na calibração do piezocone-torpedo. Cabe salientar que a saída do sistema da COPPE/UFRJ constitui um valor em mV. O fator de multiplicação não é uma constante para todos os transdutores. De fato, conforme mencionado pela Navcom (participante na elaboração do piezocone torpedo), vale 82 para as células de carga (ponta e atrito) e 25 para os transdutores de poro-pressão.

Tabela 5-1- Constantes de calibração obtidas com o pizocone convencional antes da realização dos ensaios.
(adaptado de Danziger et al., 2008)

Transdutor	CONSTANTES		
	COPPE/UFRJ [kgf/mv]	Fator de calibração FC	kPa/leitura
ponta	331,91	82	39,71
atrito	62,74	82	0,50
poro 1	17,33	25	0,69
poro 2	17,71	25	0,71

Tabela 5-2 Constantes de calibração obtidas com o pizocone convencional após a realização dos ensaios.
adaptado de Danziger et al., 2008

Transdutor	CONSTANTES		
	COPPE/UFRJ [kgf/mv]	Fator de calibração FC	kPa/leitura
ponta	332,18	82	39,74
atrito	63,99	82	0,51
poro 1	17,29	25	0,69
poro 2	17,65	25	0,71

Pode-se observar a partir das tabelas apresentadas anteriormente que as constantes anteriores e após o ensaio são as mesmas, o que implica que os resultados obtidos não precisam ser modificados no que concerne às constantes de calibração.

5.4. Saturação dos elementos porosos

Para a saturação dos elementos porosos, a água foi utilizada como fluido de saturação, como adotado normalmente pela COPPE/UFRJ na realização dos ensaios de piezocone tradicionais. Os procedimentos foram realizados com algumas modificações dos recomendados por Lacasse (1980) e Danziger et al. (1997), em virtude do tempo necessário para a realização dos ensaios e da falta de uma quantidade maior de elementos porosos.

As etapas do processo de saturação empregado são descritas a seguir.

- i. Lavar os elementos porosos em água corrente com o emprego de uma escova, limpando-se toda a área do elemento poroso.
- ii. Colocar os elementos porosos em banho maria durante 30 min, a fim de se retirar eventuais resíduos de solo remanescentes.
- iii. Secar superficialmente os elementos porosos e as partes do piezocone que conduzem aos transdutores de pressão. A secagem superficial dos elementos porosos foi realizada em uma estufa, com temperatura em torno de 60°C, durante um período de 30 min.
- iv. Colocar os elementos porosos junto com o piezocone no recipiente de calibração e ligar o vácuo por um período de 12 horas.
- v. Colocar no recipiente de calibração a água deionada e destilada por um período de no mínimo 3 horas.
- vi. Após a saturação montar os elementos porosos dentro d'água com o intuito de manter sua saturação.

A Figura 5-10 ilustra o sistema de saturação dos elementos porosos.

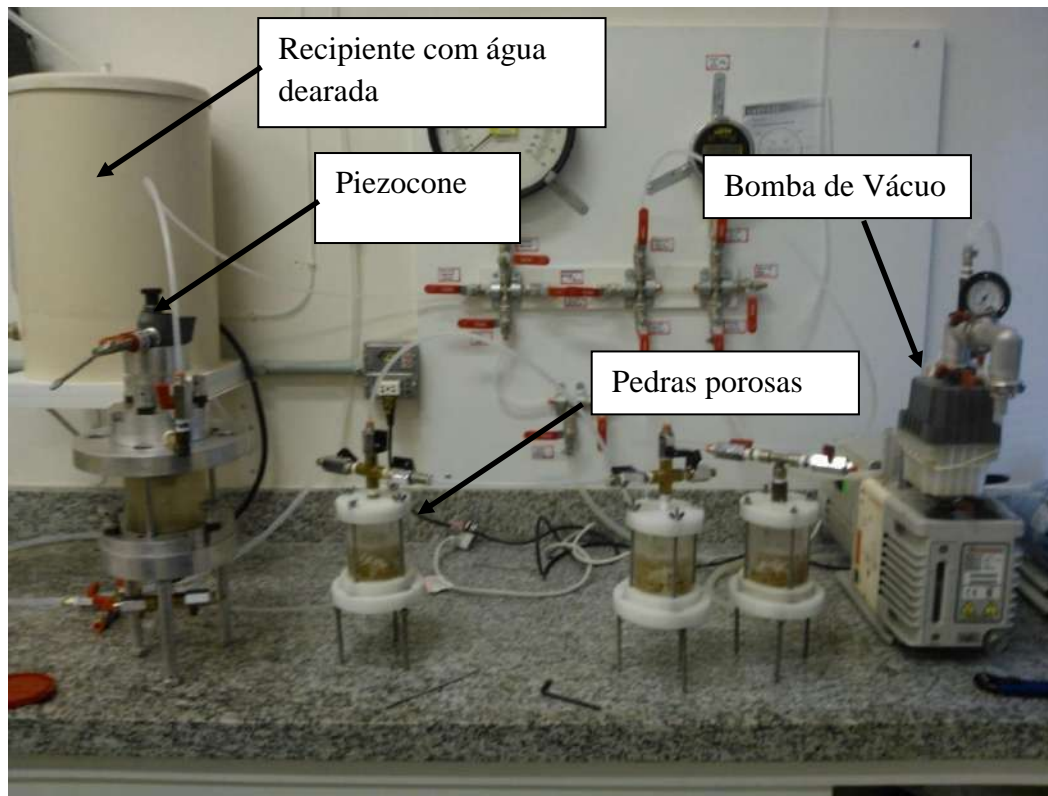


Figura 5-10 – Sistema de saturação montado, adaptado de Danziger et al., 2008

5.5. Procedimentos de realização dos ensaios

As dificuldades associadas ao lançamento do torpedo eram, naturalmente, significativas. A simples movimentação do guindaste hidráulico, com o peso e as dimensões necessárias, consistia em operação algo complexa. A figura 5-11 ilustra o guindaste patolado em posição durante o lançamento do piezocone-torpedo, onde duas das quatro patolas tiveram que ser localizadas no material mole, de modo a não impedir o fluxo de veículos na estrada de acesso às instalações da Marinha. (Henriques Junior et al. 2010)

Para que todos os procedimentos pudessem ser realizados foi necessária a fabricação de uma estrutura em aço (denominada berço) com elevada rigidez e que suportasse os esforços impostos pelo piezocone-torpedo durante várias operações. Tal estrutura deveria permitir o apoio do piezocone-torpedo em diversas inclinações (figura 5-12), necessárias para se realizar várias operações, exemplificando: na posição horizontal, para fixação do cabo de aço de recuperação do piezocone-torpedo, para instalação do piezocone no torpedo, para fazer a programação do sistema de aquisição de dados e para a limpeza do equipamento após a retirada do subsolo, entre outras; na posição a 45°, para a montagem dos elementos porosos no piezocone.



Figura 5-11 – Piezocone-torpedo durante queda livre, campanha de 2014. (Foto retirada de vídeo feito com GOPRO)

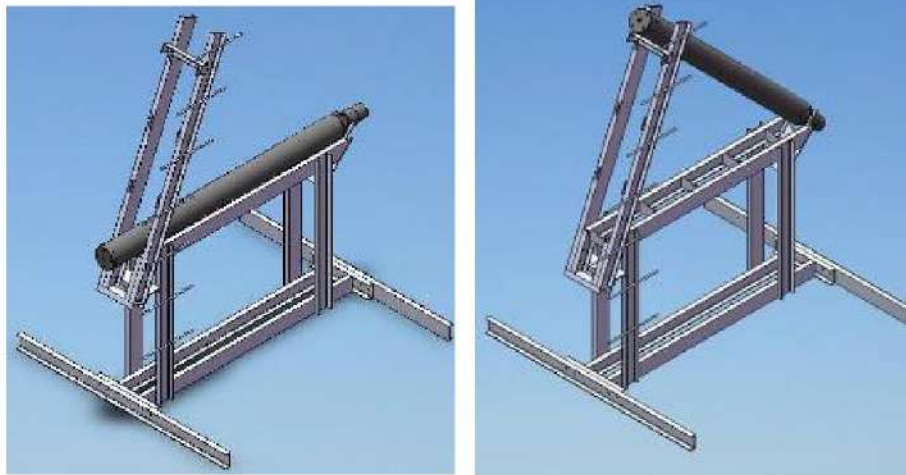


Figura 5-12 - Estrutura metálica para apoio do piezocone (berço) (Henriques Junior et al. 2010)

Havia naturalmente dúvidas quanto à eficácia tanto do lançamento – sobretudo se a queda se daria de fato na posição vertical – como da efetiva remoção do equipamento. Assim, no primeiro dia de testes da primeira campanha realizada em 2009 (designada no presente trabalho como campanha 0), dois lançamentos foram efetuados sem a instalação do piezocone no torpedo, com a utilização de uma peça robusta em seu local.

A operação de lançamento consistia nas seguintes etapas: i) fixação do cabo de aço de recuperação no torpedo; ii) içamento do torpedo e transporte, com descida até a posição em planta onde se desejava efetuar o lançamento; iii) levantamento do torpedo na posição vertical até a altura desejada de queda; iv) lançamento do equipamento e v) recuperação do equipamento. No que concerne ao lançamento, dois procedimentos foram utilizados: no primeiro lançamento utilizou-se o próprio sistema do guindaste, em sua velocidade máxima, e no segundo permitiu-se a queda livre, através do dispositivo denominado Peliquelo.

Uma vez que se verificou que os lançamentos funcionaram a contento, no dia posterior de ensaios o piezocone foi instalado no torpedo para início dos ensaios propriamente ditos. Ainda por medida de precaução, no primeiro dos ensaios neste dia empregou-se novamente o lançamento com o sistema do guindaste sem permitir a queda livre. Esta medida se revelou incorreta, uma vez que não se conseguiu adquirir os dados, já que o acionamento do dispositivo de leitura se dá quando o sistema de aquisição de dados registra uma variação de aceleração significativa, o que não ocorreu com o emprego do sistema do próprio guindaste. Nos ensaios seguintes (numerados 3, 4 e 5 da campanha 0) o Peliquelo foi utilizado, assim como nas outras campanhas, e os dados puderam ser adquiridos. Cabe salientar que mesmo com a atuação do vento (figura 5-13) o piezocone-torpedo teve queda praticamente na vertical, ao menos no que toca à capacidade de visualização humana. No presente trabalho, apenas os dados correspondentes ao acelerômetro relativo ao eixo vertical foram analisados.



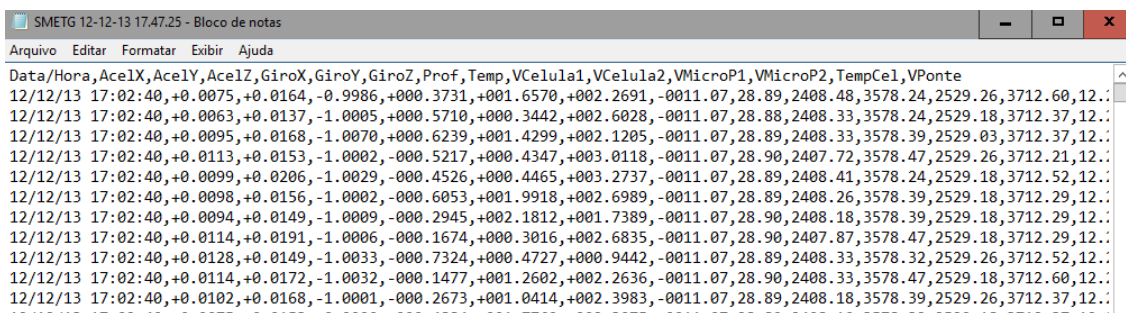
Figura 5-13 - Influência do vento nos lançamentos do piezocone-torpedo (Henriques Junior et al. 2010)

5.6. Interpretação realizada em 2009

O programa utilizado para aquisição dos dados fornece um arquivo de saída do tipo texto com as seguintes colunas:

- i) Data e hora
- ii) Aceleração em x
- iii) Aceleração em y
- iv) Aceleração em z
- v) Giro em x
- vi) Giro em y
- vii) Giro em z
- viii) Profundidade
- ix) Temp (temperatura medida no interior da garrafa)
- x) Vcélula 1 (tensão na célula de carga de atrito lateral)
- xi) Vcélula 2 (tensão na celula de carga de ponta)
- xii) VmicroP1 (tensão no transdutor de poro-pressão 1)
- xiii) VmicroP2 (tensão no transdutor de poro-pressão 2)
- xiv) TempCEL (temperatura no interior do cone)
- xv) V ponte (tensão de saída do sistema)

A figura 5-14 ilustra o aspecto do arquivo de saída de dados.



The image shows a screenshot of a text editor window titled "SMETG 12-12-13 17.47.25 - Bloco de notas". The window contains a table of data with 15 columns. The columns are: Data/Hora, AcelX, AcelY, AcelZ, GiroX, GiroY, GiroZ, Prof, Temp, Vcélula1, Vcélula2, VMicroP1, VMicroP2, TempCel, and VPonte. The data rows show values for each of these parameters over time, with some values in scientific notation.

Data/Hora	AcelX	AcelY	AcelZ	GiroX	GiroY	GiroZ	Prof	Temp	Vcélula1	Vcélula2	VMicroP1	VMicroP2	TempCel	VPonte
12/12/13 17:02:40	+0.0075	+0.0164	-0.9986	+000.3731	+001.6570	+002.2691	-0011.07	28.89	2408.48	3578.24	2529.26	3712.60	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0063	+0.0137	-1.0005	+000.5710	+000.3442	+002.6028	-0011.07	28.88	2408.33	3578.24	2529.18	3712.37	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0095	+0.0168	-1.0070	+000.6239	+001.4299	+002.1205	-0011.07	28.89	2408.33	3578.39	2529.03	3712.37	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0113	+0.0153	-1.0002	-000.5217	+000.4347	+003.0118	-0011.07	28.90	2407.72	3578.47	2529.26	3712.21	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0099	+0.0206	-1.0029	-000.4526	+000.4465	+003.2737	-0011.07	28.89	2408.41	3578.24	2529.18	3712.52	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0098	+0.0156	-1.0002	-000.6053	+001.9918	+002.6989	-0011.07	28.89	2408.26	3578.39	2529.18	3712.29	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0094	+0.0149	-1.0009	-000.2945	+002.1812	+001.7389	-0011.07	28.90	2408.18	3578.39	2529.18	3712.29	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0114	+0.0191	-1.0006	-000.1674	+000.3016	+002.6835	-0011.07	28.90	2407.87	3578.47	2529.18	3712.29	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0128	+0.0149	-1.0033	-000.7324	+000.4727	+000.9442	-0011.07	28.89	2408.33	3578.32	2529.26	3712.52	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0114	+0.0172	-1.0032	-000.1477	+001.2602	+002.2636	-0011.07	28.90	2408.33	3578.47	2529.18	3712.60	12.12	12.12
12/12/13 17:02:40	+0.0102	+0.0168	-1.0001	-000.2673	+001.0414	+002.3983	-0011.07	28.89	2408.18	3578.39	2529.26	3712.37	12.12	12.12

Figura 5-14 - Aspecto de saída de dados

O método de análise dos dados referente à obtenção da profundidade seguiu os seguintes passos:

- Obtinham-se os valores de A_z (valores brutos do acelerômetro) correspondentes ao trecho em que o piezocone se encontrava erguido pelo cabo, antes do lançamento.
- Calculava-se o valor de A_z médio nesse trecho, e que deveria corresponder ao valor -1, pela convenção utilizada.
- Calculava-se o valor do desvio desse valor médio (denominado **bias**) em relação ao valor unitário.
- Aplicava-se o valor do desvio (bias) a todos os valores de aceleração A_z , obtendo-se os valores de A_{z*} , que correspondem aos valores corrigidos.
- A aceleração no sistema SI é obtida como $a = A_{z*} \times 9,788$, sendo $9,788 \text{ m/s}^2$ a aceleração para a região do Sarapuí II.

Existem diferentes modos de integração como os que se seguem abaixo:

(a) Regra do Ponto Médio ou dos retângulos:

$$\int_a^b f(x)dx \simeq (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

(b) Regra Trapezoidal:

$$\int_a^b f(x)dx \simeq (b-a)\frac{f(a)+f(b)}{2}$$

(c) Regra de Simpson:

$$\int_a^b f(x)dx \simeq (b-a)\frac{f(a)+4f\left(\frac{a+b}{2}\right)+f(b)}{6}$$

Para a obtenção da velocidade a partir da aceleração, utilizou-se a regra trapezoidal. Sendo assim, foi calculada a integral da aceleração em função do tempo, seguida da integral dos dados de velocidade em função do tempo para o cálculo dos deslocamentos.

Alguns problemas foram identificados quando da interpretação dos dados. O primeiro diz respeito à frequência de aquisição, onde se verificou uma perda nas leituras no instante que o sistema realizava a mudança de frequência (como mencionado anteriormente, o

sistema foi programado para realizar leituras em 3 frequências distintas: 100 Hz antes do lançamento, 1000 Hz na queda livre e penetração e 10 Hz após a penetração). Outro problema verificado diz respeito à capacidade do acelerômetro que era de 5 g na ocasião. Pode-se verificar que este atingiu sua capacidade máxima em todos os ensaios, no primeiro (ensaio 3) este fato ocorreu antes mesmo da soltura do piezocone.

Esses resultados foram exaustivamente analisados na ocasião. Efetuou-se a contagem das leituras para cada segundo, durante todo o ensaio e para todos os ensaios. A partir dos valores obtidos adotou-se a frequência que melhor se adequava ao ensaio. A tabela 5-3 mostra um resumo das frequências utilizadas na interpretação dos ensaios realizados em 2009, distintos do que havia sido planejado.

Tabela 5-3 – Resumo das frequências utilizadas

Ensaio (2009)	Frequência utilizada
03	500Hz
04	Até 5s - 100Hz de 5s a 16s - 800Hz de 17s a 305s – 10Hz
05	Até 5s - 100Hz de 5s a 16s - 800Hz de 17s a 160s – 10Hz

A figura 5-15 mostra a aceleração versus tempo de todo o ensaio 3 e as figuras 5-16, 5-17 e 5-18 mostram o gráfico de aceleração, velocidade e deslocamento versus tempo respectivamente do ensaio 3, desde a queda livre até a saturação da aceleração em -5g.

As leituras são corrigidas de forma que -1 g seja o trecho de velocidade zero e 0 g o de queda livre. O acelerômetro mede então na faixa de 0 a -5g, onde g se refere à aceleração da gravidade. Após o início da queda, qualquer variação nas leituras de aceleração de zero a qualquer múltiplo de -g refere-se a uma força externa atuando sobre o piezocone

torpedo, que pode ser vista de outra maneira ao se fazer a mudança para um referencial externo ao torpedo. Com isso os valores de 0 g são equivalentes a $9,788 \text{ m/s}^2$, -1 g equivalentes a 0 m/s^2 , e os valores menores que -1 g são acelerações negativas e que, portanto, fazem com que a velocidade do piezocone torpedo diminua até zero.

No ensaio 3 houve uma saturação do acelerômetro antes da soltura (figura 5-15). Foi realizada a primeira integral da aceleração e obtida a velocidade desde o início das leituras, acarretando em uma velocidade inicial de soltura negativa em 1000 ms (figura 5-17). Sabe-se que tal fato não é real, porém são apresentados nesse item os problemas enfrentados na época, que foram solucionados nas outras campanhas. Por decorrência das integrações realizadas anteriormente os resultados de deslocamento também foram afetados para o ensaio 3 da campanha de 2009 (figura 5-18).

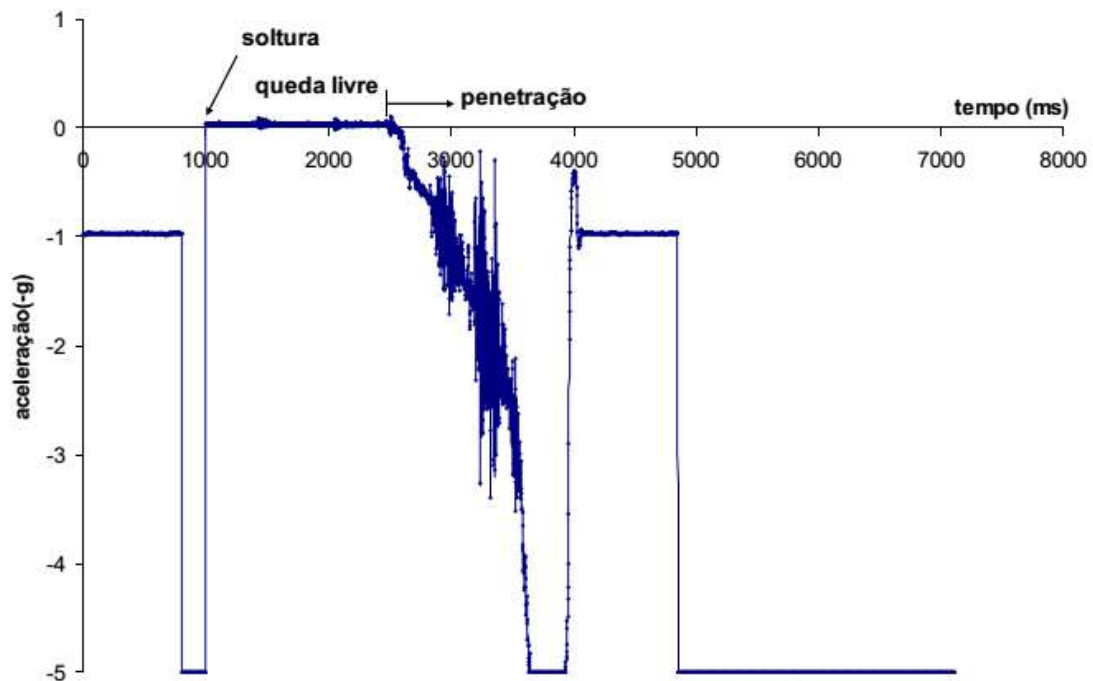


Figura 5-15 – Aceleração versus tempo, ensaio 3 (Danziger et al. 2008)

O início da penetração indicado na figura a seguir é identificado através das leituras de resistência de ponta, ou seja, o tempo “t” onde ocorre uma variação na resistência de ponta é atribuído como o tempo “t” de início de cravação para as demais leituras.

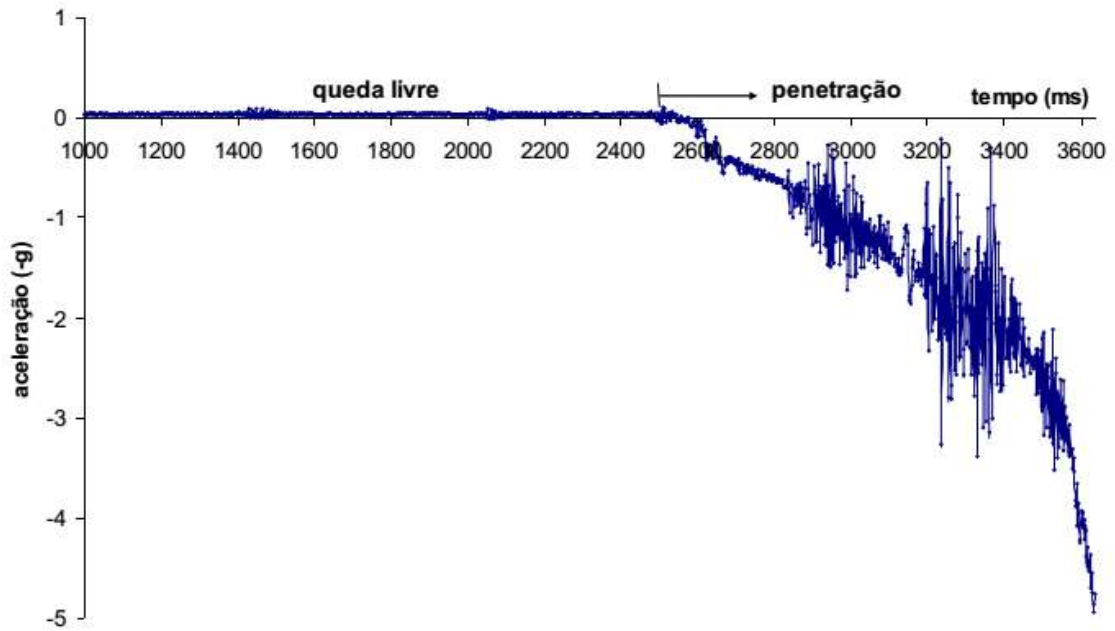


Figura 5-16– Aceleração versus tempo do ensaio 3 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

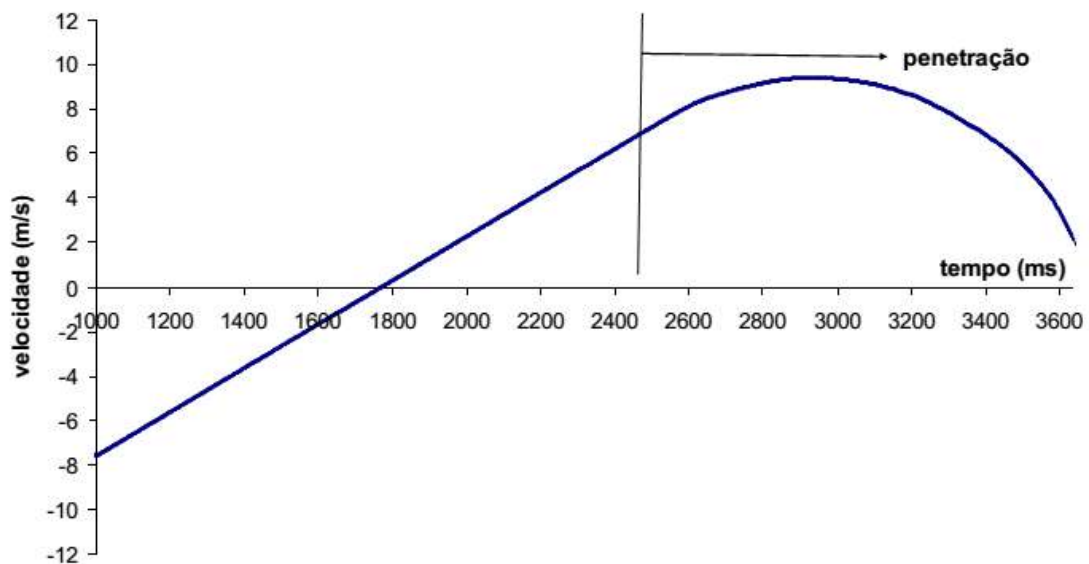


Figura 5-17- Velocidade versus tempo do ensaio 3 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

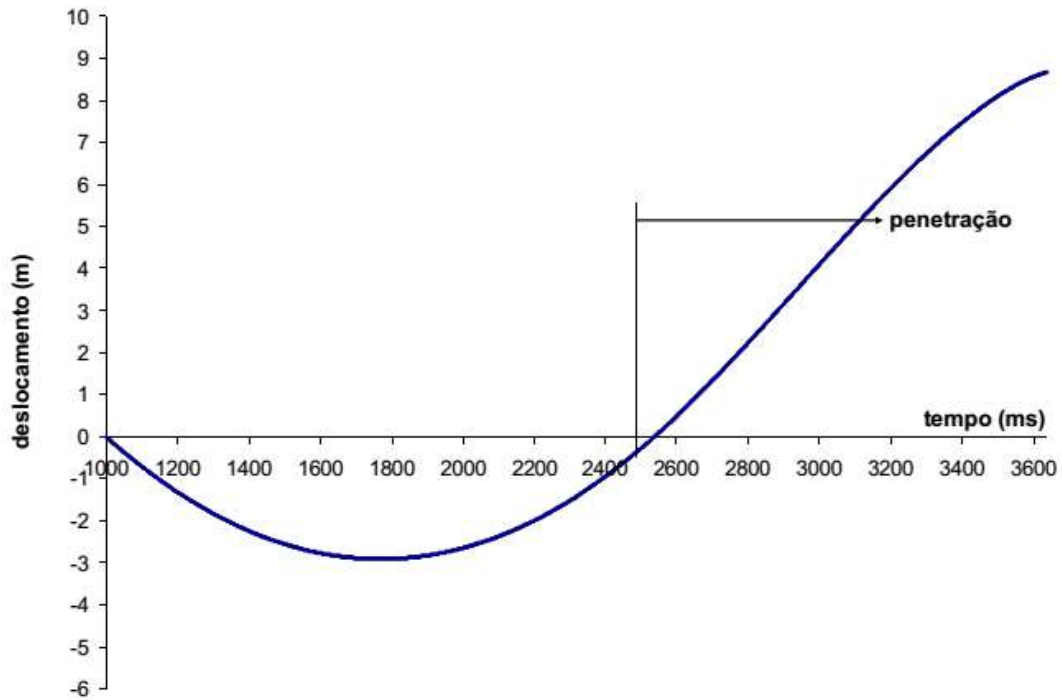


Figura 5-18– Deslocamento versus tempo do ensaio 3 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

A figura 5-19 mostra o gráfico de aceleração versus tempo em todo o ensaio 4, e as figuras 5-20, 5-21 e 5-22 mostram a aceleração, a velocidade e o deslocamento versus tempo desde a queda livre até a saturação da aceleração em -5g.

A indicação do início da penetração foi realizada a partir da mesma metodologia indicada para o ensaio anterior.

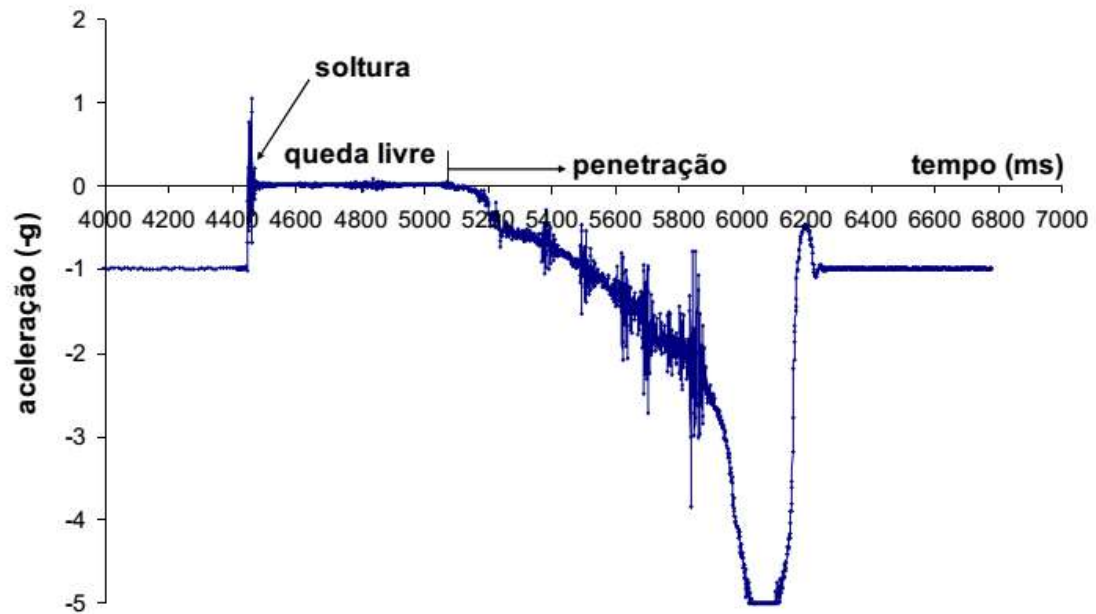


Figura 5-19– Aceleração versus tempo, ensaio 4 (Danziger et al. 2008)

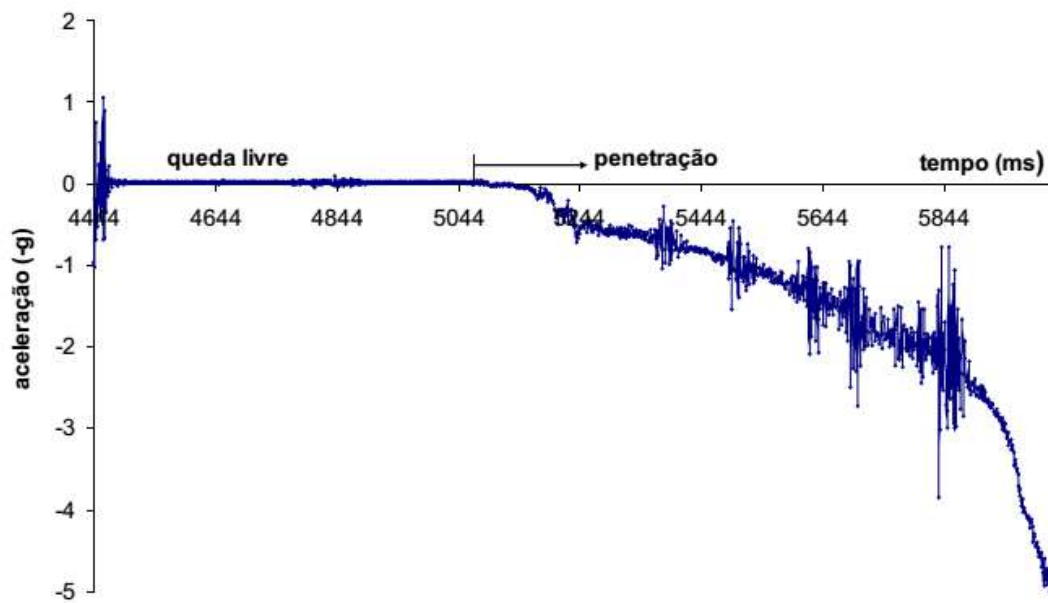


Figura 5-20– Aceleração versus tempo do ensaio 4 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

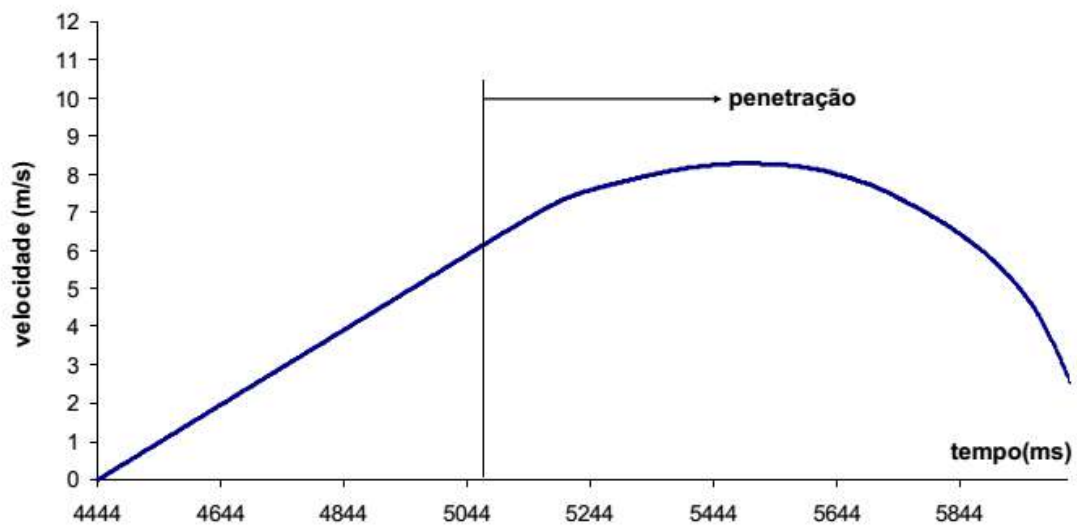


Figura 5-21 – Velocidade versus tempo do ensaio 4 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

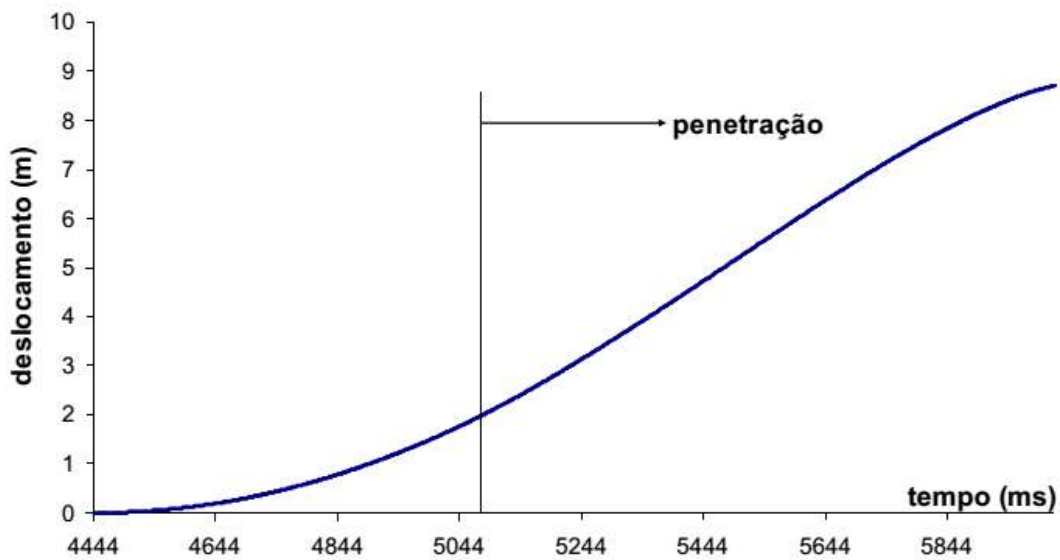


Figura 5-22 – Deslocamento versus tempo do ensaio 4 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

A figura 5-23 mostra o gráfico de aceleração versus tempo em todo o ensaio 5, e as figuras 5-24, 5-25 e 5-26 mostram a aceleração, a velocidade e o deslocamento versus tempo desde a queda livre até a saturação da aceleração em -5g.

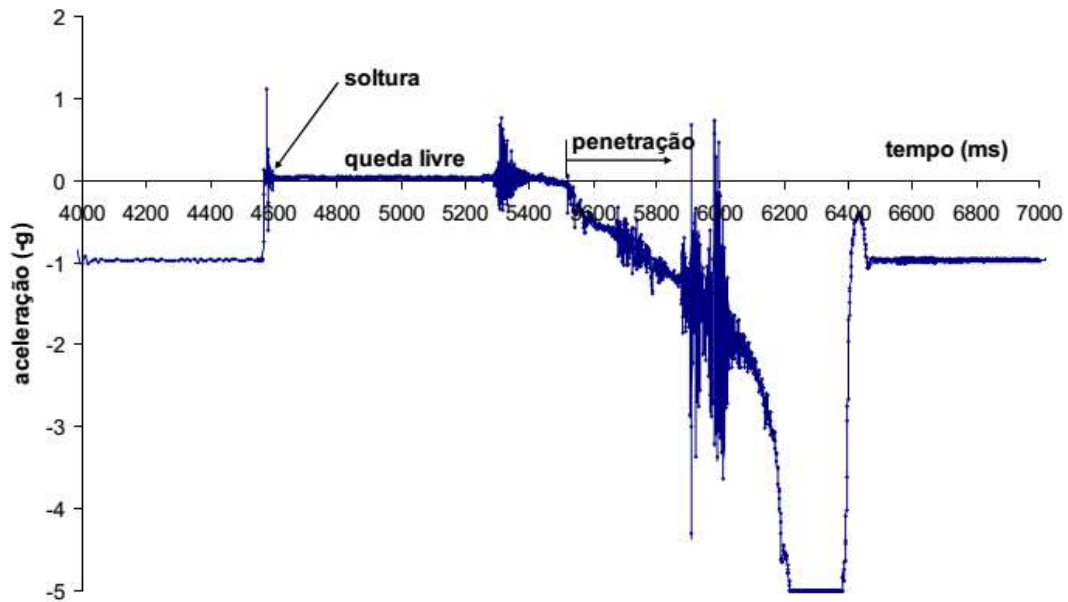


Figura 5-23 – Aceleração versus tempo, ensaio 5 (Danziger et al. 2008)

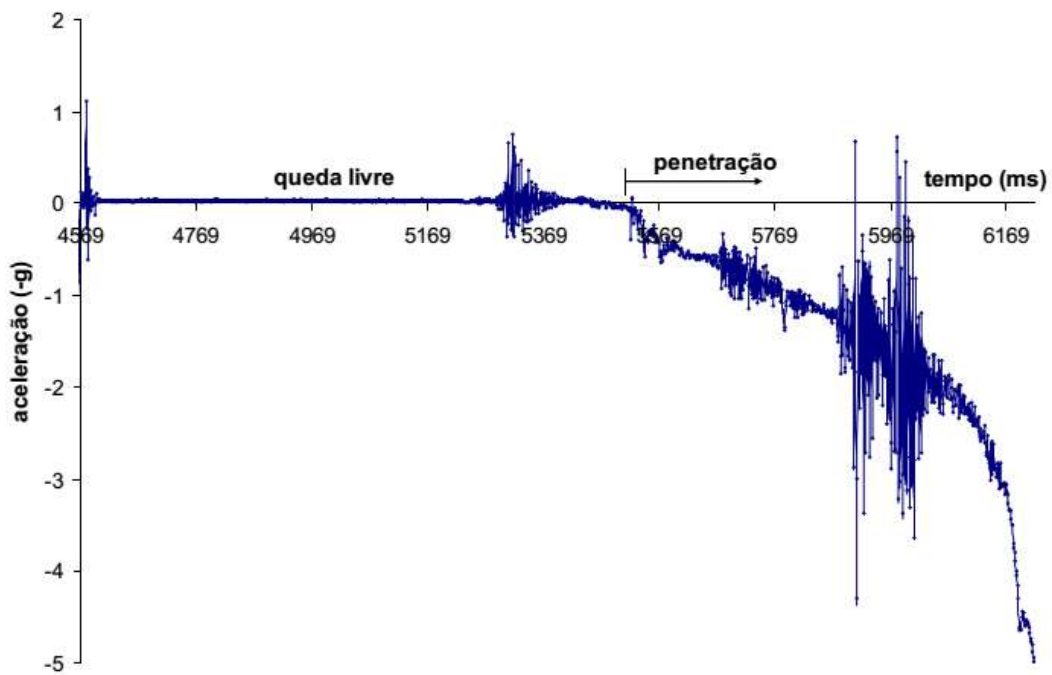


Figura 5-24 – Aceleração versus tempo do ensaio 5 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

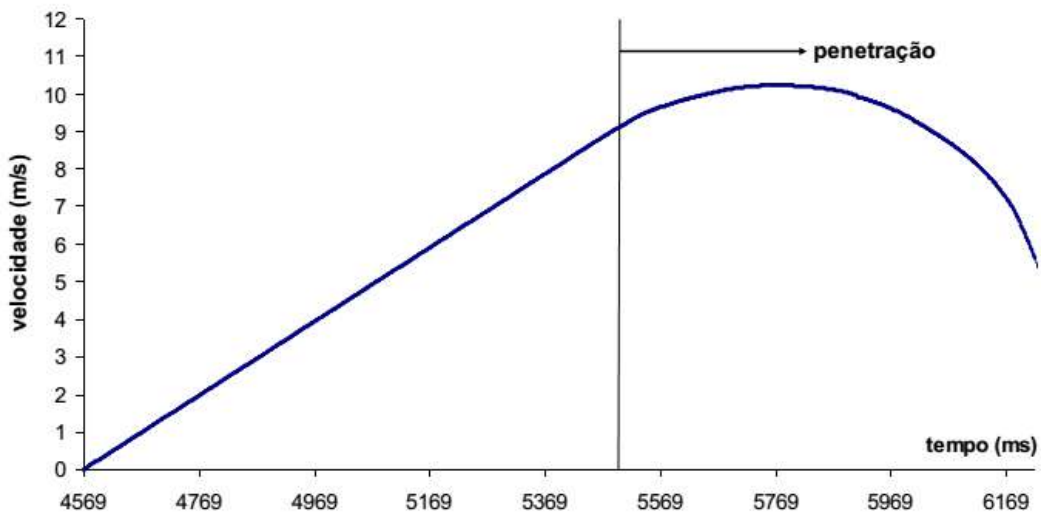


Figura 5-25 – Velocidade versus tempo do ensaio 5 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

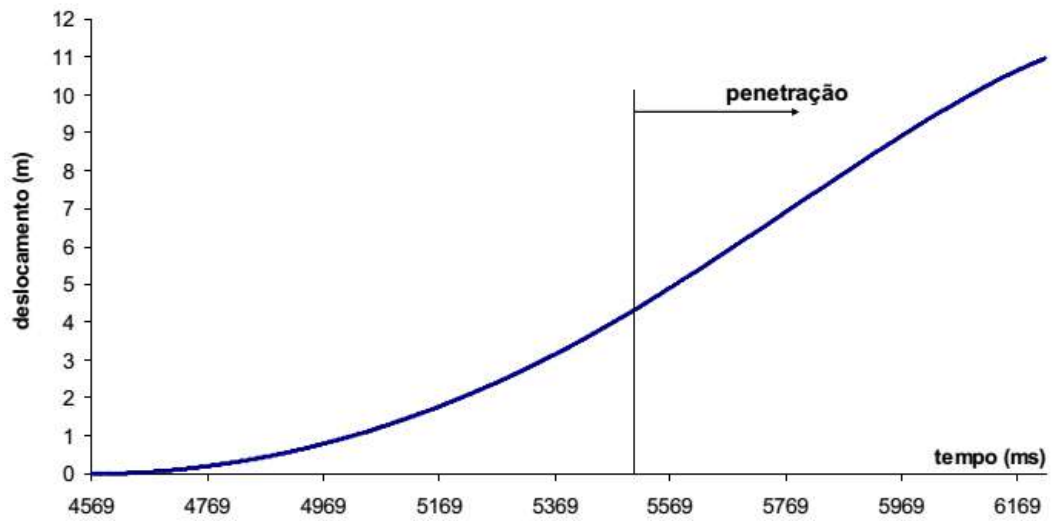


Figura 5-26 – Deslocamento versus tempo do ensaio 5 desde o início do processo de queda livre até a “saturação” da aceleração em -5 g (Danziger et al. 2008)

A figura 5-27 mostra a resistência de ponta, o atrito lateral e a poro-pressão u_1 e u_2 obtidas em função da profundidade.

A partir dos ensaios de 2009 vários questionamentos surgiram em relação à confiabilidade da profundidade obtida durante o ensaio, problemas referentes à mudança de frequência e contagem do tempo passaram a ser estudados, o que deu início ao estabelecimento de um novo método de tratamento dos dados o qual foi aplicado nos seguintes ensaios que serão apresentados a seguir. Problemas relacionados à saturação durante a transição da camada mole para a mais resistente e também os referentes à perda de leituras durante a mudança de frequência foram solucionados nas campanhas seguintes.

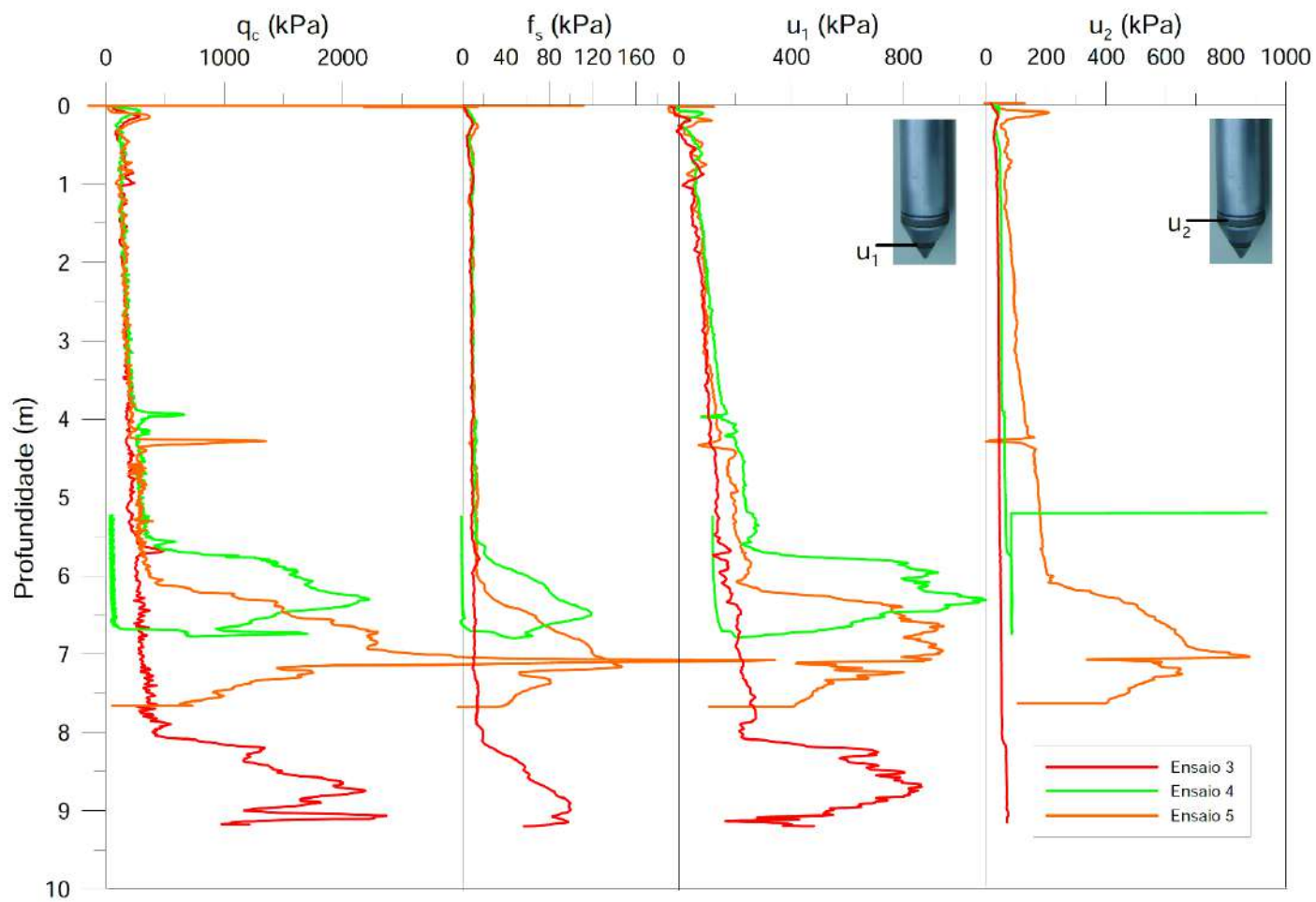


Figura 5-27 – Resistência de ponta q_c , Atrito lateral f_s , Poro-pressão u_1 e u_2 versus profundidade dos ensaios realizados

6. As campanhas de 2013 e 2014

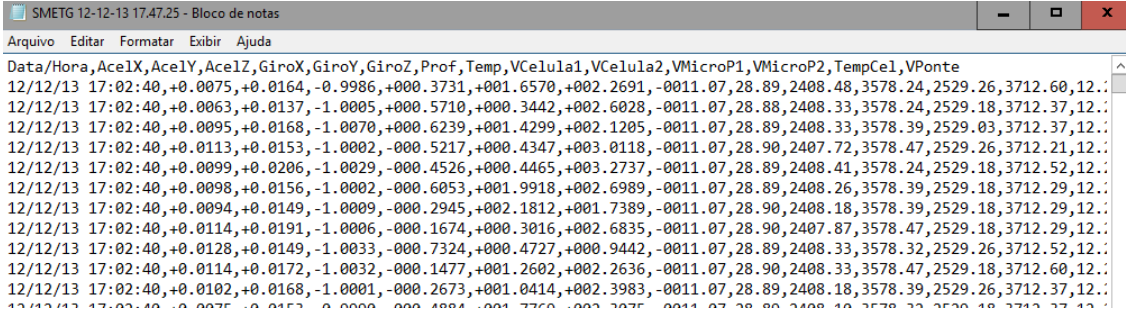
6.1. Generalidades

A campanha de 2013 foi realizada após a modificação da garrafa (sistema de aquisição de dados) efetuada pela NavCom, com o intuito de se verificar se o sistema estava funcionando adequadamente, uma vez que se constataram, na campanha de 2009, problemas referentes à perda de leituras durante a mudança de frequência. Uma vez que os resultados da campanha de 2013 apresentaram valores contraditórios da resistência de ponta e que aparentemente o problema com o sistema de aquisição de dados não estava completamente sanado, fez-se necessário a realização de uma outra campanha em 2014. A campanha de 2014 só foi realizada após a garrafa ser enviada novamente à NavCom para um novo ajuste no sistema de aquisição, uma vez que após a realização de vários testes foi verificado que este não ainda não funcionava adequadamente.

O programa utilizado para aquisição dos dados é o mesmo dos ensaios realizados em 2009, fornece um arquivo de saída do tipo texto com as seguintes colunas:

- i) Data e hora
- ii) Aceleração em x
- iii) Aceleração em y
- iv) Aceleração em z
- v) Giro em x
- vi) Giro em y
- vii) Giro em z
- viii) Profundidade
- ix) Temp (temperatura medida no interior da garrafa)
- x) Vcélula 1 (tensão na célula de carga de atrito lateral)
- xi) Vcélula 2 (tensão na célula de carga de ponta)
- xii) Vmicrop1 (tensão no transdutor de poro-pressão 1)
- xiii) Vmicrop2 (tensão no transdutor de poro-pressão 2)
- xiv) TempCEL (temperatura no interior do cone)
- xv) V ponte (tensão de saída do sistema)

A figura 6-1 ilustra o aspecto do arquivo de saída de dados.



The screenshot shows a text editor window titled "SMETG 12-12-13 17.47.25 - Bloco de notas". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Formatar", "Exibir", and "Ajuda". The main text area contains a header row: "Data/Hora,Ace1X,Ace1Y,Ace1Z,GiroX,GiroY,GiroZ,Prof,Temp,VCelula1,VCelula2,VMicroP1,VMicroP2,TempCel,VPonte". Below the header are several rows of data, each starting with a date and time (e.g., "12/12/13 17:02:40") followed by 13 numerical values separated by commas. The values represent various sensor readings such as acceleration, rotation, and temperature.

Figura 6-1 - Aspecto de saída de dados

O método de análise dos dados referente à obtenção da profundidade seguiu os seguintes passos:

- Obtinham-se os valores de A_z (valores brutos do acelerômetro)
- Ao invés de se obter o **bias** para a situação antes do lançamento, obtinha-se a média da aceleração em queda livre, que teoricamente deveria ser zero (na leitura do acelerômetro)
- O restante dos procedimentos foi semelhante ao caso de 2009.

6.2. Método de tratamento dos dados

Uma vez que houve dúvidas quanto à contagem do tempo do sistema de aquisição de dados da garrafa do piezocone torpedo, a empresa que a fabricou (NavCom) foi contactada em 2014 (antes da realização da segunda campanha de ensaios), pois verificou-se que o erro associado à contagem do tempo permanecia. Foi verificado pela própria empresa que o sistema não registrava o tempo corretamente, o que era motivado pela questão de mudança de frequência de 100Hz para 1000Hz no início da aquisição dos dados. Com essa informação, e de modo a se tentar salvar os resultados dos ensaios efetuados, o engenheiro Silvio Pinheiro Silva Júnior (Grom-eng.) sugeriu uma correção do tempo, levando em consideração as condições de contorno conhecidas:

- antes da soltura do peliquelo a velocidade e o deslocamento são nulos, e a aceleração é -1g de acordo com a convenção do sistema de aquisição de dados.
- ao término da penetração a velocidade é nula, o deslocamento obtido com a dupla integração da aceleração deve ser próximo ao medido com o cabo de segurança/içamento graduado.

O engenheiro Claudio Amaral (PETROBRAS) apresentou uma solução para o caso da saturação dos acelerômetros (em -5g), e que veio a ser muito útil para a análise dos ensaios em que a saturação ocorreu.

Cabe salientar que nos ensaios em que ocorreu saturação dos acelerômetros adotou-se o mesmo procedimento sugerido pelo engenheiro Silvio, exceto por dois pontos:

- a) Ajuste nos tempos (no exato momento em que houve a mudança da taxa de amostragem);
- b) Ajuste do sinal que ocorreu a saturação (nível máximo do acelerômetro excedido).

No caso (a), o procedimento sugerido pelo engenheiro Silvio não podia ser seguido, uma vez que, em função da saturação, a integração após esta etapa gera valores incorretos de

velocidade. Assim, seguiu-se o processo sugerido pelo engenheiro Claudio Amaral, que estabeleceu duas equações, a duas incógnitas:

$x + y =$ número de leituras realizadas no exato momento em que houve a mudança de frequência de 100 Hz para 1000 Hz;

$$x/100 + y/1000 = 1$$

Sendo:

$x =$ número de leituras feitas com frequência de 100 Hz em 1 s.

$y =$ número de leituras feitas com frequência de 1000 Hz no intervalo de 1 s.

Esse processo, conceitualmente correto, poderia ter sido empregado em todos os ensaios. Porém, ele parte da hipótese de que o segundo em que houve a variação de frequência foi medido corretamente. Uma comparação entre os dois critérios mostra que essa hipótese não é verdadeira, mas sem dúvida é a melhor possível diante dos dados disponíveis.

No caso (b), relativo à aceleração no trecho de saturação, adotou-se um dos procedimentos – sugeridos pelo engenheiro Claudio Amaral – de obter, por tentativas, um único valor de aceleração em todo o trecho com saturação, de modo a se conseguir a velocidade igual a zero ao final da penetração.

6.3. Ensaio realizados em 2013

Foram realizados em 2013 sete ensaios de piezocone torpedo. Os resultados em função do tempo são apresentados graficamente no item 5.3.1, onde são abordados todos os ensaios desta campanha designada primeira campanha no presente trabalho. Para cada ensaio são apresentados os gráficos de aceleração, velocidade, deslocamento, resistência de ponta, q_c , atrito lateral, f_s , poro-pressão na face do cone, u_1 , e poro-pressão na base do cone, u_2 versus tempo.

A tabela 6-1 mostra os ensaios realizados com os respectivos tempos de soltura, início e final de penetração, empregados para a obtenção dos resultados. Na simbologia do ensaio, acrescentou-se ao número do ensaio a campanha correspondente. Assim, o ensaio designado Tor-CPTU 1/1 é o primeiro ensaio da primeira campanha.

Tabela 6-1 – Ensaios realizados com os respectivos tempos de soldura, início e final de penetração.

Ensaio	Data	Tempo de		
		Soldura (ms)	Início de penetração (ms)	Fim de penetração (ms)
Tor-CPTU1/1	22/11/2013	4680	5263	6280
Tor-CPTU2/1	12/12/2013	4730	5086	6380
Tor-CPTU3/1	13/12/2013	4560	4940	6164
Tor-CPTU4/1	13/12/2013	4700	5250	6450
Tor-CPTU5/1	13/12/2013	4740	5455	6567
Tor-CPTU6/1	13/12/2013	4660	5430	6280
Tor-CPTU7/1	13/12/2013	4780	5732	6660

6.3.1. Resultados dos ensaios em função do tempo

Os resultados da campanha 1 de 2013 dos 7 ensaios de piezocone torpedo são apresentados nas figuras 6-2, 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, 6-7 e 6-8 apresentando: (a) aceleração versus tempo; (b) velocidade versus tempo; (c) deslocamento versus tempo; (d) resistência de ponta versus tempo; (e) atrito lateral versus tempo; (f) poro-pressão u_1 versus tempo; (g) poro-pressão u_2 versus tempo.

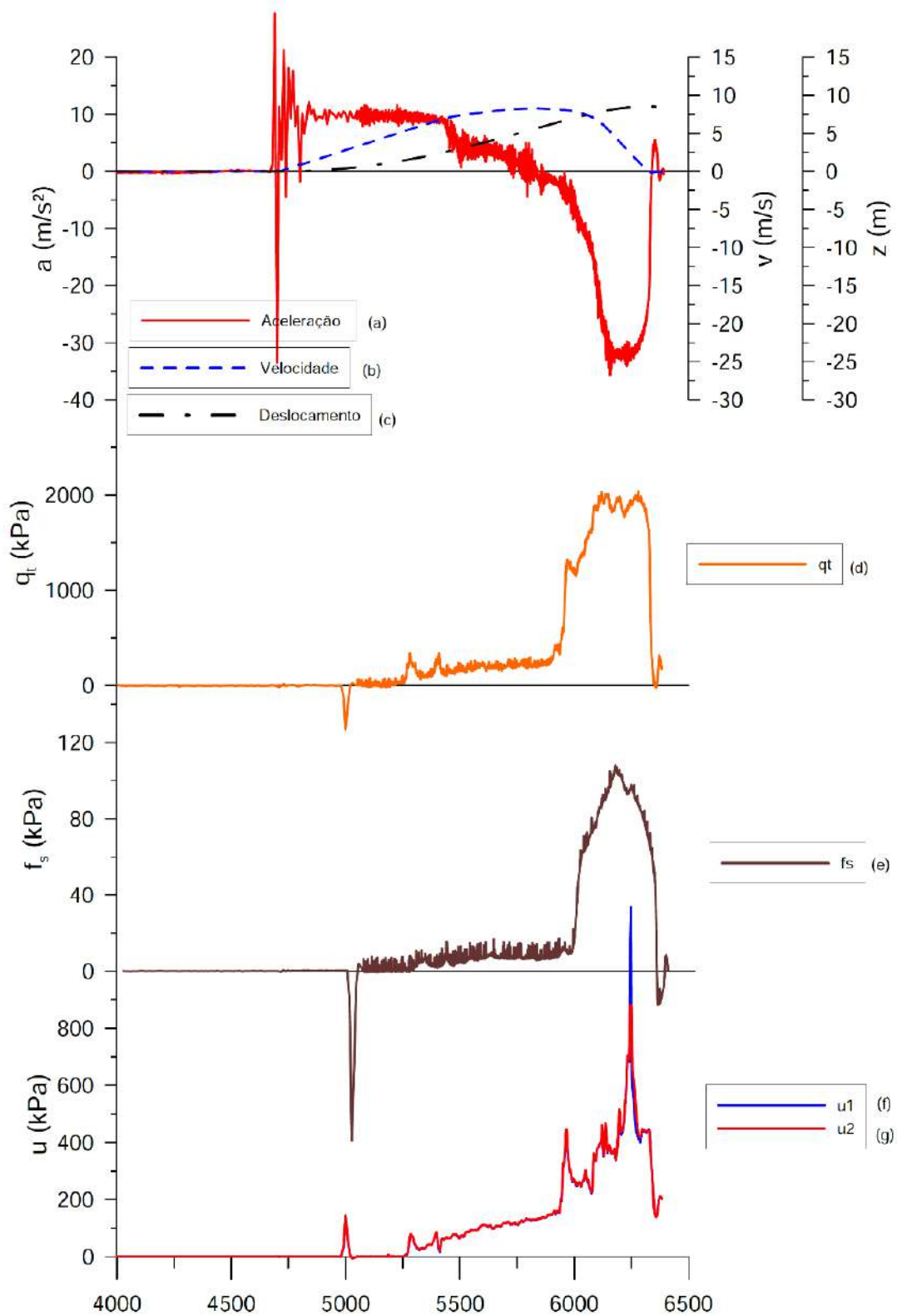


Figura 6-2 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 1/1

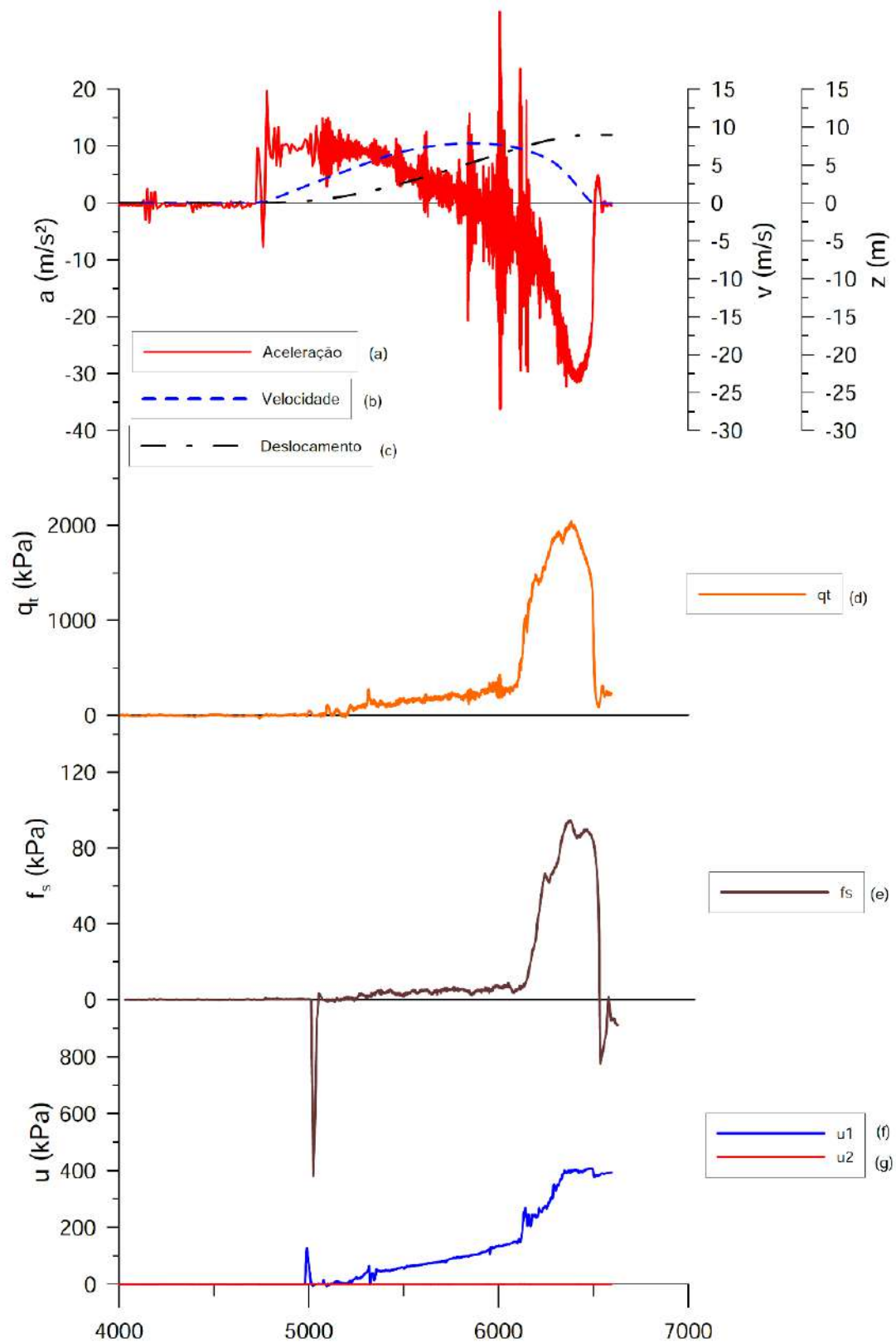


Figura 6-3 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 2/1

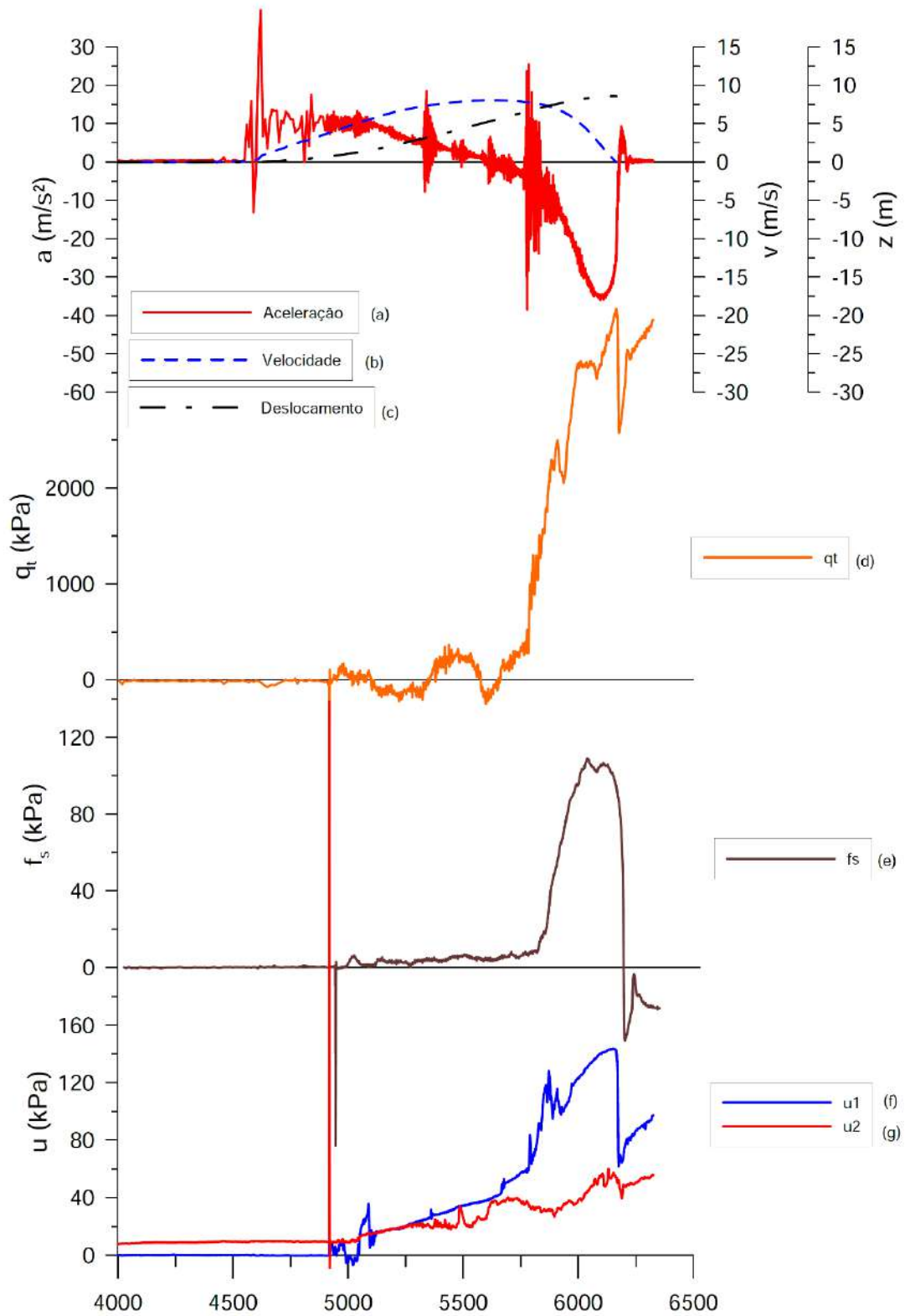


Figura 6-4 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 3/1

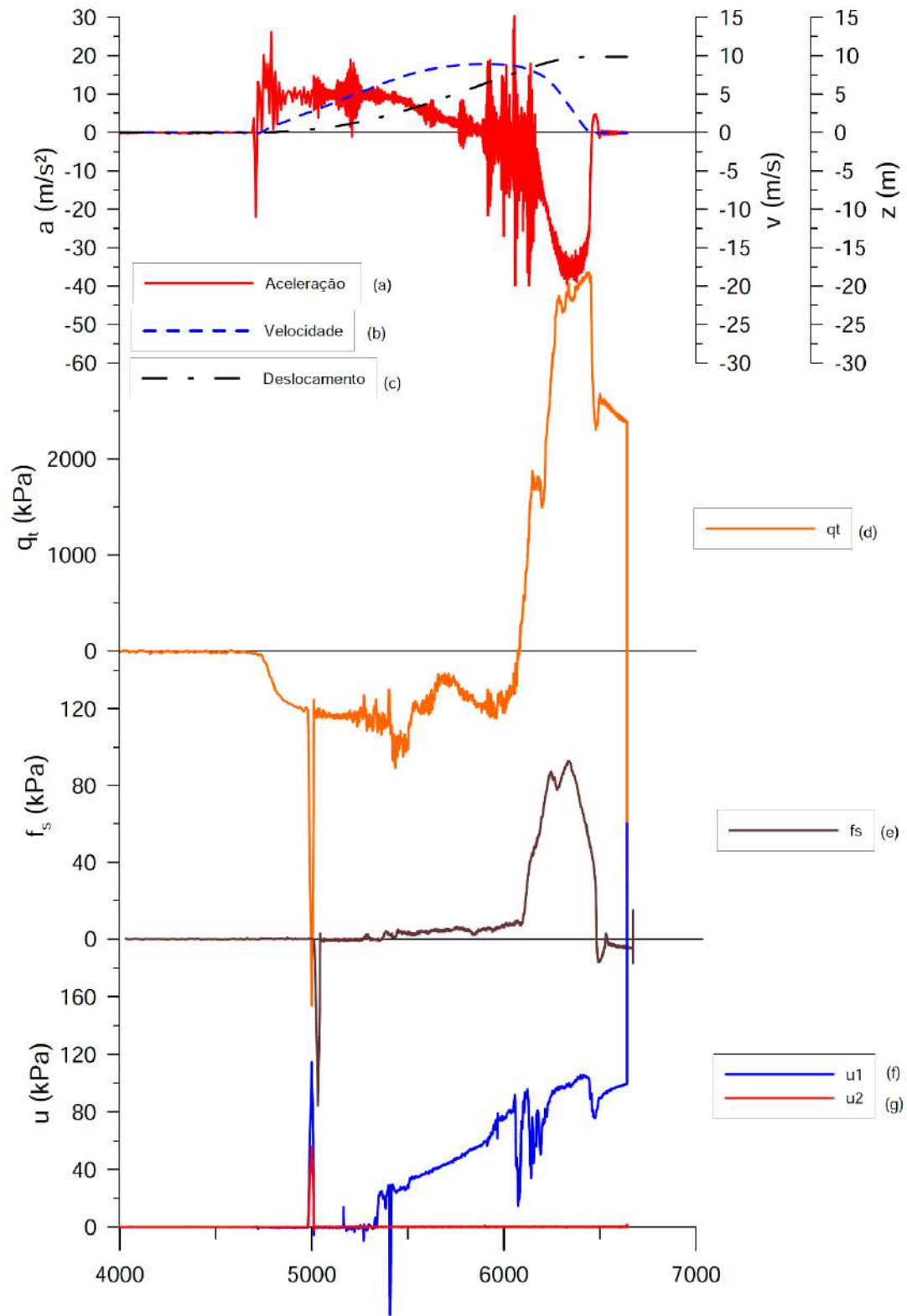


Figura 6-5 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 4/1

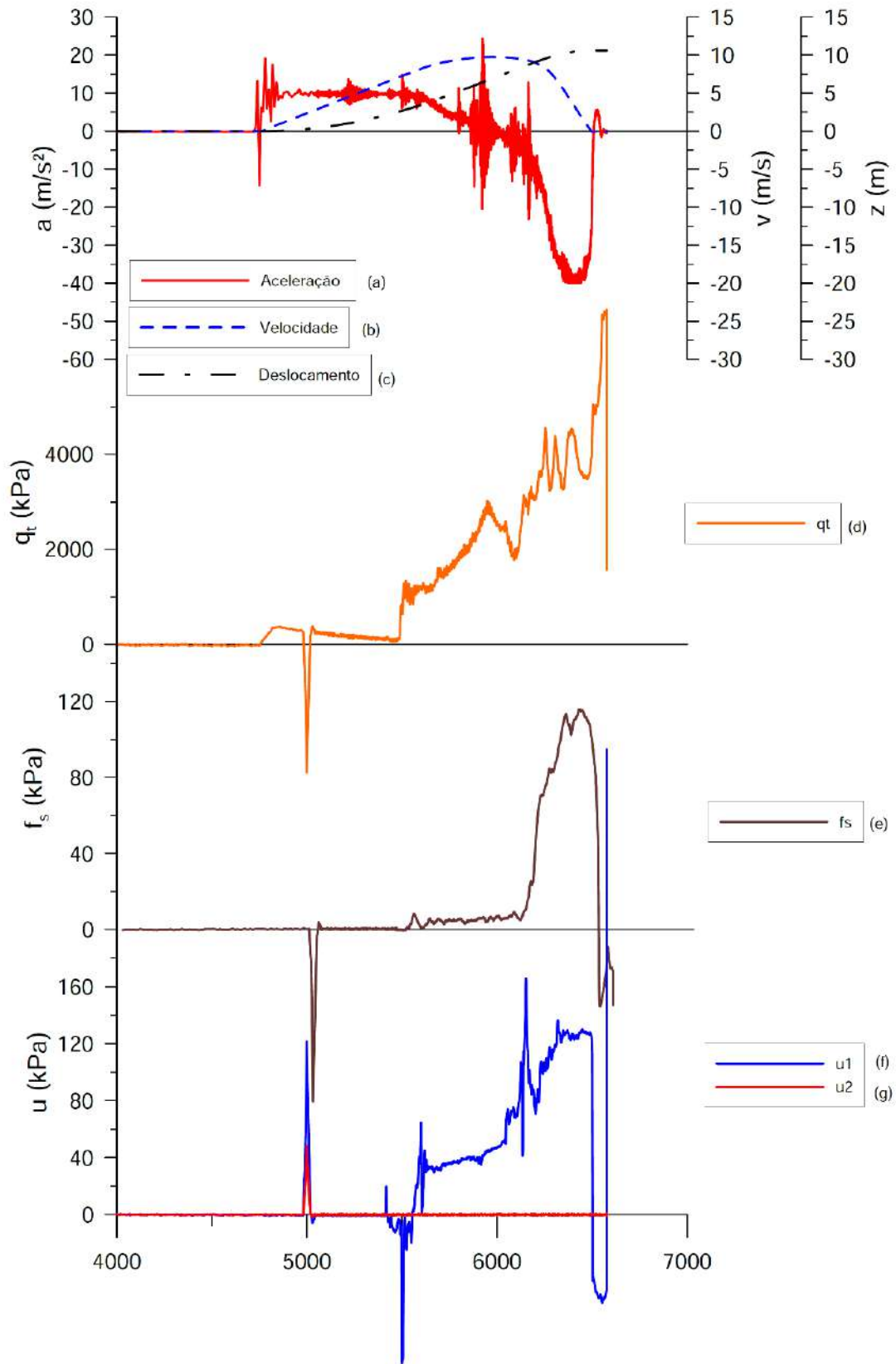


Figura 6-6 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 5/1

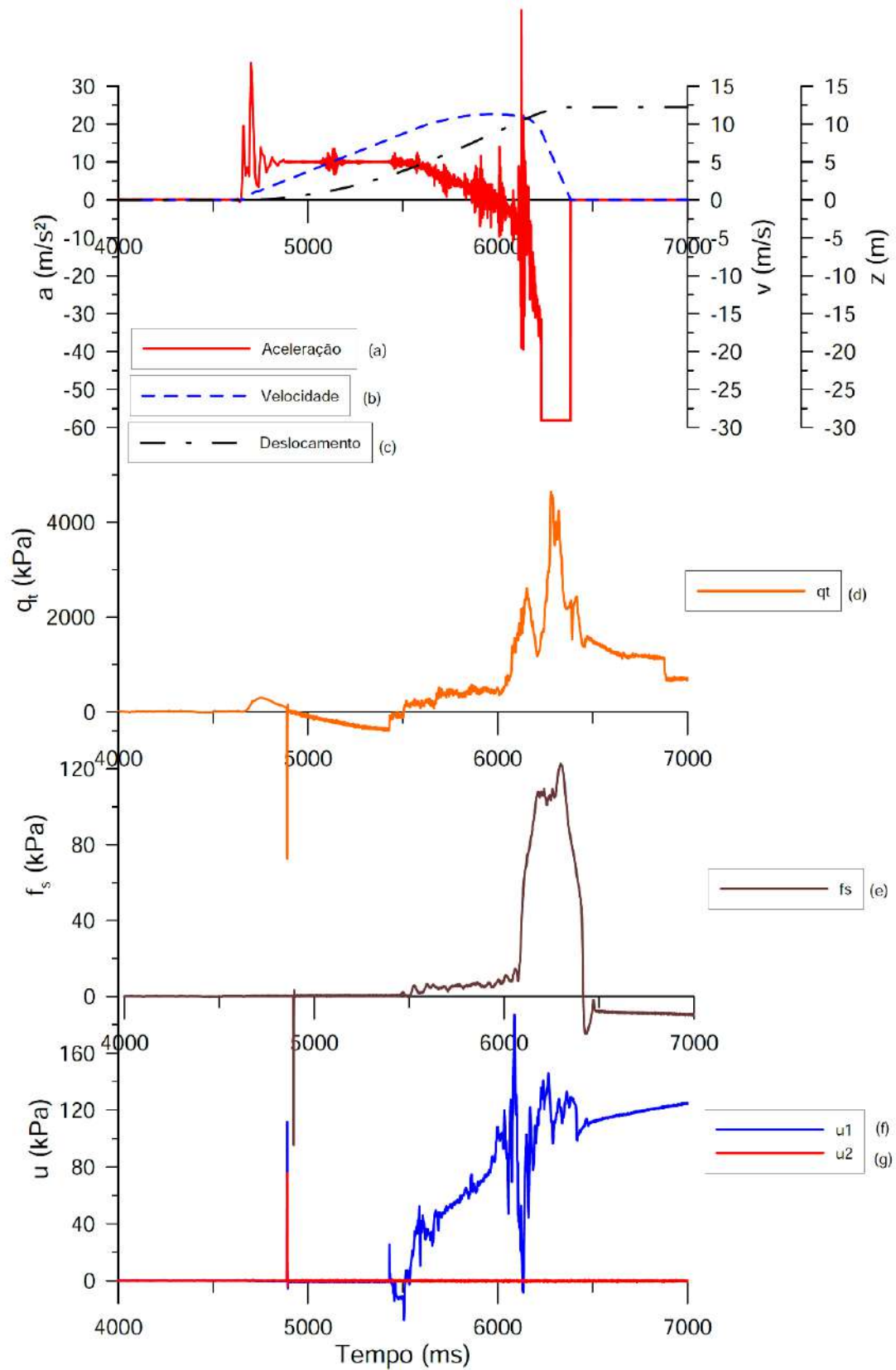


Figura 6-7 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 6/1

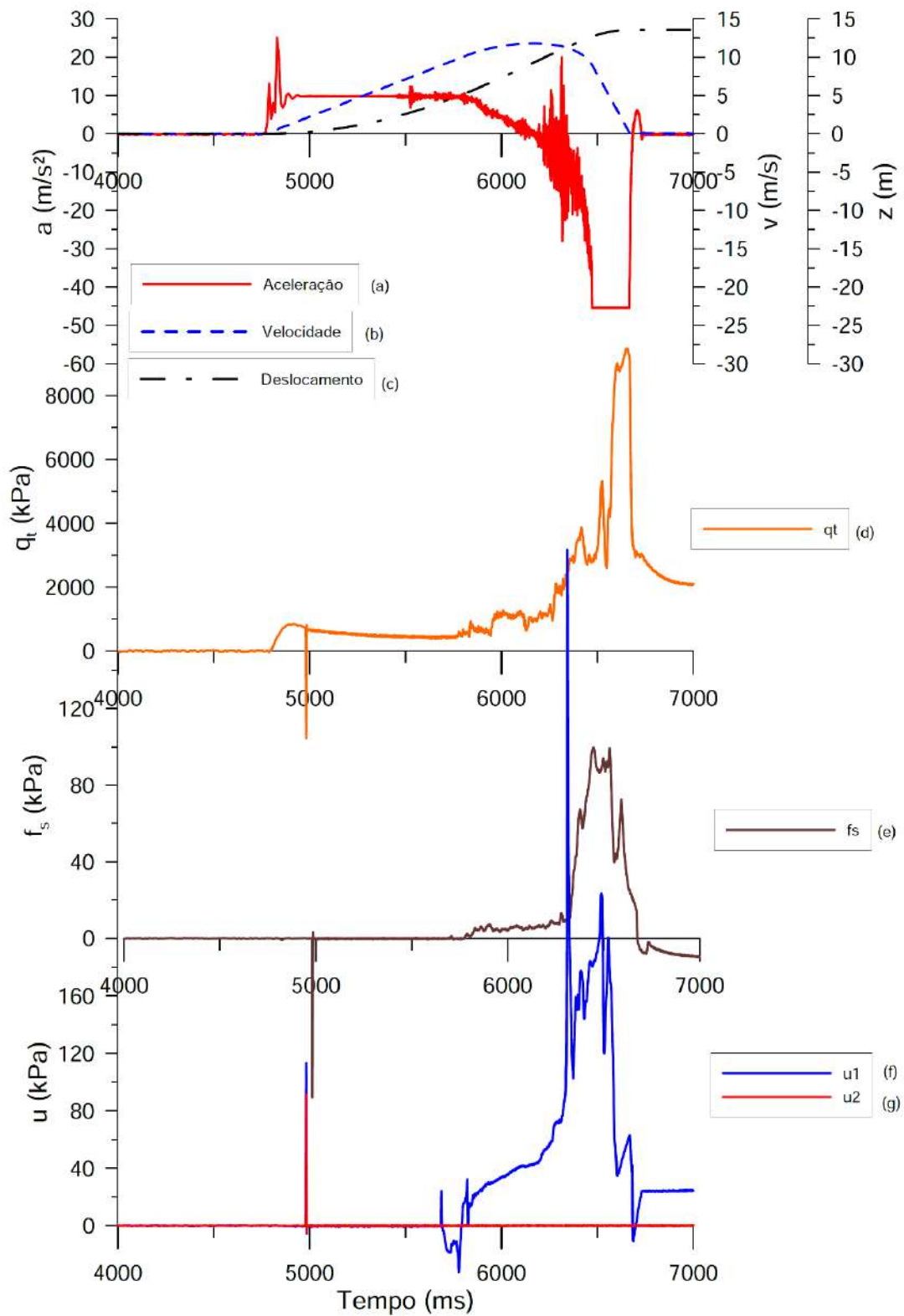


Figura 6-8 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 7/1

6.4. Ensaio realizados em 2014

Foram realizados em 2014 seis ensaios de piezocone torpedo. Os resultados em função do tempo são apresentados graficamente no item 5.4.1, onde são abordados todos os ensaios desta campanha, designada segunda campanha no presente trabalho. Para cada ensaio são apresentados os gráficos de aceleração, velocidade, deslocamento, resistência de ponta, q_c , atrito lateral, f_s , poro-pressão na face do cone, u_1 , e poro-pressão na base do cone, u_2 versus tempo.

A tabela 6-2 mostra os ensaios realizados com os respectivos tempos de soltura, início e final de penetração, empregados para a obtenção dos resultados da segunda campanha de ensaios. Na simbologia do ensaio, da mesma forma que anteriormente, acrescentou-se ao número do ensaio a campanha correspondente. Assim, o ensaio designado Tor-CPTU 1/2 é o primeiro ensaio da segunda campanha.

Tabela 6-2– Ensaio realizados com os respectivos tempos de soltura, início e final de penetração, segunda campanha .

Ensaio	data	Tempo de		
		soltura (ms)	início de penetração (ms)	fim de penetração (ms)
Tor-CPTU 1 /2	27/08/2014	387	726	2458
Tor-CPTU2 /2	27/08/2014	375	852	2442
Tor-CPTU3 /2	27/08/2014	401	1035	2484
Tor-CPTU4 /2	28/08/2014	394	1179	2460
Tor-CPTU5 /2	28/08/2014	413	1312	2484
Tor-CPTU6 /2	28/08/2014	377	713	2157

6.4.1. Resultados dos ensaios em função do tempo dos ensaios da segunda campanha

Os resultados da campanha 2 de 2014 dos 6 ensaios de piezocone torpedo são apresentados nas figuras 6-9, 6-10, 6-11, 6-12, 6-13 e 6-14 apresentando: (a) aceleração versus tempo; (b) velocidade versus tempo; (c) deslocamento versus tempo; (d) resistência de ponta versus tempo; (e) atrito lateral versus tempo; (f) poro-pressão u_1 versus tempo; (g) poro-pressão u_2 versus tempo.

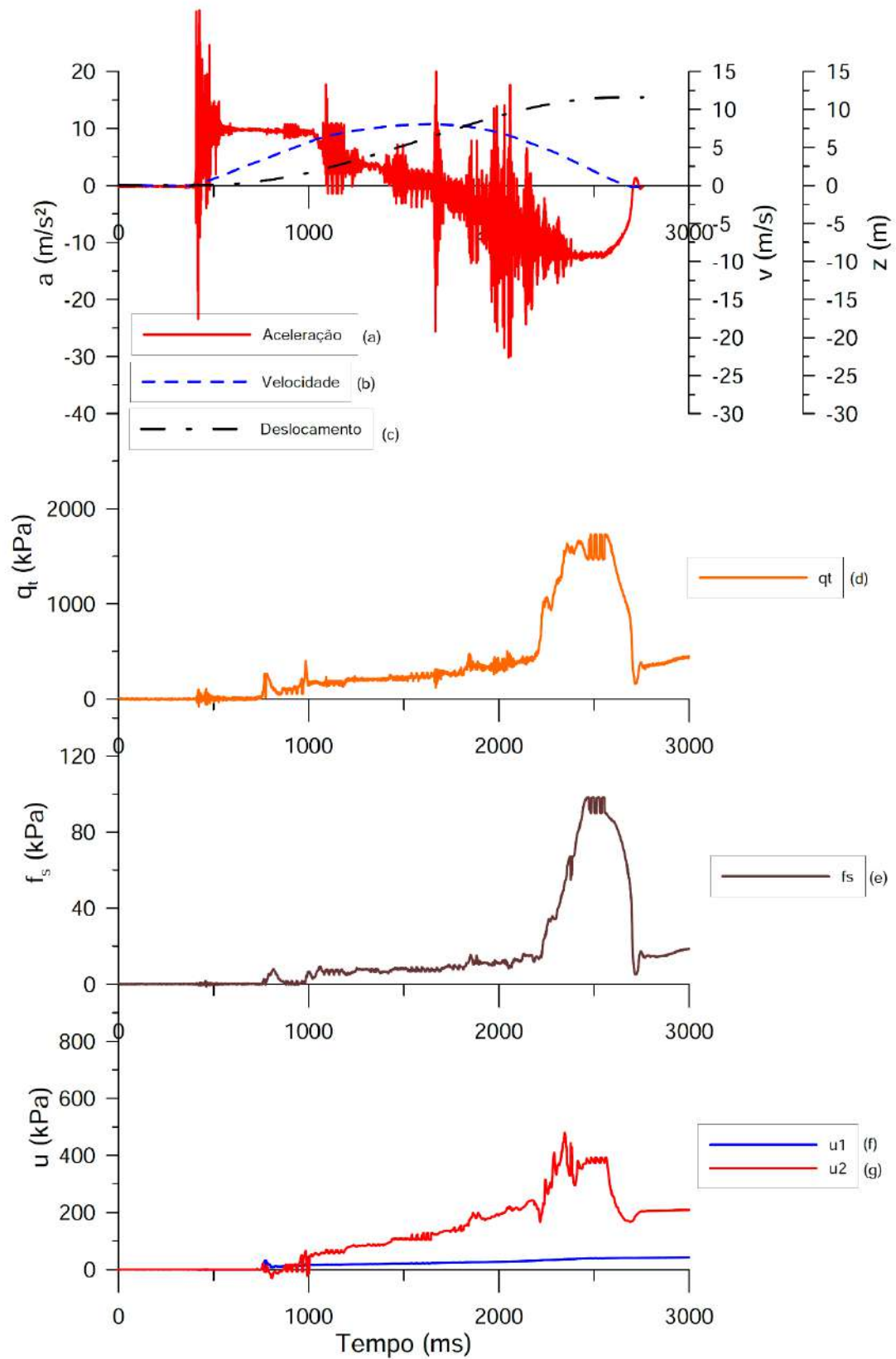


Figura 6-9 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 1/2

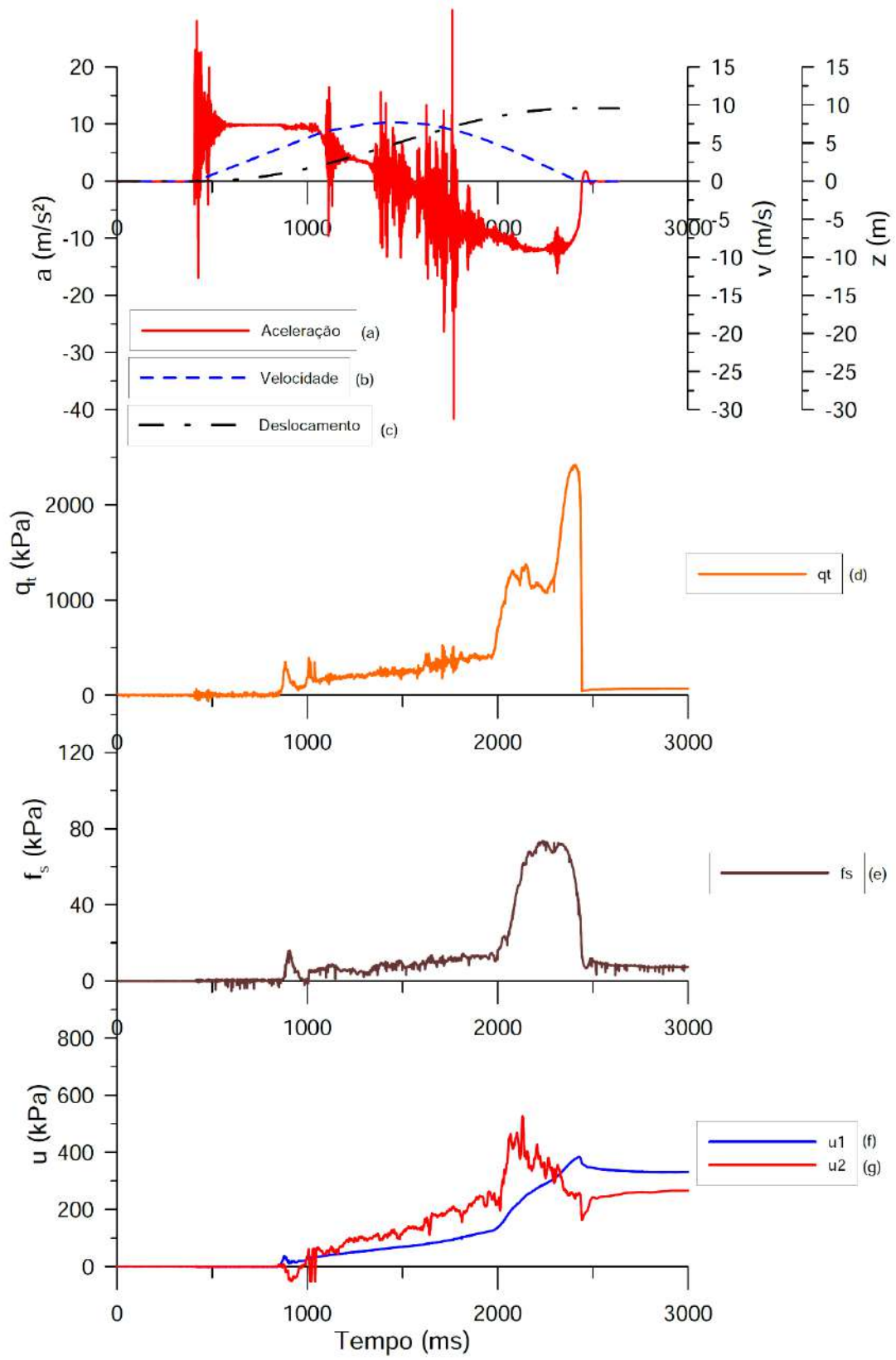


Figura 6-10 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 2/2

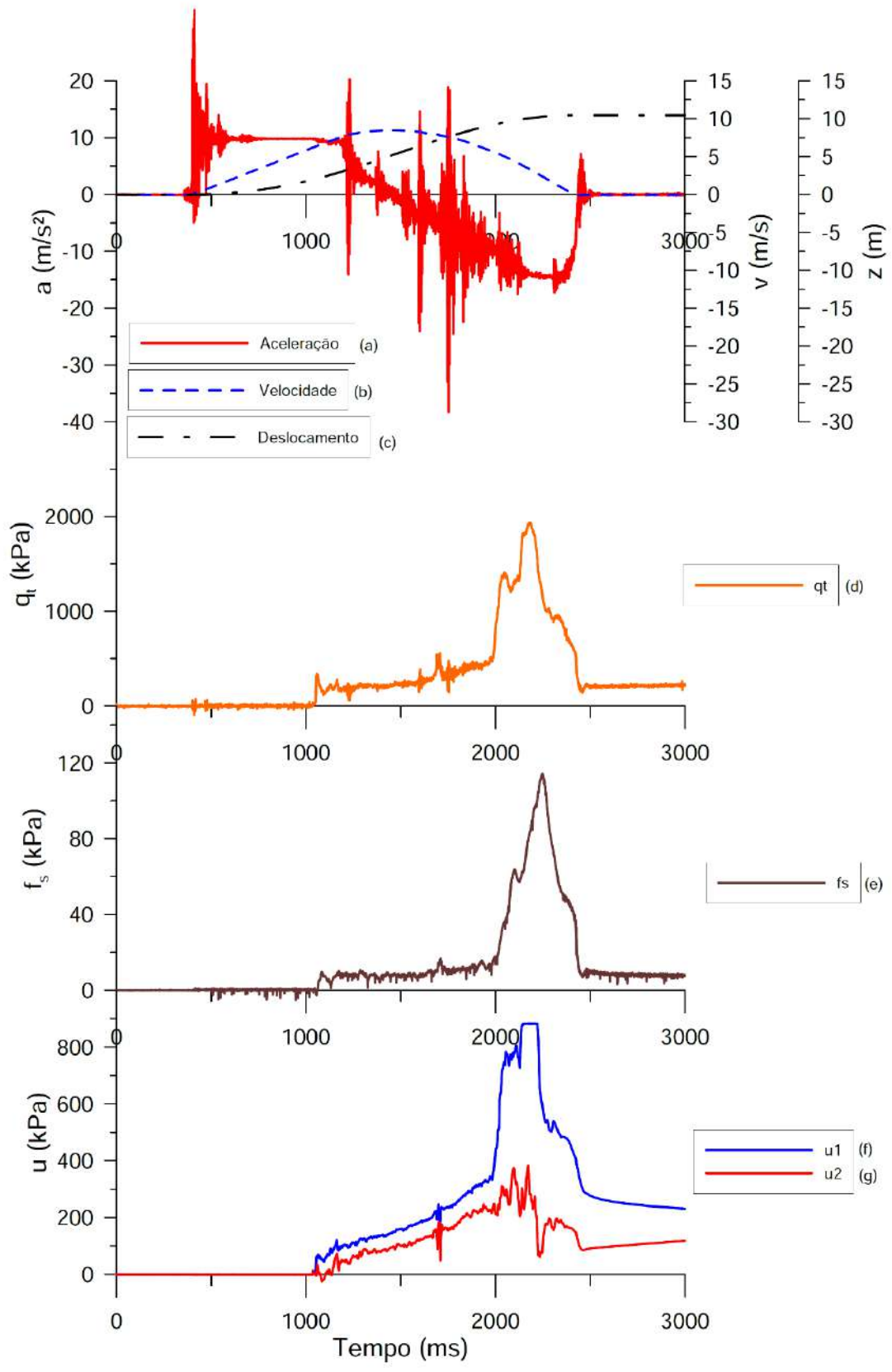


Figura 6-11 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 3/2

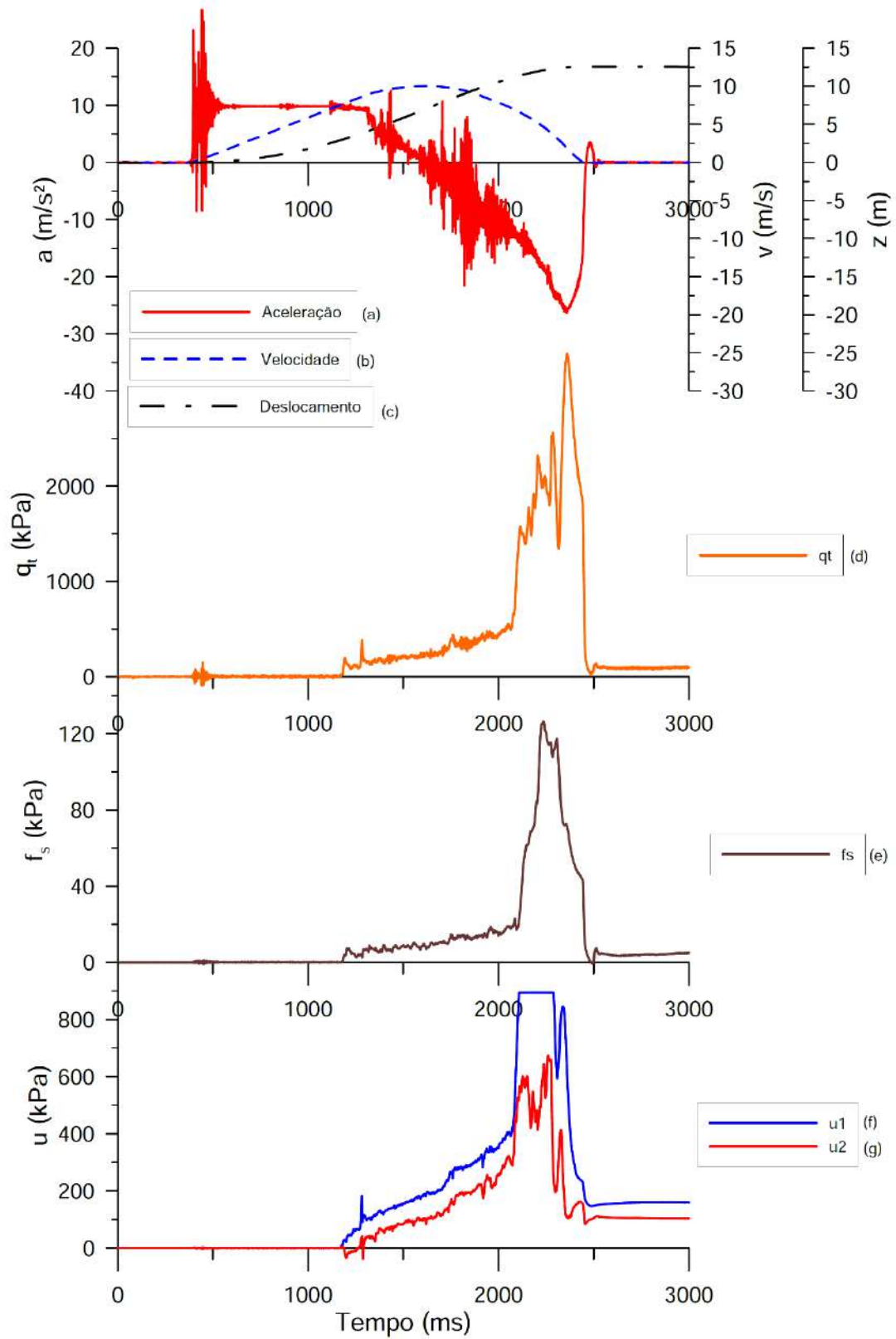


Figura 6-12 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 4/2

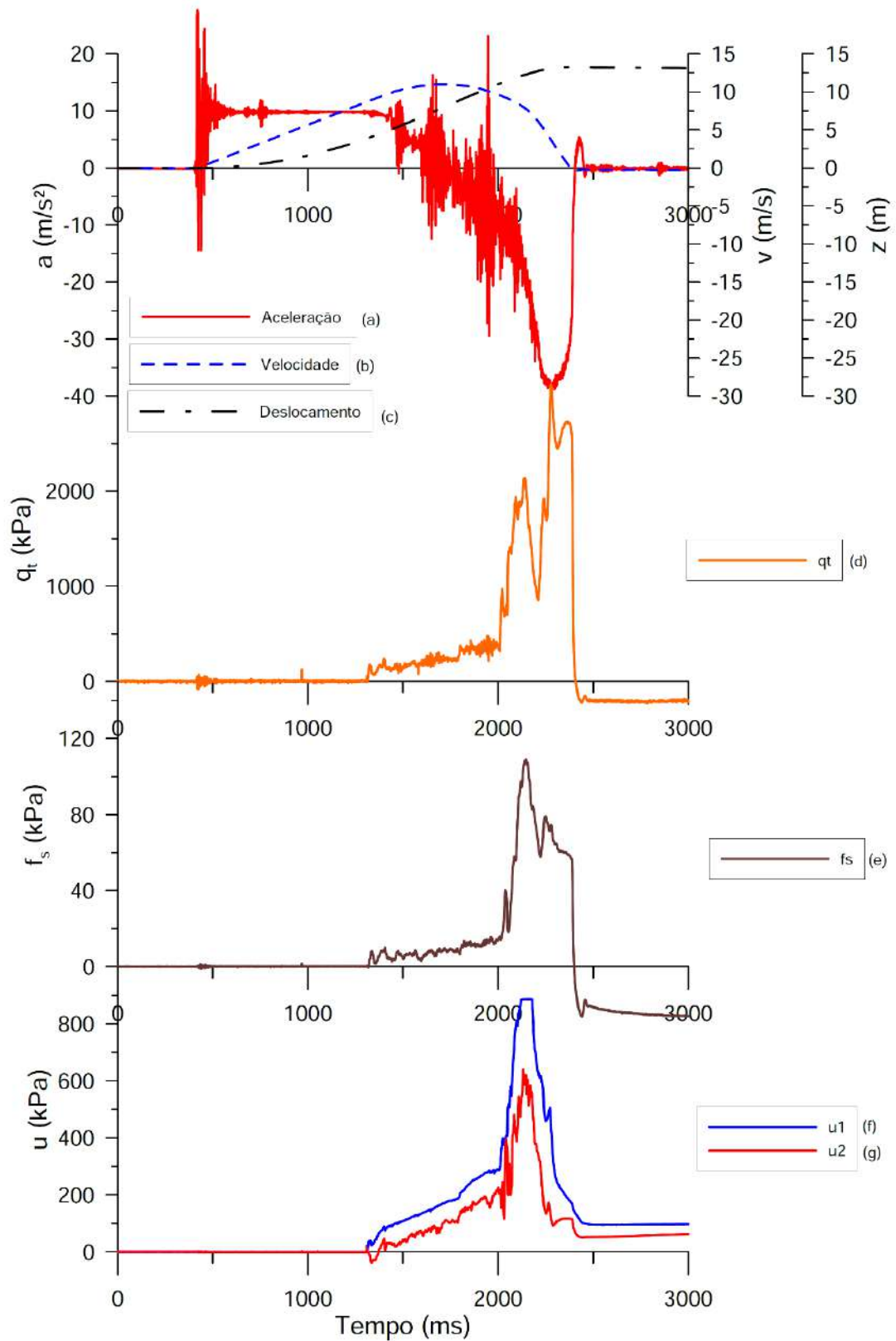


Figura 6-13 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 5/2

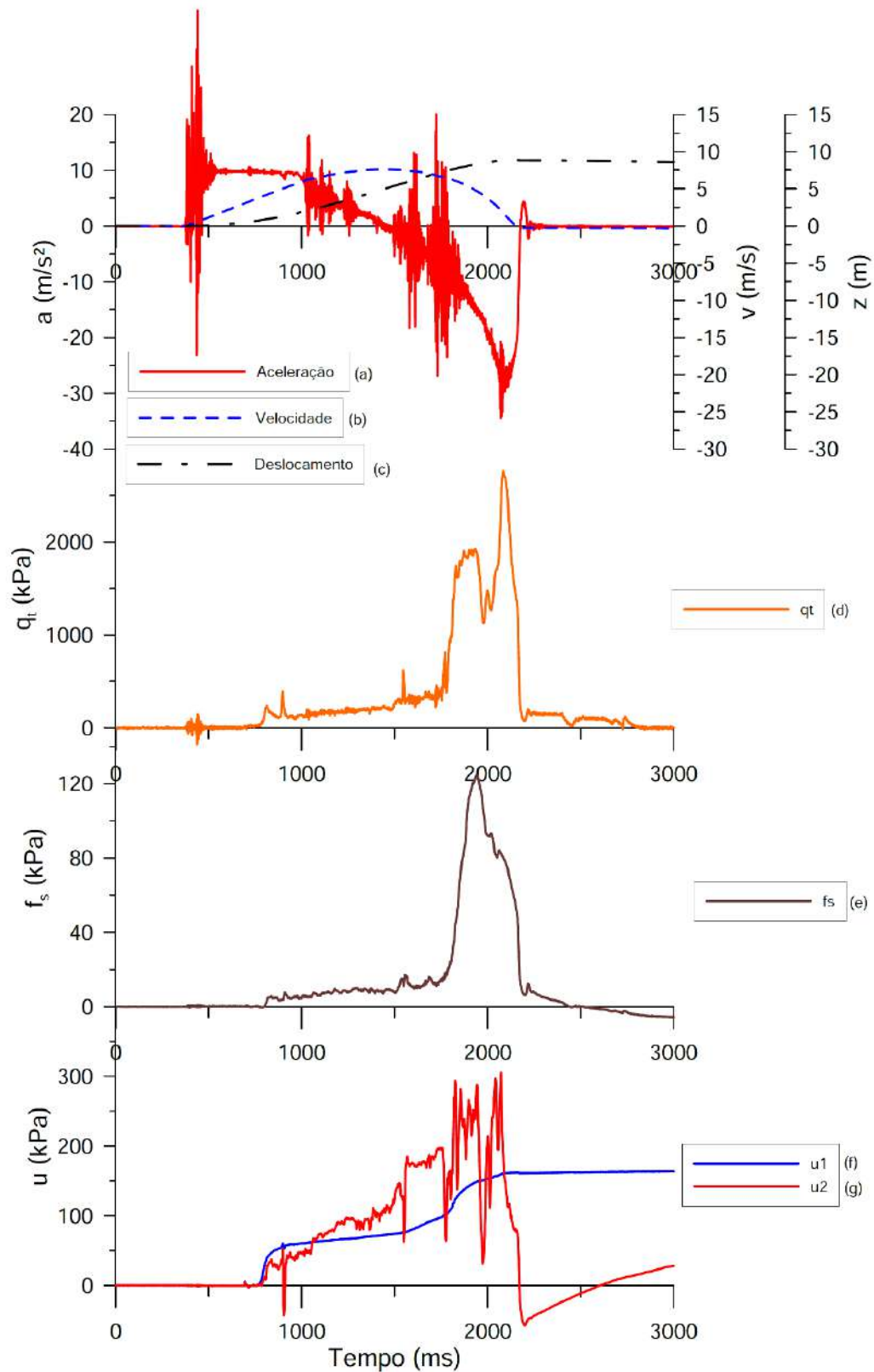


Figura 6-14 – (a) Aceleração versus tempo, (b) Velocidade versus tempo, (c) Deslocamento versus tempo, (d) Resistência de ponta versus tempo, (e) Atrito lateral f_s versus tempo, (f) Poro-pressão u_1 (g) Poro-pressão u_2 , ensaio Tor-CPTU 6/2

7. Análise dos resultados

7.1. Altura de queda e velocidade de impacto

A primeira das análises refere-se à altura de queda dos diferentes ensaios e à velocidade de impacto correspondente (tabela 7-1). Na campanha 0, havia pouco tempo para se concluir a pesquisa no campo, e decidiu-se trabalhar com alturas de queda entre 2 m e 4 m. Na segunda e terceira campanhas decidiu-se cobrir uma faixa maior de variação de alturas, desde 0,5 m a 4,5 m. O controle da altura de lançamento com o piezocone-torpedo fixado ao guindaste, no campo, não era simples de ser feito, em função do perigo que representava o posicionamento de alguma referência próxima à vertical de lançamento. Mesmo assim, observa-se que as alturas de queda obtidas foram próximas às planejadas, tendo variado entre 2,06 m e 3,74 m na campanha 0, entre 0,38 m e 4,38 m (planejado 0,5 m e 4,5 m) na campanha 1, e entre 0,48 m e 3,88 m (planejado 0,5 m e 4,0 m) na campanha 2. Os valores obtidos de altura de queda foram obtidos a partir da dupla integração de aceleração. As velocidades de impacto obtidas a partir da integral da aceleração estão também incluídas na tabela 7-1. Os valores de velocidade medidos situam-se entre 3,07 e 9,40 m/s, ou seja, entre 150 e 470 vezes a velocidade de cravação do piezocone convencional, de 20 mm/s. Na mesma tabela 7-1 encontram-se relacionados os valores de velocidade, v , em função dos valores de altura de queda calculados, obtidos a partir da expressão (7-1), admitindo-se um valor da aceleração da gravidade, g , de $9,788 \text{ m/s}^2$, e admitindo-se desprezível o atrito do ar.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7-1)$$

Observa-se que os valores de velocidade calculados pela expressão (7-1) são muito semelhantes aos obtidos por dupla integração.

Tabela 7-1– Altura de queda e velocidade de impacto dos ensaios realizados.

Campanha / Ano	Ensaio	Altura de queda (m)	Velocidade de impacto (integral da aceleração) (m/s)	Velocidade de impacto (equação 7-1) (m/s)
Campanha 0, 2009	CPTU-TOR-03	2,48	6,98	6.97
	CPTU-TOR-04	2,06	6,31	6.35
	CPTU-TOR-05	3,74	8,56	8.56
Campanha 1, 2013	CPTU-TOR-01	1,50	5,30	5.42
	CPTU-TOR-02	0,38	3,20	2.73
	CPTU-TOR-03	0,88	4,00	4.15
	CPTU-TOR-04	1,38	5,20	5.20
	CPTU-TOR-05	2,38	6,80	6.83
	CPTU-TOR-06	3,38	8,00	8.13
	CPTU-TOR-07	4,38	9,40	9.26
Campanha 2, 2014	CPTU-TOR-01	0,48	3,07	3.07
	CPTU-TOR-02	0,93	4,27	4.27
	CPTU-TOR-03	1,94	6,17	6.16
	CPTU-TOR-04	2,98	7,63	7.64
	CPTU-TOR-05	3,88	8,71	8.72
	CPTU-TOR-06	0,53	3,23	3.22

7.2. Profundidades atingidas nos ensaios

A tabela 7-2 apresenta os valores de profundidade atingidos nos ensaios de todas as campanhas, empregando-se três diferentes métodos: (i) dupla integração da aceleração; (ii) dissipação das poro-pressões; (iii) medida do comprimento do cabo de aço. Cabe salientar que na primeira campanha não foi feita a graduação no cabo de aço, pois não se imaginava que a definição da profundidade máxima atingida no ensaio poderia representar um problema. Por outro lado, acreditava-se que a dissipação completa das poro-pressões, fornecendo uma poro-pressão de equilíbrio e em consequência a profundidade do elemento poroso, seria uma vantagem adicional do ensaio, ensejando a determinação da profundidade final atingida, conforme verificado. A poro-pressão gerada no ensaio CPTU-TOR-3 da campanha 2 é apresentado na figura 7-1, sendo o final do ensaio (a partir de 2484 ms) correspondente à dissipação. Verifica-se a convergência das

duas poro-pressões, u_1 e u_2 , para um mesmo valor, aumentando a confiabilidade dos resultados.

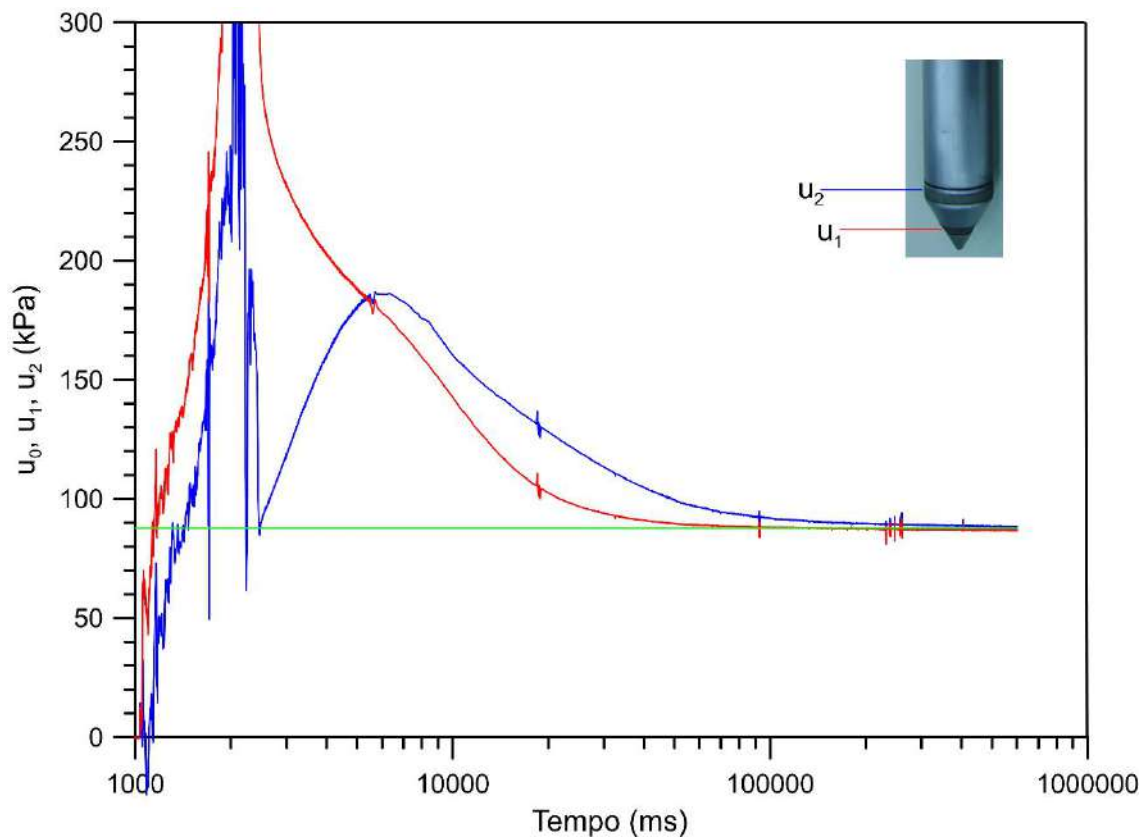


Figura 7-1 - Poro-pressão gerada no ensaio CPTU-TOR-3 da campanha 2.

Cabe salientar que a dissipação ocorreu em um tempo reduzido em comparação com ensaios em argila mole, uma vez que o piezocone-torpedo ultrapassou a camada de argila mole e atingiu camadas que apresentam maiores valores de coeficiente de adensamento c_v . No caso offshore com camadas de argila mole de espessura muito significativa, é possível que a dissipação demore dias para ocorrer, mesmo no caso da poro-pressão u_1 , que dissipa mais rapidamente que u_2 (ver figura 7-1). É portanto importante que se desenvolvam metodologias para extrapolação da curva do ensaio de dissipação, considerando-se não apenas o adensamento primário como também o adensamento secundário.

Tabela 7-2– Profundidades atingidas nos diversos ensaios.

Campanha / Ano	Ensaio	Profundidade Atingida		
		Integração [m]	Dissipação [m]	Medida do cabo de aço [m]
Campanha 0, 2009	CPTU-TOR-03	9,12	6,50	*
	CPTU-TOR-04	6,68	9,80	*
	CPTU-TOR-05	7,25	11,10	*
Campanha 1, 2013	CPTU-TOR-01	7,00	-	6,85
	CPTU-TOR-02	8,26	-	8,15
	CPTU-TOR-03	7,77	-	8,08
	CPTU-TOR-04	8,50	-	8,43
	CPTU-TOR-05	8,23	-	7,90
	CPTU-TOR-06	8,67	-	8,28
	CPTU-TOR-07	9,06	9,40	9,14
Campanha 2, 2014	CPTU-TOR-01	10,87	-	8,56
	CPTU-TOR-02	8,61	9,22	8,97
	CPTU-TOR-03	8,51	8,77	8,65
	CPTU-TOR-04	9,59	9,80	9,57
	CPTU-TOR-05	9,36	9,45	9,52
	CPTU-TOR-06	8,28	8,63	9,06
*	Não foi possível pois não foi utilizado cabo graduado			
-	Não foi possível pois não houve dissipação			

Observa-se que os valores obtidos pela integração dupla da aceleração e pelos ensaios de dissipação da campanha 0, de 2009, apresentaram diferenças muito significativas, da ordem de 30% ou mais, fato que pode ser atribuído à perda de dados durante a mudança de frequência do sistema de aquisição de dados.

No caso da campanha 1 os piezocones-torpedos foram arrancados logo após a cravação, (exceto no último ensaio), não ocorrendo a plena dissipação e portanto a determinação da profundidade do elemento poroso.

A figura 7-2 compara os resultados obtidos de profundidade através do processo da dupla integração da aceleração com a profundidade do cabo, que, com exceção de um ponto

(CPTU-TOR-01), são muito próximos, constatando que as profundidades de maneira geral foram corretamente determinadas.

Uma comparação entre as profundidades determinadas pela dissipação do excesso de poro-pressão e o cabo de aço também foi realizada, sendo apresentada na figura 7-3. Os resultados são ótimos, constatando-se que o ensaio de dissipação é uma ótima maneira de obter-se a profundidade final alcançada pelo torpedo.

Nos dois gráficos foram criadas linhas de +/-10%, indicando que o método que utiliza a dissipação do excesso de poro-pressão tem menor dispersão e é mais acurado.

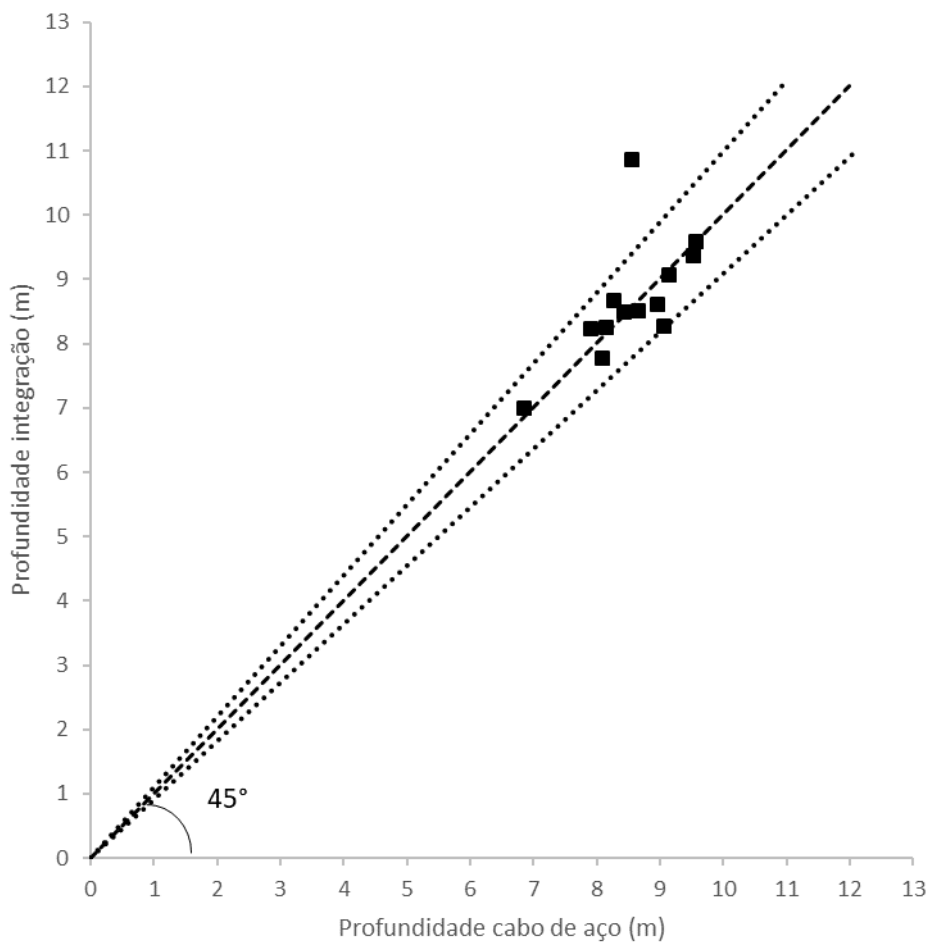


Figura 7-2 – Comparação entre a profundidade determinada através da dupla integral da aceleração e a medida através do cabo de aço.

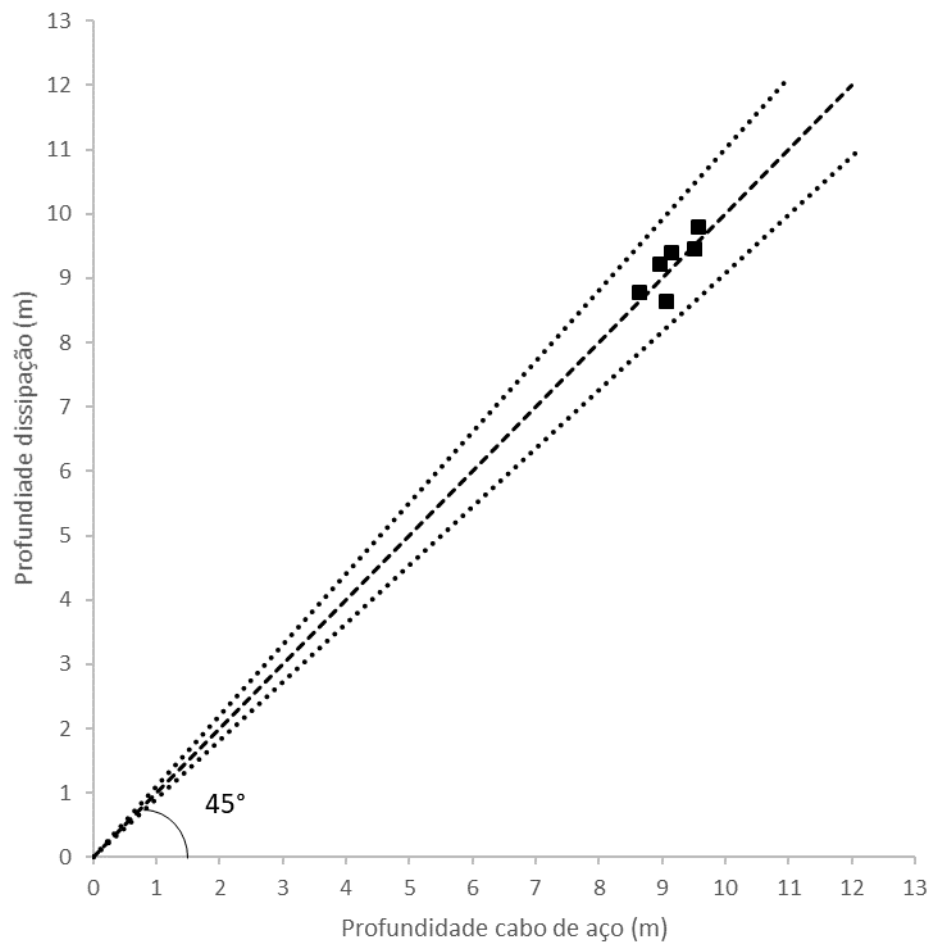


Figura 7-3 - Comparação entre a profundidade determinada através da dissipação do excesso de poro-pressão e a medida através do cabo de aço.

7.3. Comparação entre a aceleração de pico e a velocidade de impacto

Foi realizada uma comparação entre os valores de desaceleração de pico (máxima) e a velocidade de impacto com base nos ensaios realizados com diferentes alturas de queda. A figura 7-4 mostra a desaceleração máxima versus a velocidade de impacto, obtidos a partir da integração da aceleração após o início da queda livre.

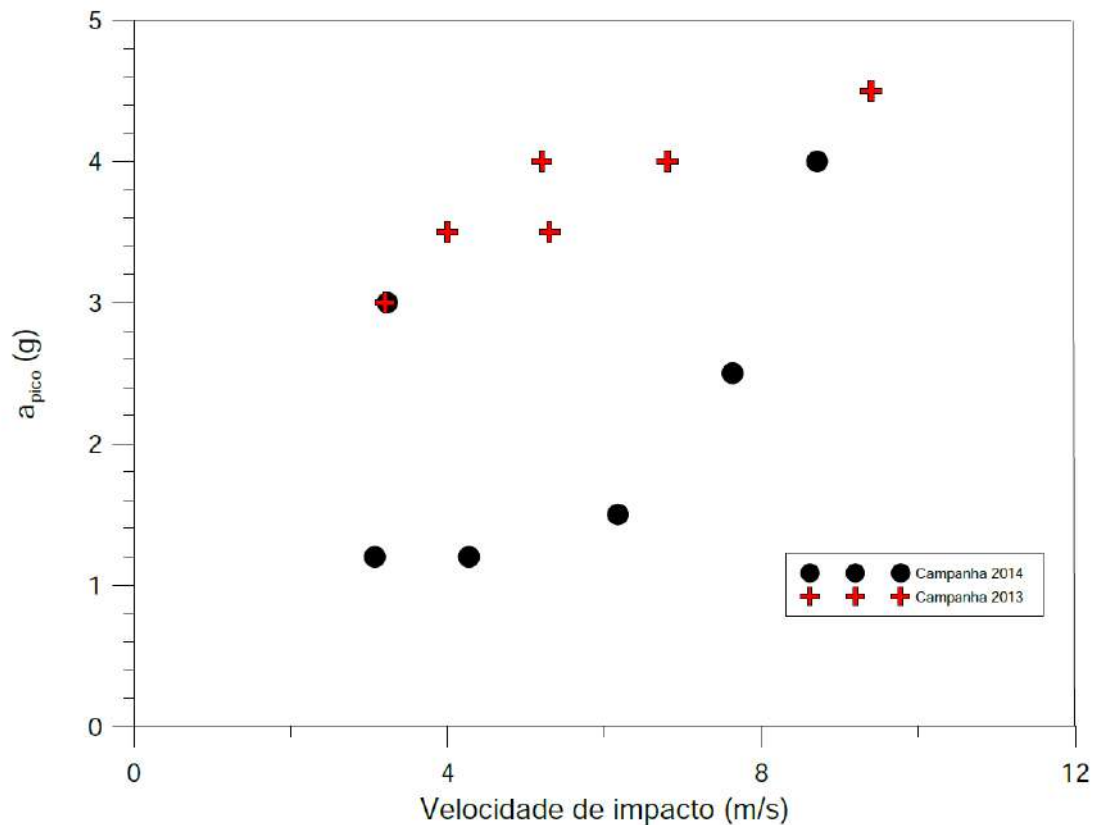


Figura 7-4 – Desaceleração máxima versus velocidade de impacto com o solo

Observa-se, para as duas campanhas, que quanto maior é a velocidade de impacto com o solo, maior é a desaceleração do torpedo durante a penetração no solo.

7.4. Análise global dos resultados (q_t , f_s , u_1 e u_2)

Os resultados das campanhas 1 e 2 estão traçados conjuntamente na figura 7-5. Observa-se que os valores de resistência de ponta de vários ensaios da campanha 1 apresentaram resultados incorretos, tendo tais ensaios sido excluídos das análises seguintes.

As leituras de poro-pressão u_1 das campanhas de 2009 e 2013 não apresentaram uma boa resposta, indicando má saturação, que pode ter ocorrido durante o transporte dos equipamentos, ou ainda durante a sua instalação em campo ou ainda durante a própria execução do ensaio, especialmente entre a montagem e o lançamento.

A figura 7-6 apresenta os resultados dos ensaios de piezocone-torpedo juntamente com um ensaio típico de ensaio de piezocone convencional, realizado à velocidade padrão de 20 mm/s. Algumas conclusões podem ser obtidas a partir da figura:

- i) Existe um efeito de velocidade tanto na resistência de ponta como na de atrito lateral. A quantificação desse efeito é realizada adiante.
- ii) Também é verificado um efeito de velocidade na poro-pressão, mais pronunciado em u_1 do que em u_2 . Esse efeito não foi abordado na presente pesquisa, sendo um tema ainda em aberto, necessitando de análises futuras.
- iii) O piezocone-torpedo foi capaz de capturar as poro-pressões negativas (caso de u_2) no início da penetração, tal como no piezocone convencional. Entretanto, os valores foram ainda maiores em módulo, tal como verificado por Mumtaz et al. (2018), em análise numérica de fluidos.

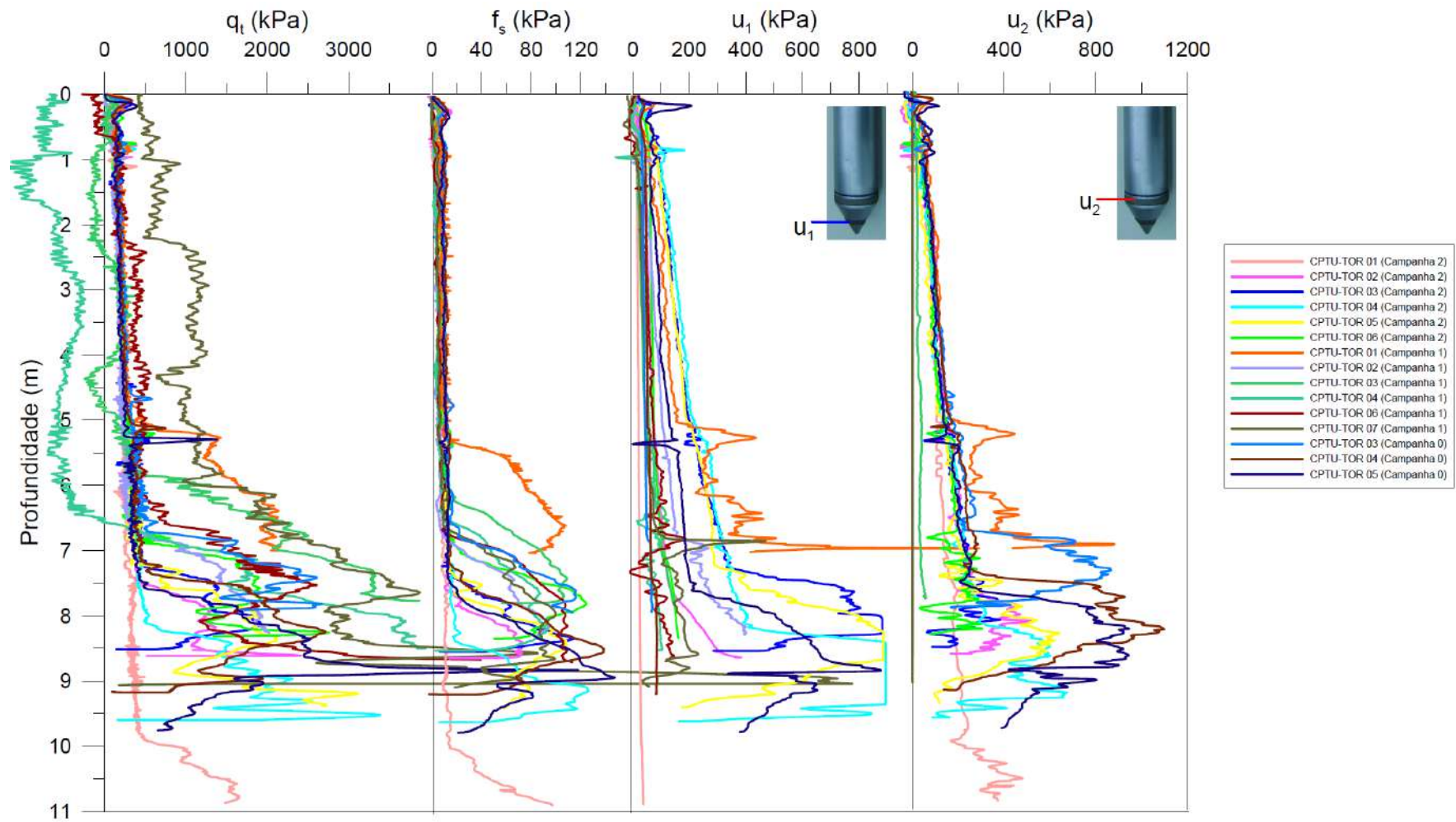


Figura 7-5- Resultados dos ensaios das campanhas 1 e 2.

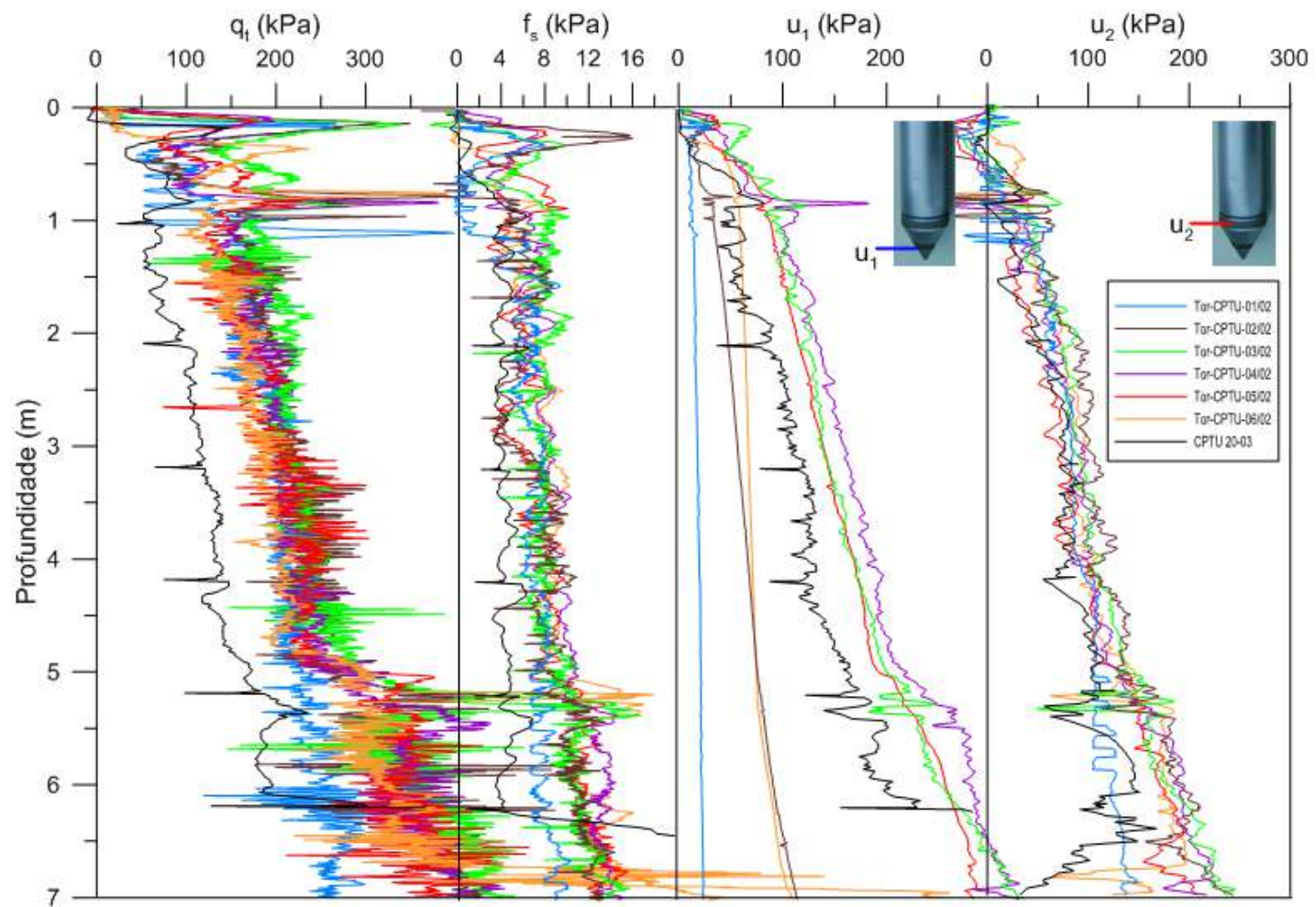


Figura 7-6 – Resultados de q_t , f_s , u_1 e u_2 da segunda campanha de piezocone-torpedo e um ensaio de piezocone convencional.

7.5. Aplicação ao projeto de estaca torpedo

7.5.1. Comparação entre os valores de força estimados por medidas no piezocone torpedo e a força medida durante a cravação obtida a partir da aceleração

Para o cálculo das forças envolvidas durante a cravação, fez-se um estudo para determinar o aumento de área lateral e da área da ponta em contato com o solo durante o processo de cravação do piezocone torpedo. Tal análise considerou a variação dos diâmetros do piezocone-torpedo e respectivas áreas projetadas, que foram consideradas como área de ponta. A figura 7-7 a seguir ilustra as seções consideradas nos cálculos.

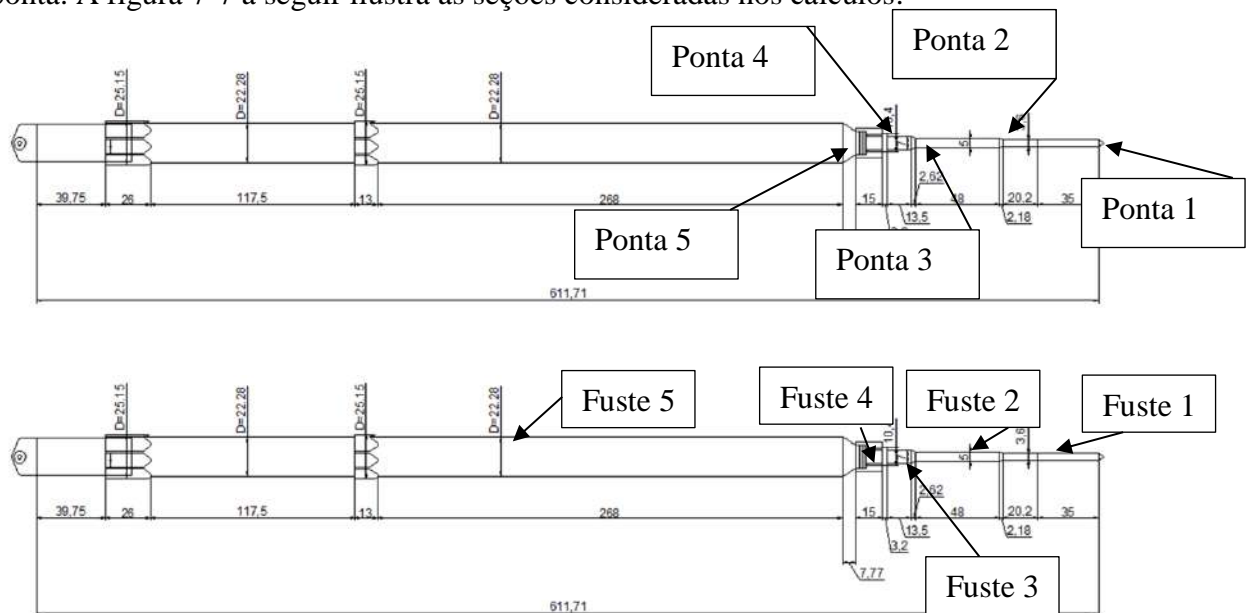


Figura 7-7 - Geometrias consideradas para o cálculo da área lateral e de ponta, acumuladas durante a cravação

A partir da geometria ilustrada na figura 7-7 pôde-se determinar a área de ponta e área lateral acumuladas durante a cravação. A tabela 7-3 apresenta todas as dimensões utilizadas para os cálculos das áreas lateral e de ponta.

Tabela 7-3 – Resumo dos diâmetros e trechos considerados para o cálculo da área lateral acumulada e área de ponta

Hn (mm)	Prof (m)	Diâmetro (mm)	Área Ponta (mm ²)	Área Lateral (mm ²)	Área Lateral Acumulada (mm ²)	Área de Ponta Acumulada (mm ²)
573.8	0	36	1017.876		0	1017.876
	0.5738	36		64895.25	64895.25	
506.2	0.5738	50	945.6194			1963.495
	1.08	50		79513.71	144409	
167	1.08	70	2902.832			4866.327
	1.247	70		36725.22	181134.2	
227.7	1.247	170	19795.18			24661.5
	1.4747	170		121607.9	302742.1	
4642.4	1.4747	222.8	19191.86			43853.37
	6.1171	222.8		3249433	3552175	

As figura 7-8 e Figura 7-9 mostram respectivamente o gráfico da área de ponta acumulada versus profundidade e a área lateral acumulada versus profundidade.

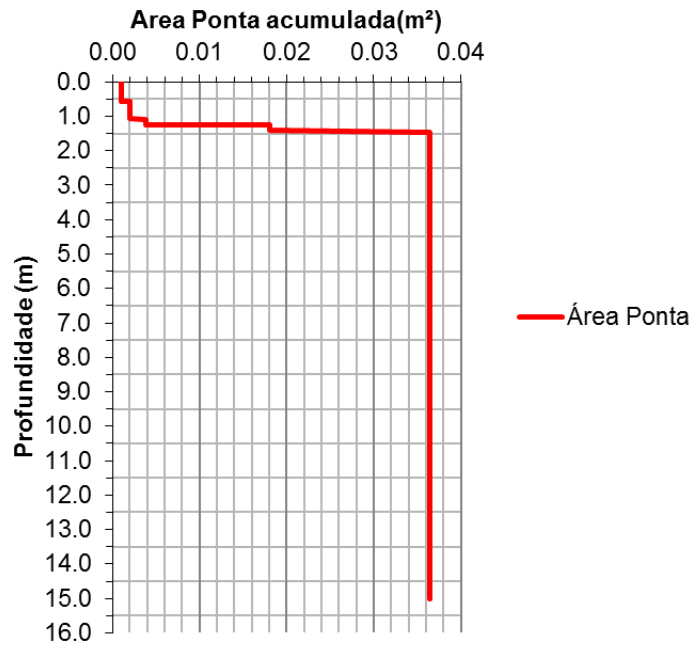


Figura 7-8 – Área de ponta acumulada do piezocone torpedo versus profundidade

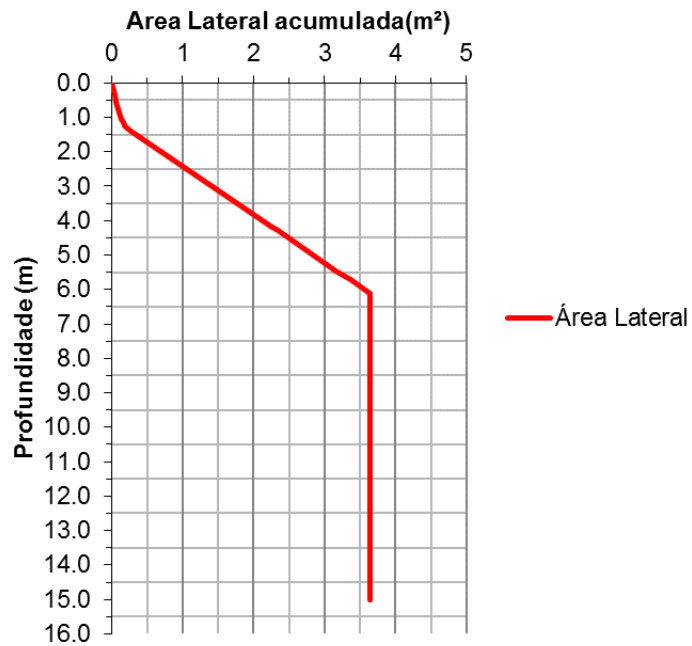


Figura 7-9 – Área lateral acumulada do piezocone torpedo versus profundidade

As leituras dos ensaios de piezocone-torpedo foram discretizadas em trechos de 1 mm. Para os cálculos a seguir, foram feitas as seguintes considerações:

- (i) Após a entrada da ponta do piezocone, o modelo de cálculo passa a considerar que a força gerada através da ponta é a leitura do próprio piezocone (q_i) vezes a área da ponta (1, ver figura 7-7), ponta do piezocone.
- (ii) Depois da cravação do trecho com o diâmetro do piezocone (10 cm^2), ocorre um primeiro aumento de área de ponta. Essa contribuição de ponta é calculada com base na leitura que o piezocone fez quando o mesmo passou pela mesma profundidade em que a ponta (2) está. Essa operação é feita para cada milímetro cravado do piezocone torpedo, monitorando a posição de todas as pontas admitidas (1, 2, 3, 4 e 5) e suas respectivas leituras de (q_i). Em um dado momento, todas as pontas estão no interior do solo, cada uma contribuindo com a leitura que o piezocone-torpedo fez na mesma profundidade.
- (iii) As leituras de atrito lateral f_s foram integradas em cada trecho de diâmetro constante cravado. Ao iniciar a cravação, o primeiro trecho com diâmetro de 36 mm penetra no solo, até que em um dado momento ocorre um aumento de diâmetro. A integral numérica de f_s para cada trecho é calculada por planilha de acordo com o método abaixo (figura 7-10).

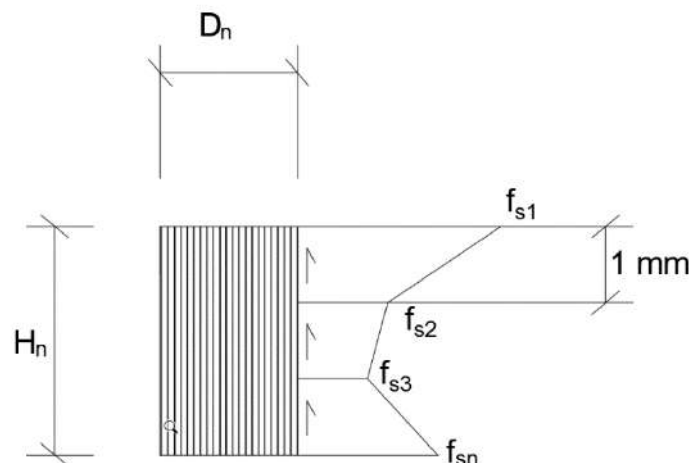


Figura 7-10 – Discretização dos dados utilizada para a integração numérica de f_s

$$F_{s,n} = \frac{(f_{s1} + f_{s2})}{2} \pi D_n (1 \text{ mm}) + \frac{(f_{s2} + f_{s3})}{2} \pi D_n (1 \text{ mm}) + \frac{(f_{sn-1} + f_{sn})}{2} \pi D_n (1 \text{ mm}) \quad (7-2)$$

Considerando a repetição de todos os termos intermediários f_{s2} até f_{sn-1} , e isolando os termos iguais, a equação 7-2 fica

$$F_{s,n} = \left[\frac{(f_{s1})}{2} + \frac{(2f_{s2} + \dots + 2f_{n-1})}{2} + \frac{(f_{sn})}{2} \right] \pi D_n H_n \quad (7-3)$$

Observa-se que o método adotado se diferencia muito pouco da consideração simples da média de f_s para cada trecho multiplicado por sua área lateral total.

Os diâmetros considerados para os 5 prismas formados pelo torpedo são: 0,036 m, 0,05 m, 0,07 m, 0,17 m e 0,23 m.

Com a metodologia acima foi estimada a força de reação oferecida pelo solo à penetração do piezocone-torpedo no ensaio de todos os ensaios da campanha 2, a qual está representada nas figuras 7-10 a 7-15, para os ensaios CPTU-TOR-01 a 06. As mesmas figuras apresentam o valor da força de reação inferida a partir da medida da aceleração em cada ensaio e da massa do torpedo. Observa-se que os valores estimados de força (notados na figura como sem correção) são maiores do que os valores inferidos a partir da medida da aceleração.

Uma vez que a equação das forças atuantes no torpedo (7-4) precisa ser respeitada, há necessidade de alguma correção para a reação.

$$F_R = m (g - a) \quad (7-4)$$

Sendo

FR = força de reação do solo atuando no torpedo

m = massa do torpedo

g = aceleração da gravidade

a = aceleração medida

A correção realizada contemplou o atrito lateral. De fato, é sabido, desde o desenvolvimento do ensaio de cone, que ocorre uma degradação do atrito lateral com a deformação, o que ocasionou a própria medida do atrito lateral local. Tal correção foi realizada em função da velocidade e da profundidade para cada um dos ensaios, o que está apresentado nas figuras 7-17 e 7-18, respectivamente para a velocidade e a profundidade. Resultados com uma tendência mais pronunciada foram obtidos para o caso da velocidade, observando-se uma tendência de valores de fatores de degradação, δ , decrescentes com a redução da velocidade. Adotando-se o valor médio de δ em cada ensaio, obtêm-se as curvas corrigidas ilustradas nas figuras 7-11 a 7-16, com a designação forças corrigidas. Mesmo com estes valores médios, há uma excelente concordância entre os valores inferidos a partir da aceleração e os valores corrigidos.

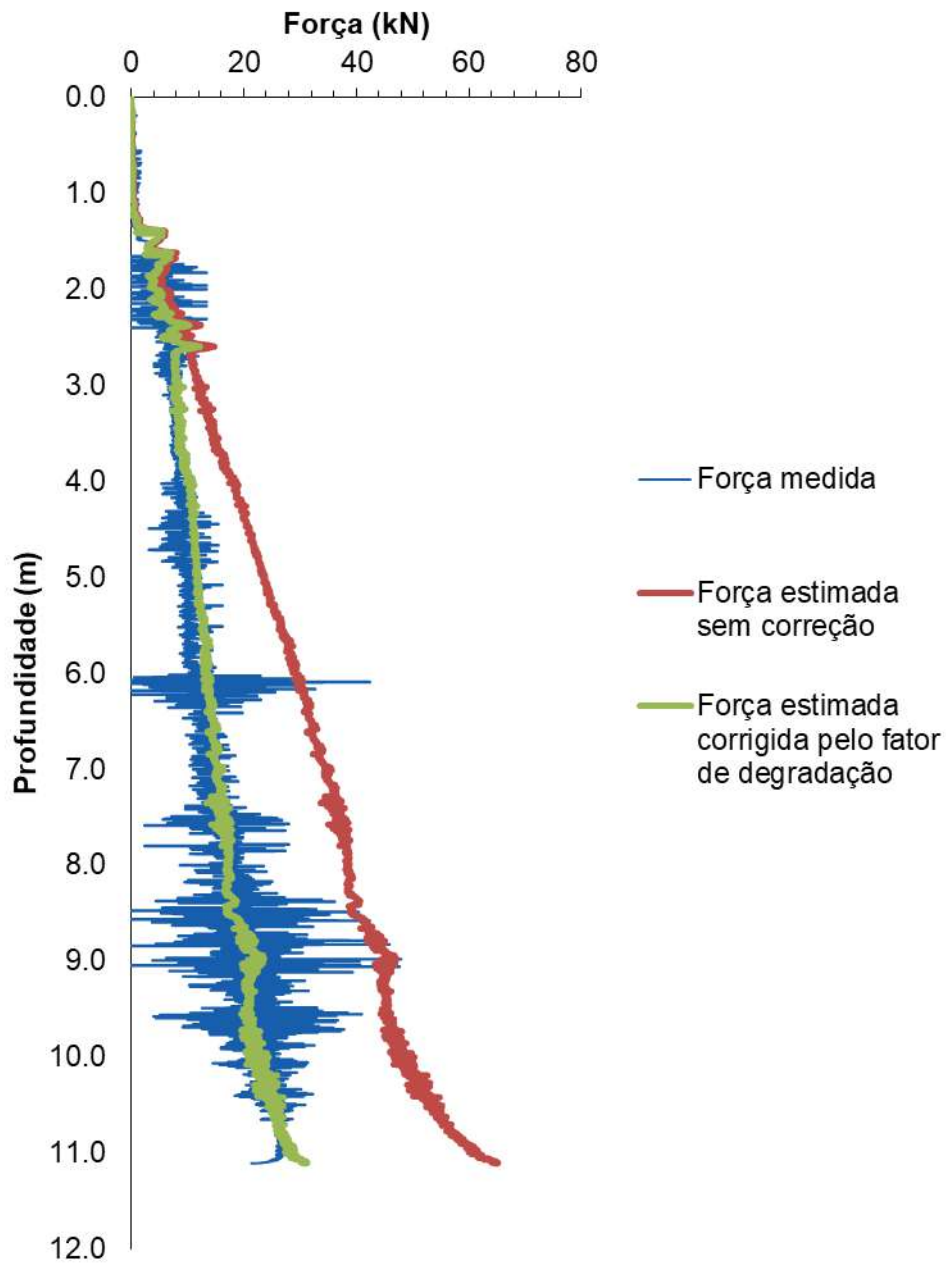


Figura 7-11 – Comparação entre força estimada e força medida CPTU TOR 01 – Campanha 2- 2014

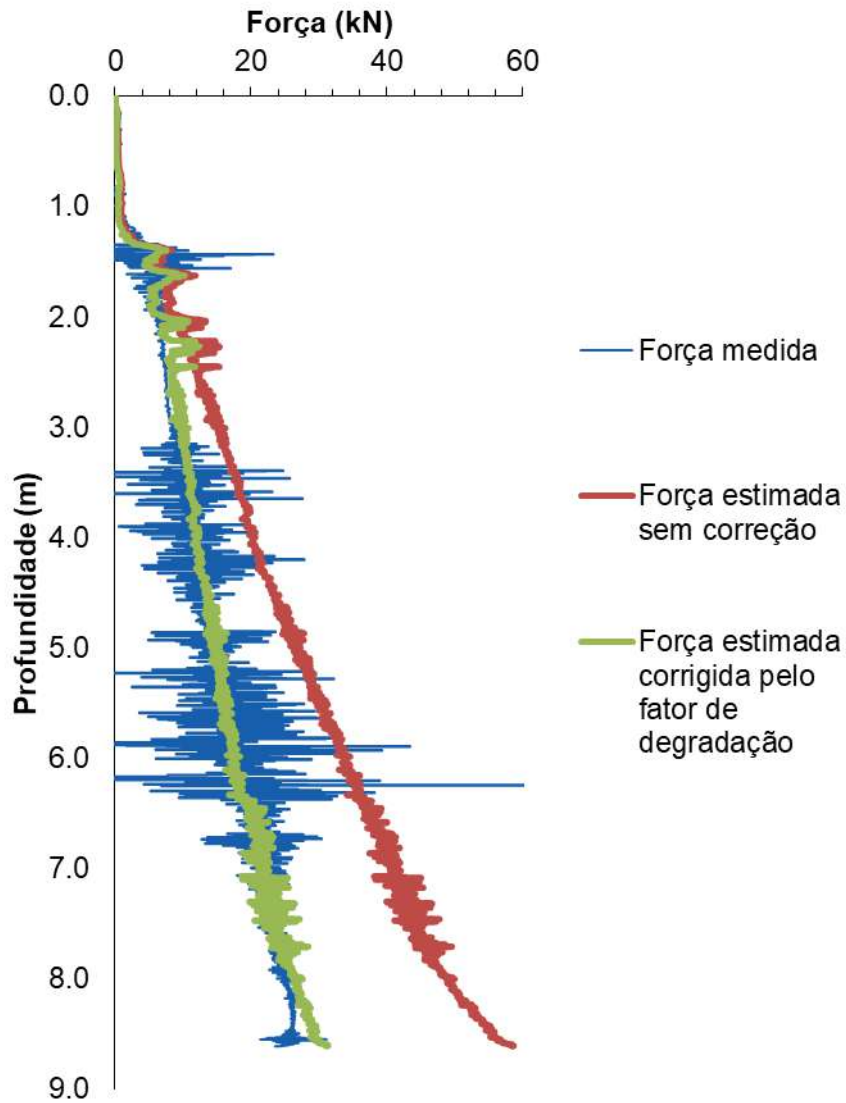


Figura 7-12 - Comparação entre força estimada e força medida CPTU TOR 02 – Campanha 2- 2014

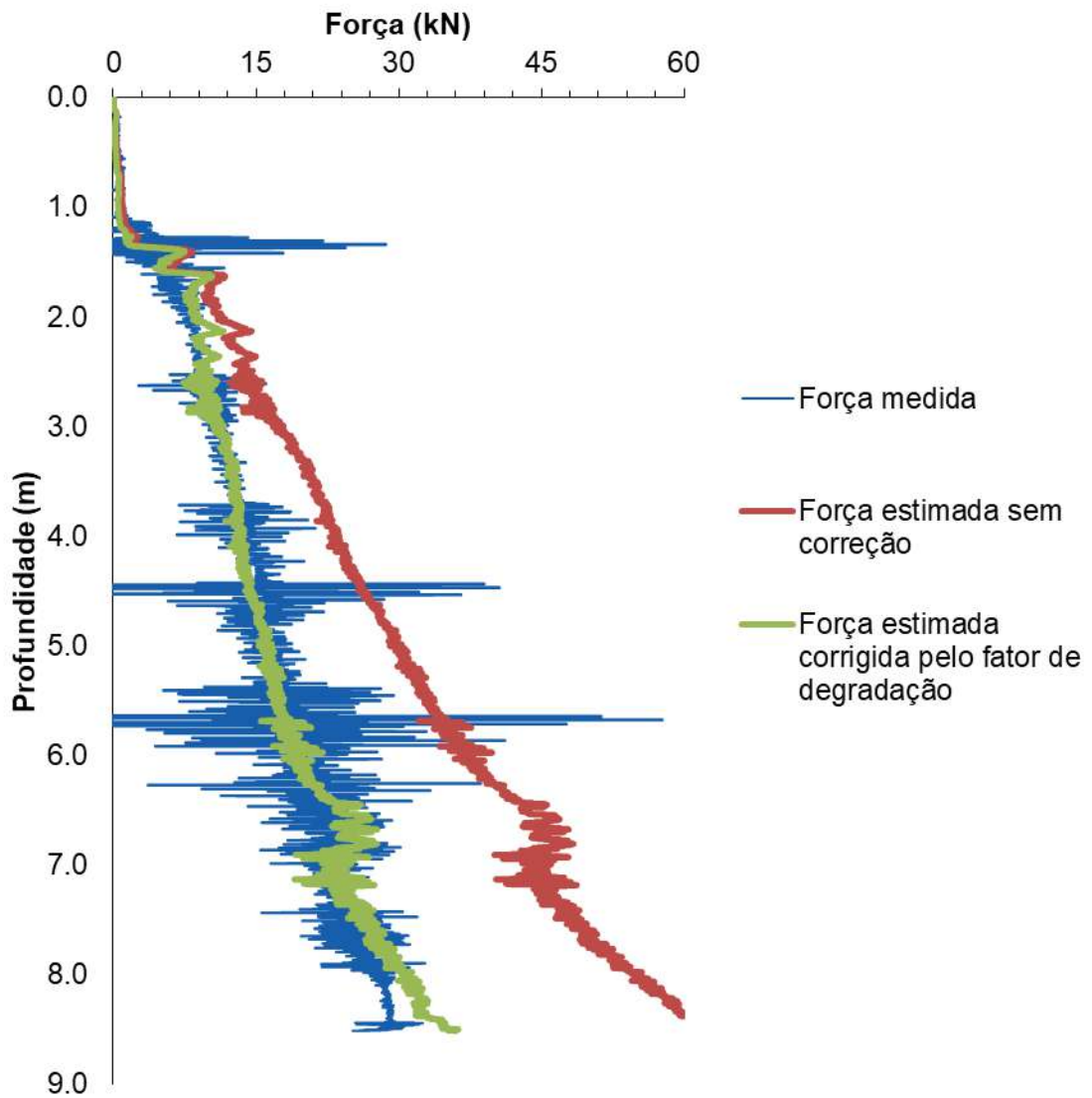


Figura 7-13 - Comparação entre força estimada e força medida CPTU TOR 03 – Campanha 2- 2014

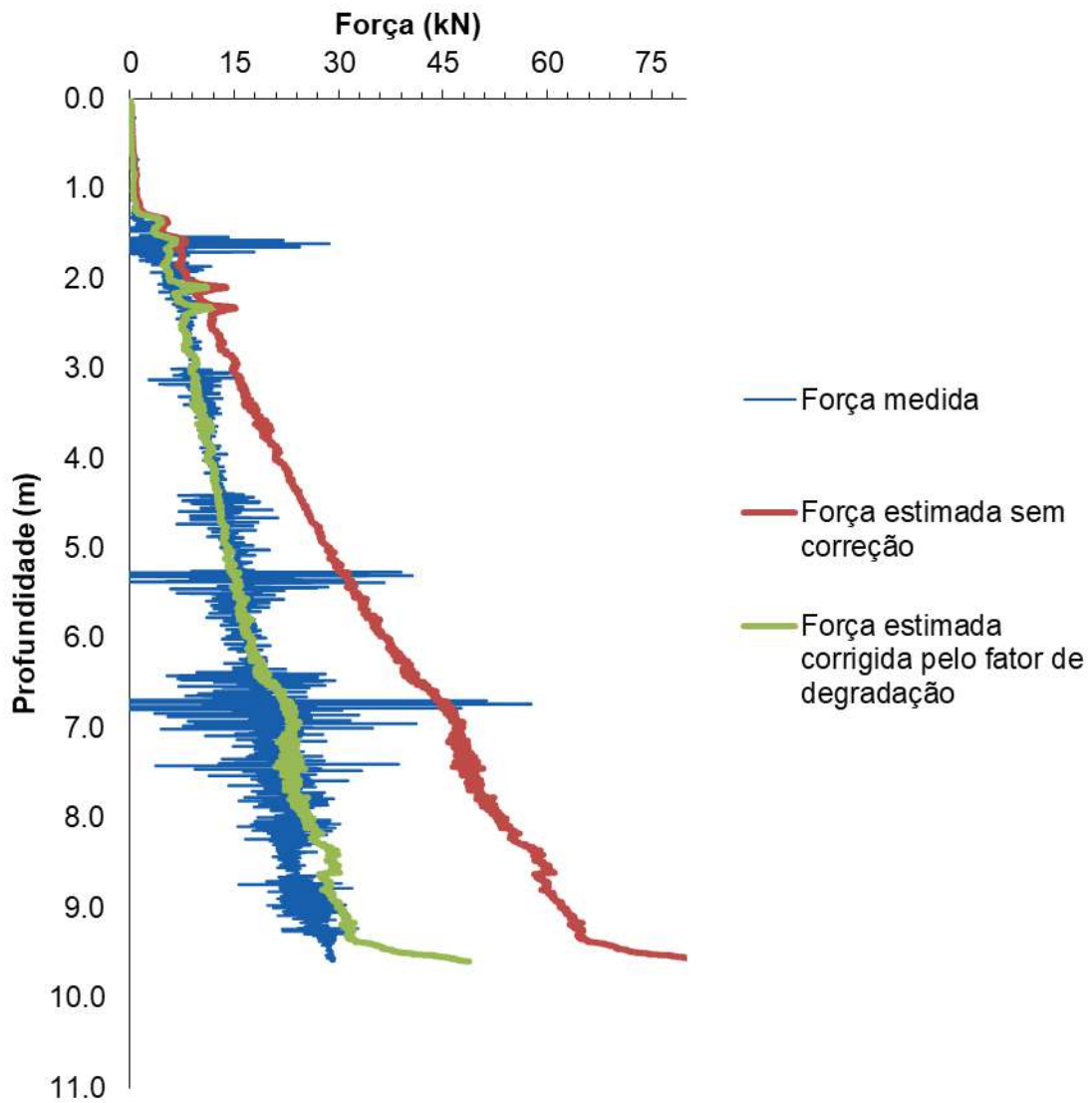


Figura 7-14 - Comparação entre força estimada e força medida CPTU TOR 04 – Campanha 2- 2014

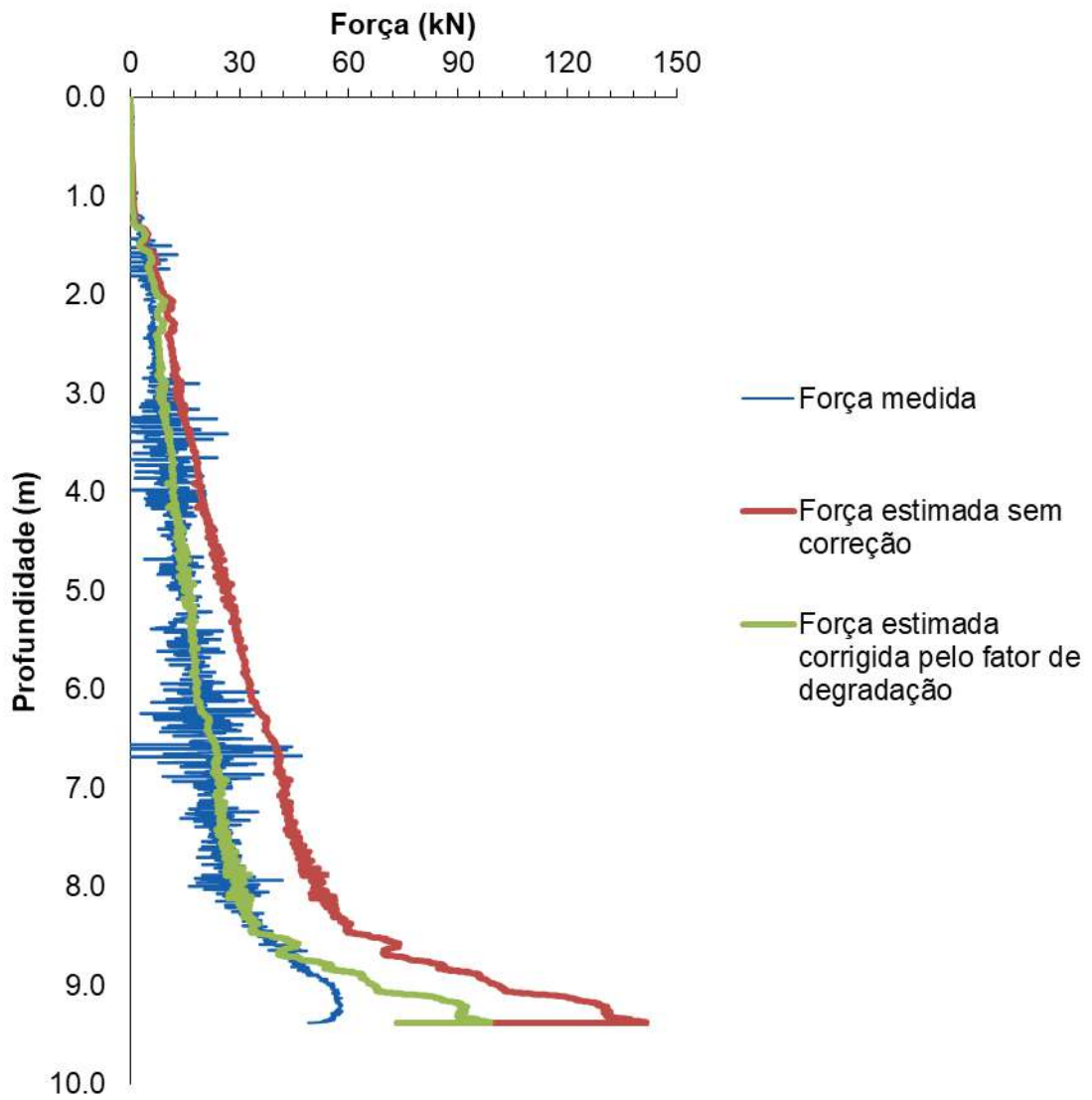


Figura 7-15 - Comparação entre força estimada e força medida CPTU TOR 05 – Campanha 2- 2014

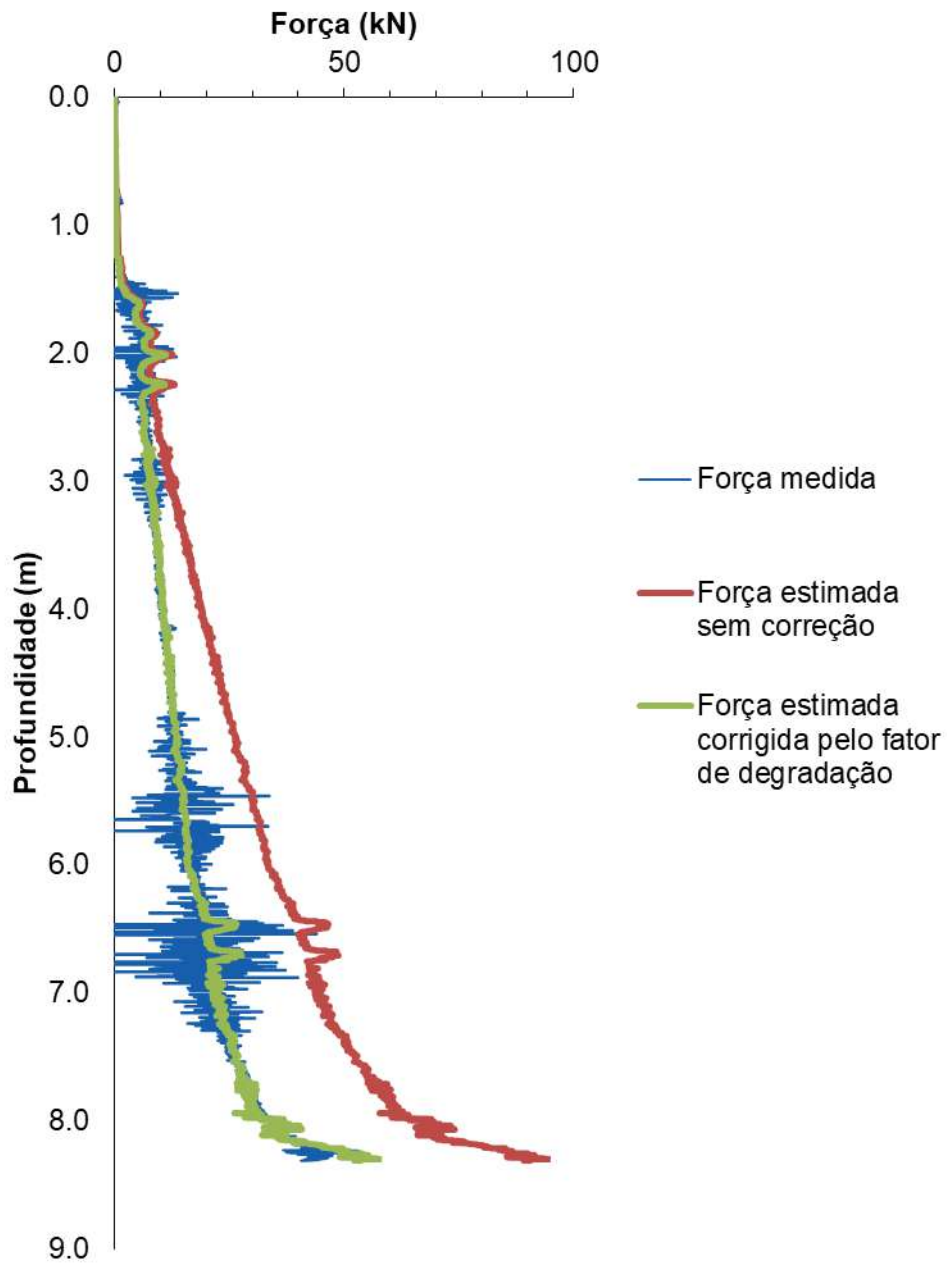


Figura 7-16 - Comparação entre força estimada e força medida CPTU TOR 06 – Campanha 2- 2014

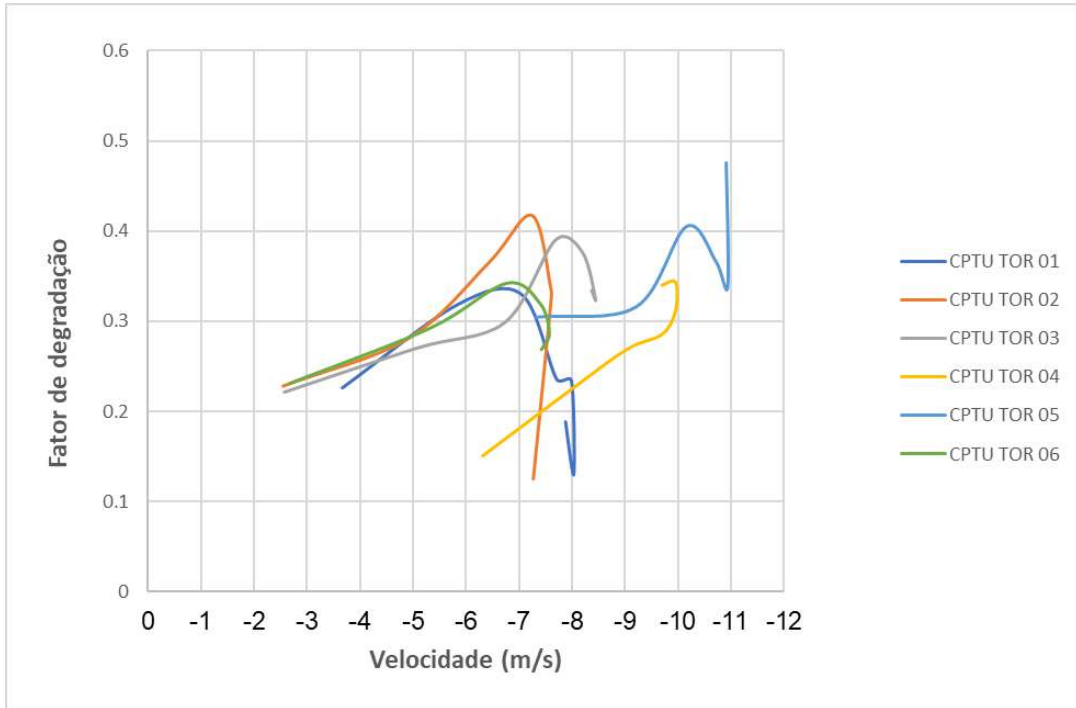


Figura 7-17 – Fator de adesão função da velocidade de penetração

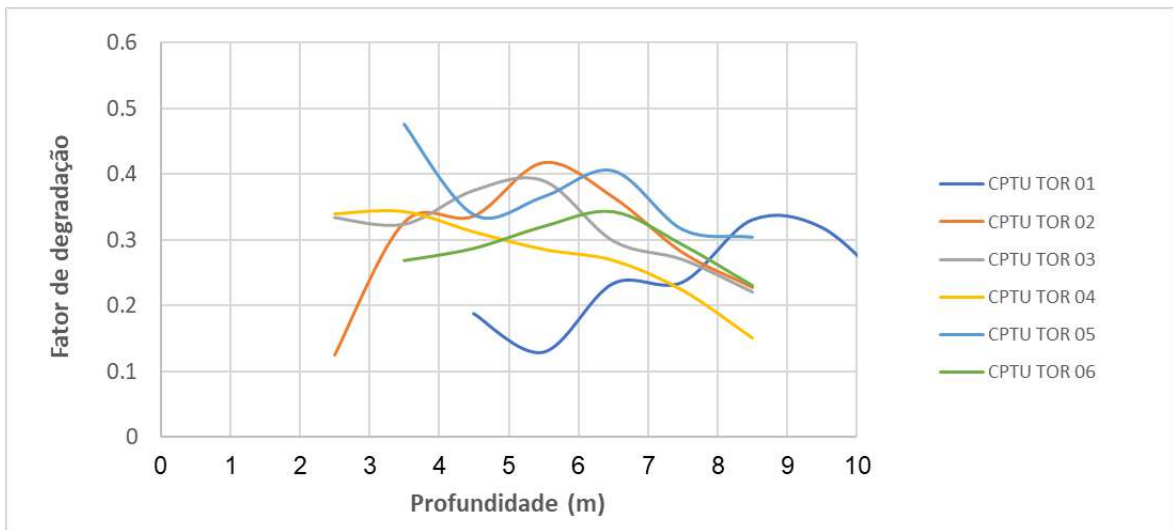


Figura 7-18 – Fator de adesão em função da profundidade

7.5.2. Correção dos efeitos de velocidade para uma aplicação do piezocone torpedo sob os métodos já existentes para o piezocone convencional

O presente item apresenta uma análise dos dados da campanha 2 em Sarapuí II objetivando determinar-se o parâmetro β tanto para a resistência de ponta como para o atrito.

Para o presente estudo é feita a normalização da resistência de ponta do piezocone torpedo ($q_{t,torpedo}$) pela resistência de ponta obtida em um ensaio de piezocone convencional ($q_{t,convencional}$).

As figura 7-19 e Figura 7-20 (com valores normalizados) mostram o efeito da velocidade de cravação na leitura da resistência de ponta nos ensaios de piezocone convencional e torpedo. Tal influência pôde ser analisada de acordo com a metodologia da função de potência apontada por Randolph et al. (2018), desconsiderando-se, entretanto, a estimativa de resistência oferecida pelo arraste. A análise considerando o arraste será tema de estudos futuros do autor da presente pesquisa.

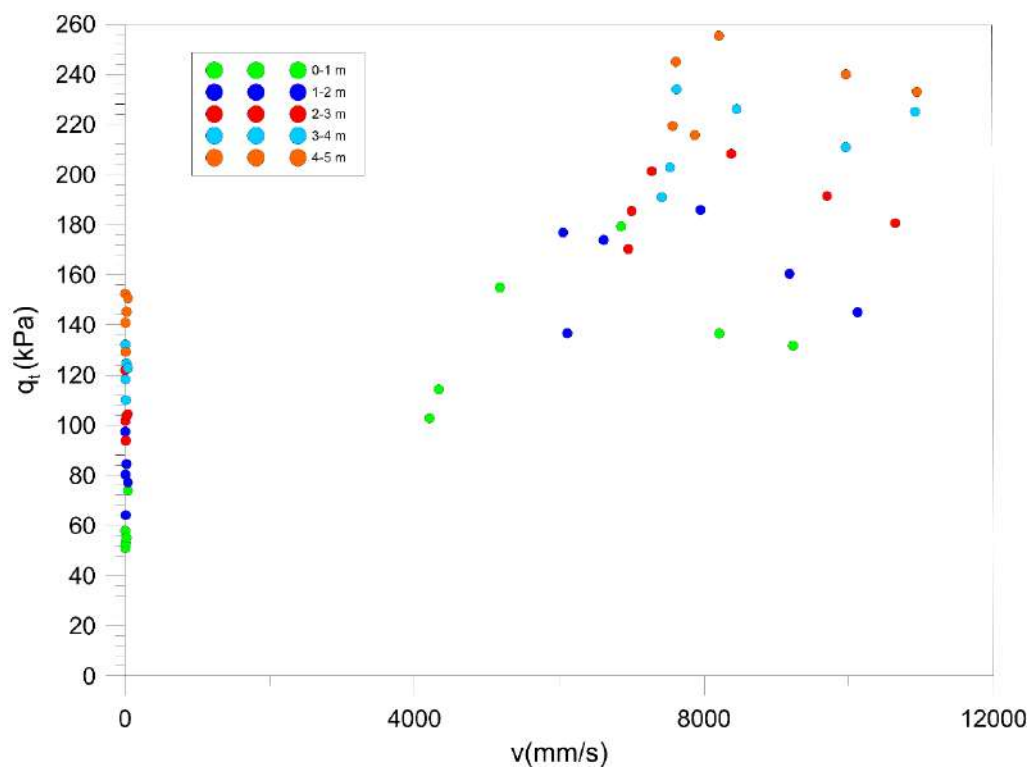


Figura 7-19 - Resistência de ponta média por metro de ensaios de piezocone convencional com velocidade variada e piezocone torpedos

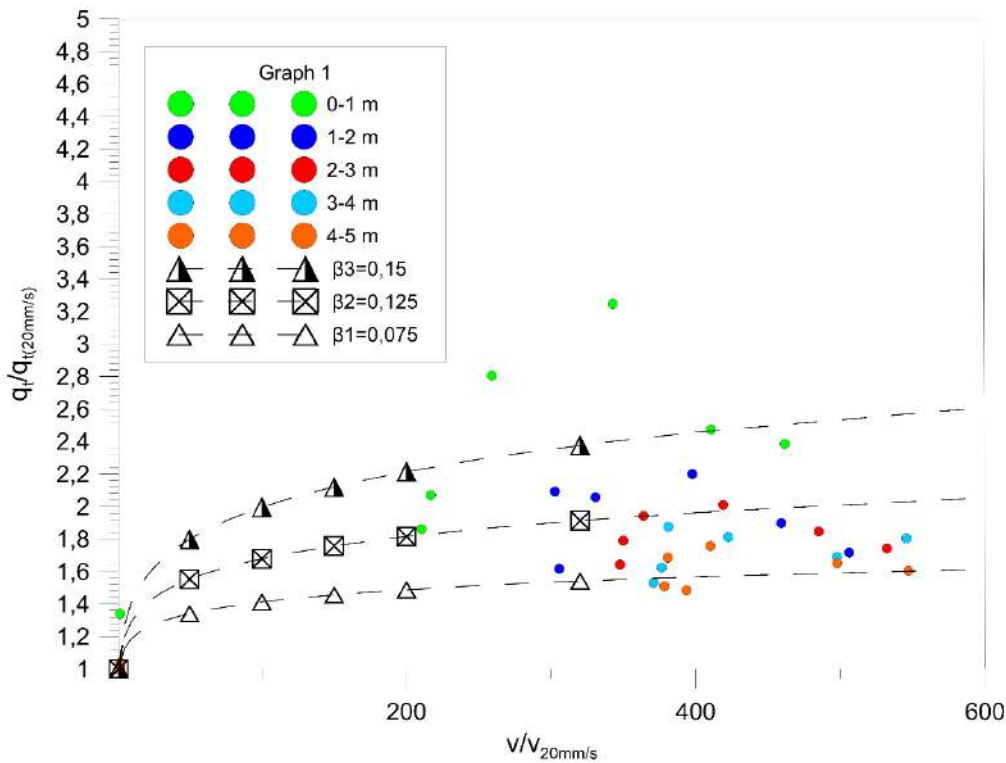


Figura 7-20 - Resistência de ponta média normalizada por metro de ensaio.

Observa-se que o efeito da velocidade é maior nas camadas superficiais. Na figura 7-19 são traçadas ainda as curvas para diversos valores de β na função de potência.

A figura 7-20 apresenta os valores de beta capazes de fornecer o melhor ajuste para cada faixa de profundidade. Observa-se que decrescem com a profundidade. Esse decréscimo com a profundidade não pôde ser atribuído a nenhuma propriedade do depósito, exceto a OCR. De fato, costuma-se atribuir o efeito de velocidade ao índice de plasticidade, cuja tendência em Sarapuí II não é de decrescer com a profundidade nas profundidades analisadas.

O valor de 0,06, tendência final do gráfico, é próximo do valor encontrado a partir dos ensaios de centrífuga mostrados por Chow et al. (2017), porém cabe salientar que os efeitos de arraste não foram considerados no presente trabalho pois serão objeto de estudos futuros

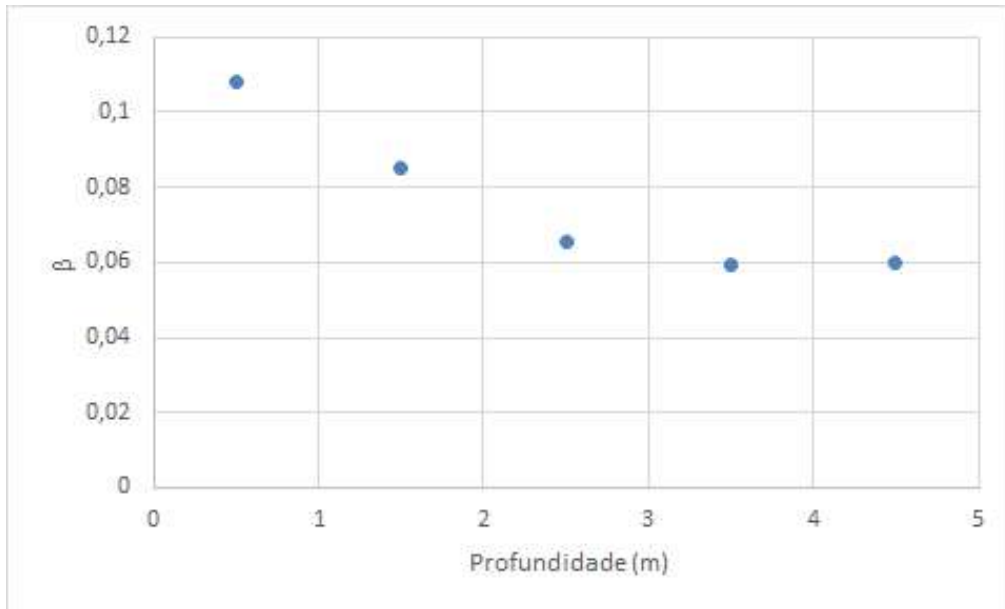


Figura 7-21 – Parâmetro β em função da profundidade

Análise semelhante foi realizada para o caso do atrito lateral (ver figuras 7-21 e 7-22).

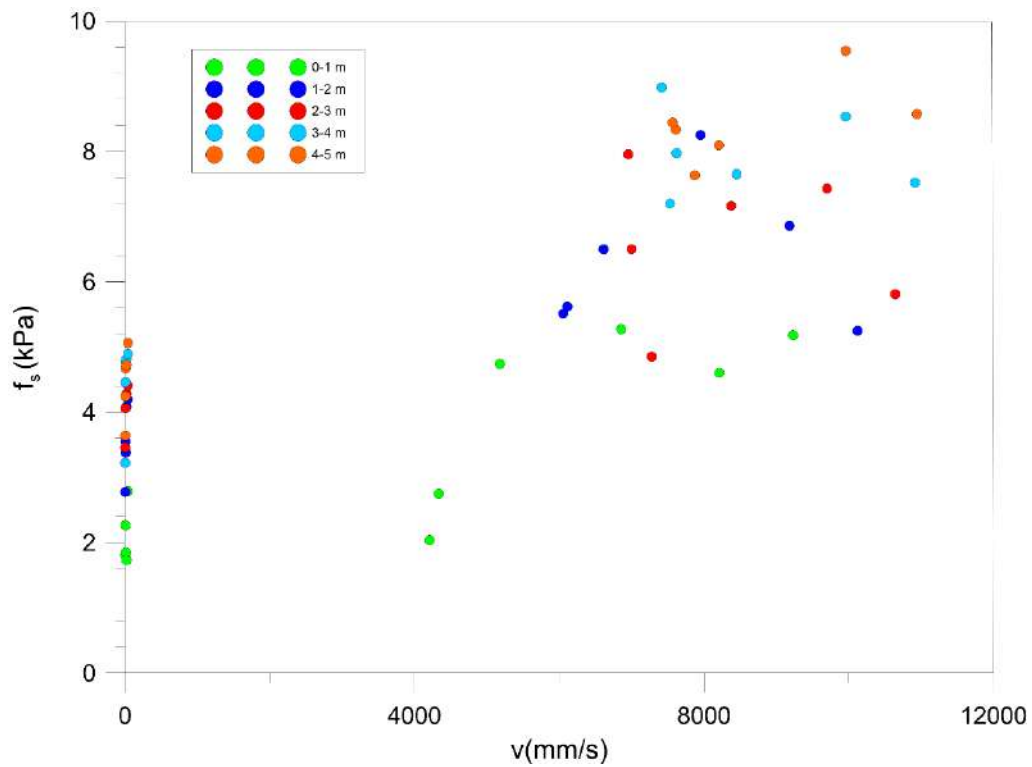


Figura 7-22 - Resistência de atrito lateral médio por metro de ensaios de piezocone convencional com velocidade variada e piezocone torpedos

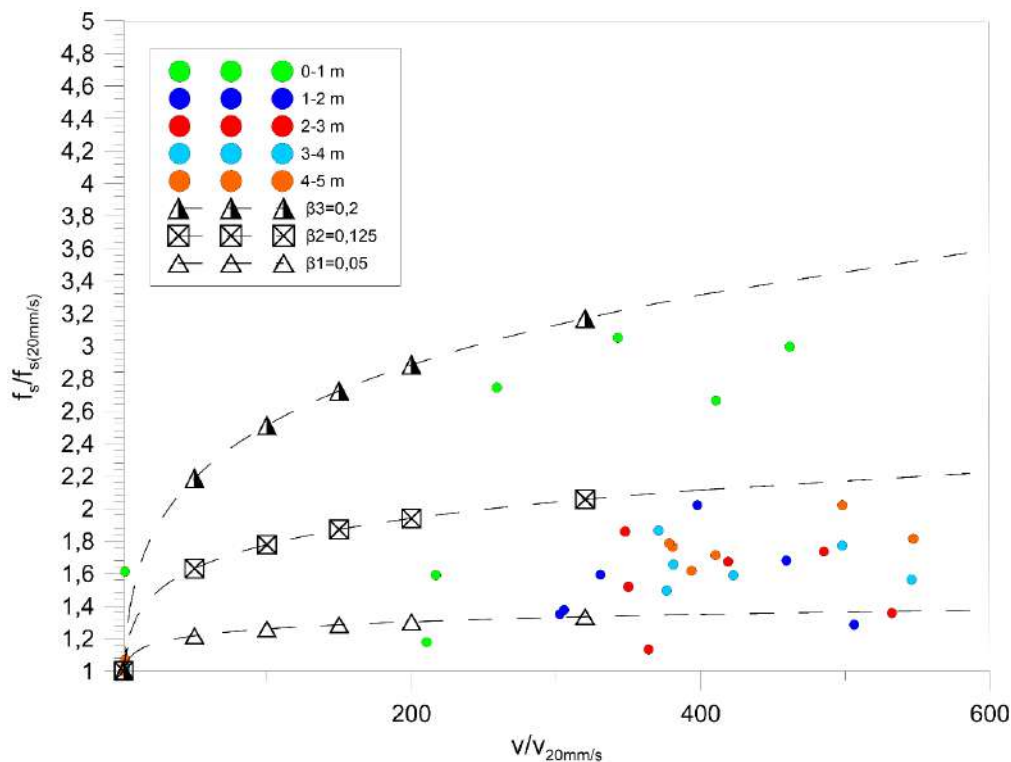


Figura 7-23 - Resistência de atrito lateral médio por metro de ensaios de piezocone convencional com velocidade variada e piezocone torpedos normalizados pelo ensaio de velocidade padrão

Com base no parâmetro β_{tip} calibrado em função da velocidade e da profundidade, obtiveram-se os valores de resistência de ponta estática equivalente (figura 7-23). Tais valores foram utilizados para a estimativa de s_u da maneira usual, através do fator de cone N_{KT} obtido para o depósito de Sarapuí II tendo como referência o ensaio de palheta (Jannuzzi, 2009).

Os resultados mostram que a correção do efeito de velocidade mostrou-se eficiente, evidenciando que os parâmetros aqui encontrados foram corretamente calibrados para o modelo de cálculo da resistência não drenada. Cabe salientar que pesquisas offshore seriam de extrema contribuição para complementação e certificação das metodologias aqui implementadas para calibrar o modelo, entre outras razões pela diferença de temperatura entre os ensaios em Sarapuí II e os ensaios offshore. De fato, é sabido que o efeito de velocidade – associado à viscosidade – é muito afetado pela temperatura. Faz-se necessário ainda o estudo do efeito da velocidade em faixas intermediárias às do piezocone torpedo e do piezocone convencional. Além disso, é de todo conveniente que se consiga a realização de ensaios com velocidades constantes e elevadas, permitindo análises mais completas.

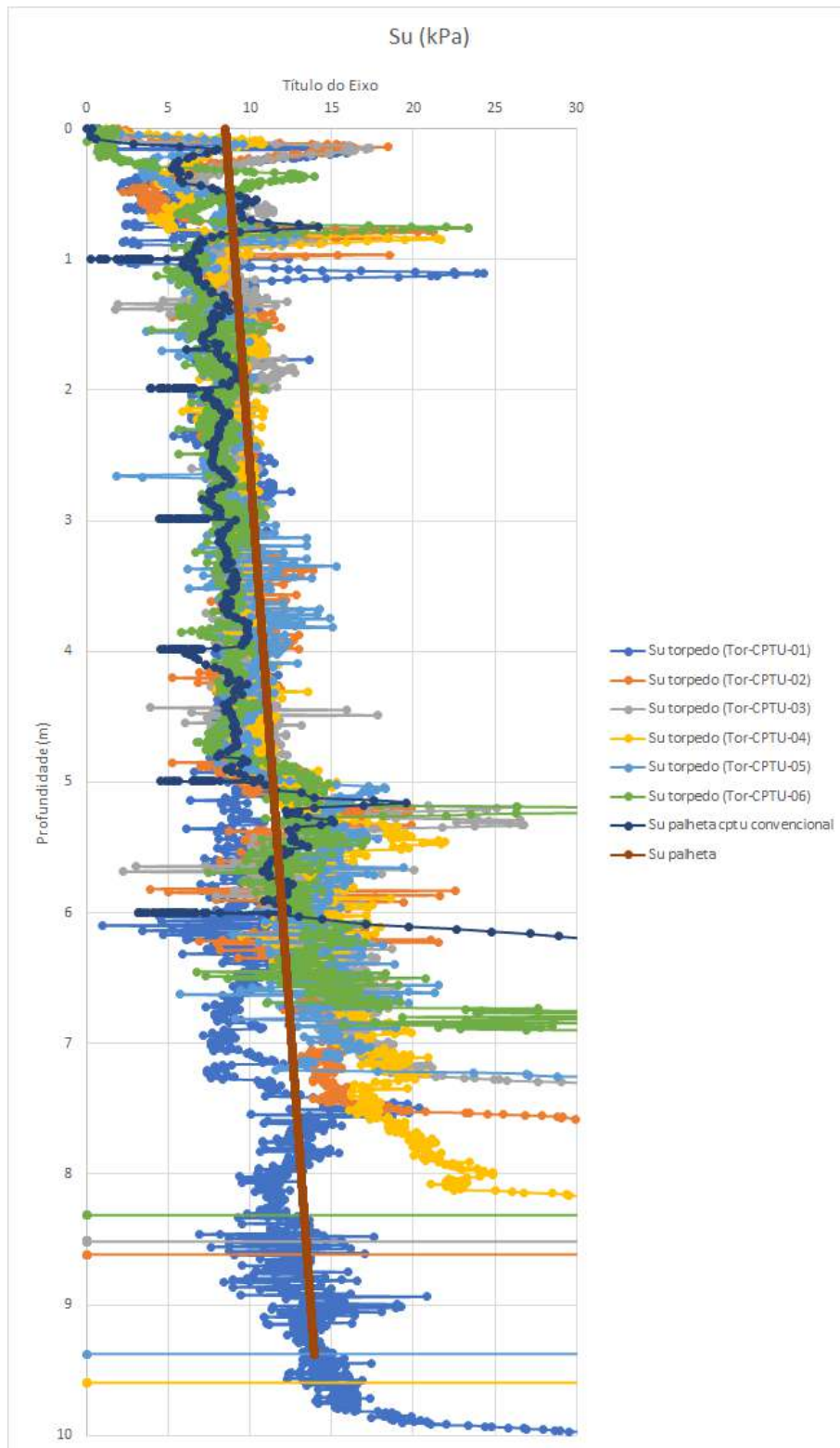


Figura 7-24 – Comparação entre a linha de tendência sugerida por Jannuzzi (2009) para S_u medido nos ensaios de palheta, e o S_u calculado com base no N_{kt} para os ensaios de pizocone convencional e torpedo.

8. Resumo, conclusões, considerações adicionais e sugestões para pesquisas futuras

8.1. Resumo, conclusões e considerações adicionais

O presente trabalho foi motivado pela oportunidade de apresentar a evolução do desenvolvimento – através de projetos conjuntos PETROBRAS-CENPES/COPPE-UFRJ –, de um novo equipamento de investigação geotécnica, intitulado piezocone-torpedo. As três campanhas de ensaio, realizadas no Campo Experimental de Sarapuí II, em 2009, 2013 e 2014 foram analisadas.

Os resultados dos ensaios das campanhas de ensaio de 2009 e 2013 foram afetados por erros no sistema de aquisição de dados, cuja correção – descrita no trabalho – demandou tempo e esforço significativos.

Foi possível perceber a evolução no processo de manutenção da saturação dos elementos porosos, permitindo leituras mais confiáveis durante o ensaio.

As velocidades de impacto dos ensaios realizados variaram no intervalo de 3,07 m/s a 9,40 m/s, para alturas de queda de 0,38 m a 4,38 m. As velocidades de impacto foram da ordem de 150 a 470 vezes a velocidade de realização do ensaio de piezocone convencional, de 20 mm/s.

Uma vez solto o piezocone-torpedo em queda livre, a velocidade ainda aumentou no interior do solo, antes de diminuir e finalmente parar a penetração, o que ocorreu em camadas de solo subjacentes à camada de material mole. A desaceleração em tais camadas chegou a saturar o acelerômetro de capacidade 5 g em alguns casos.

A combinação dos resultados obtidos nos diversos transdutores, especialmente a aceleração, a resistência de ponta e as poro-pressões, permite a compreensão nítida do mecanismo de penetração do equipamento nas diversas camadas de solo.

Os valores de profundidade máxima atingida no ensaio, obtidos por duas vezes a integral da aceleração, da marcação no cabo e através da poro-pressão de equilíbrio obtida em ensaios de dissipação, apresentaram ótima concordância na maioria dos casos. Em condição offshore, em lâminas d'água ultra-profundas, a marcação no cabo não será certamente simples de ser realizada; e a integral duas vezes da aceleração, em

comprimentos muito significativos, poderá apresentar alguma limitação quanto à acurácia dos resultados. No caso de camadas de argila mole de espessura muito significativa, é possível que a dissipação demore dias para ocorrer, mesmo no caso da poro-pressão u_1 , que dissipa mais rapidamente que u_2 . É, portanto, importante que se desenvolvam metodologias para extrapolação da curva do ensaio de dissipação, considerando-se não apenas o adensamento primário como também o adensamento secundário.

A velocidade apresenta um efeito significativo nos valores de resistência de ponta e atrito lateral, quando estes valores são comparados com os correspondentes de ensaios de piezocone à velocidade tradicional de 20 mm/s. O efeito é mais pronunciado no caso do atrito lateral. Também as poro-pressões são afetadas pelo efeito de velocidade, mais no caso de u_1 do que de u_2 . Esse assunto é muito pouco estudado, carecendo de pesquisas.

Uma metodologia para obter as forças de penetração do piezocone-torpedo como um todo - isto é, com a consideração do torpedo -, tomando por base a geometria do equipamento e os valores medidos de resistência de ponta e atrito lateral, foi desenvolvida, tendo fornecido bons resultados. Essa metodologia permite que se faça a previsão de penetração de estacas-torpedo com base nos resultados de ensaios de piezocone-torpedo.

Os valores da resistência não drenada puderam ser obtidos de modo consistente através da medida da resistência de ponta, uma vez tenha sido feita a calibração de β_{tip} a partir de ensaios convencionais de piezocone. Há ainda que avançar no sentido de desenvolvimento de metodologia para a estimativa de β_{tip} a partir de parâmetros geotécnicos. Os valores de beta tip diminuíram com a profundidade, no sentido inverso da variação do índice de plasticidade, de modo distinto do que se imaginaria. O único parâmetro geotécnico que apresentou a mesma tendência de β_{tip} com a profundidade foi a relação de sobreadensamento, mas não se verificou fundamento conceitual para a relação entre β_{tip} e OCR.

8.2. Sugestões para Pesquisas Futuras

No presente item são abordadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- (i) Realizar ensaios em faixas de velocidade intermediárias entre o piezocone convencional e o piezocone-torpedo. Seria interessante que se dispusesse de algum equipamento que permitisse a realização dos ensaios com velocidade constante.
- (ii) Avaliar se a correção do efeito da velocidade apresentados no presente trabalho permitem a utilização das propostas de Robertson 2010 para avaliar o comportamento do tipo de solo assim como é feito para o ensaio de piezocone convencional (velocidade de cravação constante de 2 cm/s).
- (iii) Avaliar em condição offshore as conclusões obtidas no presente trabalho. Ressalta-se que o efeito de velocidade, dependente da viscosidade, é função da temperatura, e esta é pouco superior a zero grau em condição de lâminas d'água elevadas.
- (iv) É importante que se desenvolvam metodologias para extrapolação da curva do ensaio de dissipação, considerando-se não apenas o adensamento primário como também o adensamento secundário.
- (v) O efeito de velocidade na geração de poro-pressões no cisalhamento, no caso de velocidades elevadas, é assunto que necessita de investigação.
- (vi) Avaliar a correção utilizando as previsões de arraste indicadas por Chow et al. 2017.

Referências Bibliográficas

ABREU, P.G.S., 2014 Offshore foundations: technologies, design and application, Master of Science Degree in Civil Engineering, Lisboa University, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

AKAL, T., STOLL, R.D., 1995, An expendable penetrometer for rapid assessment of seafloor parameters. Proceedings, Oceans '95 Conference, IEEE, 1822-1826.

ALEXANDRE, G., 2000, A Fluência Não-Drenada segundo o Modelo de MARTINS (1992). Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

ALMEIDA, M.S.S., MARQUES, M.E.S., LARCEDA, W.A., FUTAI, M.M., 2005, Investigações de campo e laboratório na argila do Sarapuí. Solos e Rochas, v. 28, n. 1, pp. 3-20.

ALMEIDA, M.S.S., MARQUES, M.E.S., 2002, The behaviour of Sarapuí soft clay. In: Proceedings of the Workshop on the Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, v. 1, pp. 477–504.

ALVES, A. M. L.; SANTA MARIA, P. E. L. ., 2001, Análise Probabilística de Problemas Geotécnicos - Aplicação à Argila do Sarapuí. Solos e Rochas (Cessou em 2006. Cont. ISSN 1980-9743 Soils & Rocks), v. 24, nº 1, p. 83-93

ALVES, A.M.L., 2004, “A Influência da Viscosidade do Solo e do Tempo Após a Cravação na Interação Dinâmica Estaca-solo em Argilas”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

ALVES, A. M. de L. ; DANZIGER, F. A. B., 2008, Geotechnical characterization of marine soils by means of free-fall penetration tests - An overview. In: 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Gdansk. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, v. 1. p. 351-358.

ALVES, A.M.L. E DANZIGER, F.A.B., 2010, Ensaio de Penetração por Queda Livre – Evolução Histórica e Aplicações na Caracterização Geotécnica de Solos Marinhos, submetido ao XV COBRAMSEG, Gramado.

ALVES, A. M. L., 2019, Comunicação pessoal.

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.

BEARD, R.M., 1981, A penetrometer for deep ocean seafloor exploration. *Proceedings, Oceans '81 Conference, IEEE*, 668-673.

BEZERRA, R.L., 1996, Desenvolvimento do Piezocone COPPE de Terceira Geração e sua Utilização na Determinação dos Parâmetros “in Situ” de Resistência ao Cisalhamento e Compressibilidade de Argilas Moles. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

BISCONTIN, G. & PESTANA, J.M. 2001. Influence of peripheral velocity on vane shear strength of an artificial clay. *Geotechnical Testing Journal*, 24(4): 423–429.

BOWMAN, L., MARCH, R., ORENBERG, P., TRUE, D., HERRMANN, H., 1995, Evaluation of dropped versus static cone penetrometers at a calcareous cohesive site. *Proceedings, Oceans '95 Conference, IEEE*, 1846-1858.

CASAGRANDE, A., SHANNON W.L., 1949, Strength of Soils under Dynamic Loads, *Transactions, A.S.C.E.*, vol. 114, pp. 755-772.

CASAGRANDE, A., WILSON, S.D., 1951, The effect of rate loading on the strength of clays and shales at constant water content. *Geotechnique*, 2, 251-263.

CAVALCANTE, E.H., GIACHETI, H.L., DANZIGER, F.A.B., COUTINHO, R.Q. et al., 2006, “Workshop Campos Experimentais de Fundações”. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba.

CHARI, T.R., SMITH, W.G., CHAUDHURI, S.N., 1981, Development of the free-fall penetrometer. *Proceedings, Oceans '81 Conference, IEEE*, 678-682.

CHOW, S.H., O'LOUGHLIN, RANDOLPH, M.F., 2014, Soil strength estimation and pore pressure dissipation for free-fall penetrometer in soft clay, *Geotechnique*, Volume 64, pp. 817-827.

CHOW, S.H., O'LOUGHLIN, C.D., WHITE, D.J., RANDOLPH, M.F., 2017, An extended interpretation of the free-fall piezocone test in clay, *Geotechnique*, Volume 67, pp. 1090-1103.

COLP, J.L., CAUDLE, W.N., 1975, Penetrometer system for measuring in situ properties of marine sediments. Proceedings, Oceans '75 Conference, IEEE, 405-411.

CRAWFORD, C.B., 1959, The influence of rate of strain on effective stresses in sensitive clay, A.S.T.M., Spec. Tech. Publ. No.254, pp.36-61.

DANZIGER, F.A.B., 2007, In Situ Testing of Soft Brazilian Soils, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXIX, No. 1-2, p. 5-22.

DANZIGER, F. A. B. ; JANNUZZI, G. M. F. ; PINHEIRO, A. V. S. ; ANDRADE, M. E. S. ; GUIMARAES, G. V. M., 2015, Informações adicionais em relação ao relatório final de atividades. Relatório técnico PEC-14482-rt6.

DANZIGER, F.A.B., FREITAS, A.C., SANTANA, C.M., JANNUZZI, G.M.F., GUIMARÃES, G.V.M. E ALVES, A.F.B., 2013, Relatório final de atividades – Provas de carga horizontal, vertical e inclinada da estaca-torpedo modelo – Realização das provas de carga, apresentação e análise dos resultados. Relatório técnico PEC-11444-rt5, abril.

DANZIGER, F.A.B., ALMEIDA, M.S.S., BEZERRA, R.L., 1997, Piezocone research at COPPE/UFRJ. In: Proceedings of the Int. Symp. on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, v. 1, pp. 229-236.

DANZIGER, F.A.B., 1990, Desenvolvimento de Equipamento para Realização de Ensaios de Piezocone: Aplicação a Argilas Moles. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

DANZIGER, F. A. B.; SCHNAID, F., 2000, Ensaios de Piezocone: Procedimentos, recomendações e interpretação. In: Seminário Brasileiro de Investigação de Campo, BIC, 2000, São Paulo. Anais do Seminário Brasileiro de Investigação de Campo, BIC. São Paulo: ABMS.

DANZIGER, F. A. B. ; JANNUZZI, G. M. F. ; FIGUEIREDO, J. G., 2013. Atividades acerca da melhoria do piezocone-torpedo e caracterização do campo experimental de Sarapuí II. PEC-14482-rt2.

DANZIGER, F. A. B. ; GUIMARAES, G. V. M. ; JANNUZZI, G. M. F. ; ANDRADE, M. E. S., 2013, Ensaios de campo com o piezocone-torpedo no Campo Experimental de Sarapuí II.

DANZIGER, F. A. B. ; JANNUZZI, G. M. F. ; GUIMARAES, G. V. M., 2009, Desenvolvimento do piezocone-torpedo - ensaios com o piezocone-torpedo no Campo Experimental da Estação Rádio da Marinha no Rio de Janeiro - Apresentação e análise dos resultados. Relatório técnico PEC-6491-rt6.

DANZIGER, F. A. B. ; JANNUZZI, G. M. F. ; GUIMARAES, G. V. M., 2008, Desenvolvimento do piezocone-torpedo - ensaios de campo realizados no Campo Experimental da Estação Rádio da Marinha no Rio de Janeiro. Relatório técnico PEC-6491-rt5.

DANZIGER, F. A. B., JANNUZZI, G.M.F., PINHEIRO, A.V.S., ANDRADE, M.E.S., LUNNE, T., 2018, Rate effect of piezocone testing in two soft clays. Cone Penetration Testing. Delft, The Netherlands: Delft University Technology.

DAYAL, U., ALLEN, J.H., 1973, Instrumented impact cone penetrometer. Canadian Geotechnical Journal, 10, 397-409.

DAYAL, U., ALLEN, J.H., REDDY, D.V., 1980, Low velocity projectile penetration of clay. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, 106 (GT8), 919-937.

DAYAL, U., 1981, Analysis of free-fall penetrometer data. Proceedings, Oceans'81 Conference, IEEE, 683-687.

DE RUITER, J., 1971, Electric penetrometer for site investigation. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, SM2, pp. 457-473.

DE RUITER, J., 1982, The static cone penetration test – State of the art report. Proc. of the II European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, v. 2, pp. 389-405.

FAIRCHILD, T. R., TEIXEIRA, W., BABINSKI, M., 2009, Decifrando a Terra. 2 ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional.

FEGHALI, J. P., 1974, Mecânica dos fluidos – Dinâmica, v. 2, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

FELLENIUS, B. H., ESLAMI, A., 2010, Soil profile interpreted from cptu data. 2º International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, EUA. www.cpt10.com.

FRANCISCO, G.M., 2004, Estudo dos Efeitos do Tempo em Estacas de Fundação em Solos Argilosos. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

FREEMAN, T.J., SCHÜTTENHELM, R.T.E., 1990, A geotechnical investigation of a deep ocean site. Geotechnical Engineering of Ocean Waste Disposal, ASTM STP 1087, Demars, K.R., Chaney, R.C. (Eds.), 255-275.

FREITAS, A.C., 2014, Comportamento à tração de estaca-torpedo modelo em argila mole. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

GIBSON, G.C, COYLE, H.M., 1968, Soil Damping Constants Related to Common Soil Properties in Sands and Clays, Research Report No 125-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M University.

GUIMARÃES, G. V. M., 2015, Comportamento de Estacas Rígidas Instrumentadas em Provas de Carga Horizontal em Argila Mole. Tese de D. Sc.

GUIMARÃES, P.F., 2000, Estudo da Influência de uma Parcela Viscosa na Resistência das Argilas Saturadas. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

HAMPTON, D., YODER, E.J., 1958, The effect of rate of strain on soil strength. Proc. 44th Annu. Road School, Purdue Univ. Indiana. Pp 116-129.

HENRIQUES JUNIOR, P. R. D. ; PORTO, E. C. ; MEDEIROS JUNIOR, C. J. ; FOPPA, D. ; COSTA, R. G. B. ; FERNANDES, J. V. V. ; DANZIGER, F. A. B. ; JANNUZZI, G. M. F. ; GUIMARAES, G. V. M. ; SILVA JUNIOR, S. P., 2010, O desenvolvimento do piezocone-torpedo: finalidades do ensaio, desafios e primeiros testes. In: XV COBRAMSEG - XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado - RS. XV COBRAMSEG.

HOULSBY, G. T., AND TEH, C. I., 1988, "Analysis of the Piezocone in Clay", Proceedings of the 1st Symposium on Penetration Testing, Florida, Balkema, Vol. 2, pp. 777- 783.

JANNUZZI, G. M. F.; ANDRADE, M. E. S. ; GUIMARAES, G. V. M. ; SILVA JUNIOR, S. P. ; DANZIGER, F. A. B., 2014, Reavaliação dos ensaios de campo com o piezocone-torpedo no campo experimental de sarapuí II. PEC-14482-rt4.

JANNUZZI, G. M. F.; ANDRADE, M. E. S. ; GUIMARAES, G. V. M. ; SILVA JUNIOR, S. P. ; DANZIGER, F. A. B., 2014, Relatório Final de Atividades. Apresentação e Análise dos Ensaios de Campo com o Piezocone-Torpedo e Piezocone Convencional com Diferentes Velocidades no Campo Experimental de Sarapuí II. Relatório técnico PEC-14482-rt5.

JANNUZZI, G.M.F., 2009, Caracterização do Depósito de Solo Mole de Sarapuí II através de Ensaios de Campo. Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

JANNUZZI, G.M.F., 2013, Inovadoras, modernas e tradicionais metodologias para a caracterização geológico-geotécnica da argila mole de Sarapuí II. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

JANNUZZI, G. M. F.; DANZIGER, F. A. B. ; GUIMARAES, G. V. M. ; SILVA JUNIOR, S. P. ; HENRIQUES JUNIOR, P. R. D. ; PORTO, E. C. ; MEDEIROS JUNIOR, C. J. ; FOPPA, D. ; COSTA, R. G. B. ; FERNANDES, J. V. V., 2010, Primeiros resultados com o piezocone-torpedo em terra: os ensaios em Sarapuí II. In: XV COBRAMSEG - XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado - RS. XV COBRAMSEG.

JEANJEAN, P.; SPIKULA, D.; YOUNG, A., 2012, Technical vetting of free-fall cone penetrometer. Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies - Present and Future. London, UK: Society of Underwater Technology.

LACASSE, S., 1980, "Procedure for Deaering the Pore Pressure Probe in the Laboratory", Technical Report No. 40015-6, NGI, Oslo.

LACERDA, W.A., COSTA FILHO, L.M., COUTINHO, R.Q., DUARTE, E.R., 1977, Consolidation characteristics of Rio de Janeiro soft clay. In: Proceedings of the Conference on Geotechnical Aspects of soft clays, Bangkok, pp. 231-243.

LACERDA, W.A., 1976, Stress-Relaxation and Creep Effects on Soil Deformation. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.

LEHANE, B. M., O'LOUGHLIN, C. D., GAUDIN, C. & RANDOLPH, M. F., 2009, Rate effects on penetrometer resistance in kaolin. *Géotechnique* 59, No. 1, 41–52.

LEVADOUX, J. N., 1980, Pore Pressures in Clay Due to Cone Penetration. Ph. D. Thesis, Dep. of Civil Eng. MIT, Cambridge, MA, USA.

LEVADOUX, J. N., AND BALIGH, M. M., 1980, “Pore Pressures During Cone Penetration in Clays”, Technical Report No. MITSG 80-12, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts.

LITKOUHI, S., POSKITT, T.J., 1980, "Damping Constants for Pile Driveability Calculations", *Géotechnique*, Vol. 30, No 1, pp. 77 – 86.

LUNNE, T., ROBERTSON, P.K., POWELL, J.J.M., 1997, Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic, EF Spon/Taylor & Francis Publ., New York.

MARTINS, I.S.M., 1992, Fundamentos de um Modelo de Comportamento de Solos Argilosos Saturados, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

MEDEIROS JR., C. J., 2002, “Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters”, Proceedings of the Offshore Technology Conference, Paper No. OTC 14151, Houston.

MEDEIROS JR., C.J., PORTO, E.C. AMARAL, C.S., MACHADO FILHO, R.Z. E FERREIRA, A.C.P., 2004. Dispositivo para Investigação Geotécnica In Situ em Solo Marinho, Brazilian Patent Number 0404168-2.

MUNTAZ, M. B., STARK, N., BRIZZOLARA, S., 2018, Pore pressure measurements using portable free fall penetrometer, Conference: Proceedings of the 4th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'18). Delft. Junho, pp 461-467.

O'LOUGHLIN, C. D., RICHARDSON, M. D., RANDOLPH, M. F. & CAUDIN, C., 2013. Penetration of dynamically installed anchors in clay. *Géotechnique* 63, No. 11, 909–919, [http:// dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.137](http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.137).

O'LOUGHLIN, C. D., GAUDIN, C., MORTON, J. P. & WHITE, D. J., 2014. The use of micro-electro mechanical system accelerometers for measuring dynamic penetration events in geotechnical centrifuge tests. *Int. J. Phys. Modelling Geotech.* 14, No. 2, 31–39.

O'LOUGHLIN, C.D., RANDOLPH, M.F. & RICHARDSON, M.D. 2004. Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors. *Proc. Offshore Tech. Conf., Houston, OTC 16841*.

O'LOUGHLIN, C.D., BLAKE, A.P. & GAUDIN, C., 2016. Towards a design method for dynamically embedded plate anchors, *Géotechnique*, 66(9): 741–753.

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*.

OSTERBERG, J.O., PERLOFF, W.H., 1960, Stress strain characteristics of compacted clay under varied rates of strain, *Highw. Res. Board Proc.*, 29, pp. 605-618.

ORTIGÃO, J.A.R., WERNECK, M.L.G., LACERDA, W.A., 1983, Embankment failure on clay near Rio de Janeiro. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 109, n. 11, pp. 1460-1479.

ORTIGÃO, J.A.R., LACERDA, W.A., 1979, Propriedades geotécnicas da argila cinza do Rio de Janeiro. *Relatório Parcial, Instituto de Pesquisa Rodoviária - IPR/DNER 2.019-03.01-2/14/42*.

PACHECO SILVA, F, 1953, Shearing strenght of a soft clay deposit near Rio de Janeiro. *Géotechnique*, v. 3, pp. 300-305.

PECK, G.M. 1962, Bearing theories related to model tests on a remoulded clay. *M. Eng. thesis, McGill Univ. Montreal*.

PORTO, E.C., MEDEIROS JUNIOR, C.J., HENRIQUES JUNIOR, P.R.D., FOPPA, D., FERREIRA, A.C.P., COSTA, R.G.B., FERNANDES, J.V.V., DANZIGER, F.A.B., JANNUZZI, G.M.F., GUIMARAES, G. V. M., SILVA JUNIOR, S. P., ALVES, A. M. L., 2010, The development of the torpedo-piezocone. "In: OMAE 2010 - 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010. Shanghai. Junho.

PRESLAN, W.L., 1970, Accelerometer monitored coring. Proceedings, Civil Engineering in the Oceans II, ASCE, 637- 641.

RANDOLPH, M.F., STANIER, S.A., O'LOUGHLIN, C.D, CHOW, S.H., BIENEN, B., DOHERTY, J.P., MOHR, H., RAGNI, R., SCHNEIDER, M.A., WHITE, D.J., SCHNEIDER, J.A., 2018, Penetrometer equipment and testing techniques for offshore design of foundations, anchors and pipelines. Conference: Proceedings of the 4th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'18). Delft. Junho.

RANDOLPH, M.F., 1990, Analysis of the Dynamics of Pile Driving, Research Report no G1001, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Australia, Perth, Austrália.

ROBERTSON. P.K., CAMPANELLA, R.G., GILLESPIE, D., GREIG, J., 1986, Use of Piezometer Cone data. In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, pp 1263-1280.

ROBERTSON, P.K., 1990, Soil classification using the cone penetration test: Reply. Canadian Geotechnical Journal, v.28, pp. 176-178.

ROBERTSON, P.K., 1991, Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, v.27, n.1,pp. 151-158.

ROBERTSON, P.K. WRIDE, C.E., 1998, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.35, n.3,pp. 442-459.

ROBERTSON, P.K., 2009, CPT interpretation – a unified approach, Canadian Geotechnical Journal, v. 46, pp. 1-19.

ROBERTSON, P.K., 2010, Soil behaviour type from the CPT: an update. 2^o International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, EUA. www.cpt10.com

ROBERTSON, P.K., 2012a, Interpretation of in-situ tests – some insights. Mitchell Lecture – International Symposium on Site Characterization, ISC'4, Recife, PE, Brasil.

ROBERTSON, P.K., BOGGRESS R., 2010, CPT for soft sediments and deepwater investigations, 2nd international Symposium on cone penetration testing, Huntington Beach, CA, USA, May.

ROCKER, K. 1985. Handbook for marine geotechnical engineering. Naval Civil Eng. Lab., Port Hueneme, CA.

SAYÃO, A.S.F.J., 1980, Ensaio de Laboratório na Argila Mole da Escavação Experimental de Sarapuí. Dissertação de M.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro.

SCHIMMING, B.B., HASS, H.J., SEXA, H.C., 1966, Study of dynamic and static failure envelopes. J. Soil Mech. Found. Div., A.S.C.E., 92, No. SM2, pp. 105-124.

SCHNEIDER, J.A., RANDOLPH, M.F., MAYNE, P.W., RAMSEY, N.R., 2008, Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engrg. v. 134, n. 11, pp. 1569-1586.

SCOTT, R.F., 1967, In-place soil mechanics measurements. Marine Geotechnique, A.F. Richards (Ed.), University of Illinois Press, 264-271.

SCOTT, R.F., 1970, In-place ocean soil strength by accelerometer. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96 (1), 199-211.

SHENG D., KELLY R., PINEDA J., BATES L., 2014, Numerical study of rate effects in cone penetration test, 3rd international symposium on cone penetration testing, Las Vegas, Nevada, USA.

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.

STARK, N., RADOSAVLJEVIC, B., QUINN, B., LANTUIT, H., 2011, Application of portable free-fall penetrometer for geotechnical investigation of Arctic nearshore zone, *Can. Geotech.*, pp 31-46.

STEGMANN, S., MÖRZ, T., KOPF, A., 2006, Initial results of a new free fall – cone penetrometer (FF-CPT) for geotechnical in situ characterization of soft marine sediments. *Norwegian Journal of Geology*, 86, 199-208.

STEINER, A., KOPF, A.J., L'HEUREUX, J.S., KREITER, S., STEGMANN, S., HAFLIDASON, H. & MOERZ, T. 2014. In situ dynamic piezocone penetrometer tests in natural clayey soils—a reappraisal of strain-rate corrections. *Can. Geotech. J.*, 51(3): 272–288.

SUZUKI Y., LEHANE B.M., 2014, Field observations of cpt penetration rate effects in Burswood clay, *3rd international symposium on cone penetration testing*, Las vegas, Nevada, USA.

SUZUKI Y., LEHANE B.M., 2014, Rate dependence of qc in two clayey sands, *3rd international symposium on cone penetration testing*, Las vegas, Nevada, USA, 2014.

THOMPSON, D., MARCH, R., HERRMANN, H., 2002, Groundtruth results for dynamic penetrometers in cohesive soils. *Proceedings, Oceans '02 Conference, IEEE*, 2117-2123.

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.

TAYLOR, D.W., 1948, *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.

TEH, C. I., 1987, “An Analytical Study of the Cone Penetration Test”, D.Phil. thesis, Department of Civil Engineering, University of Oxford, Oxford, UK.

TEH, C. I., AND HOULSBY, G. T., 1988, “Analysis of the Cone Penetration Test by the Strain Path Method”, *Proceedings of the 6th International Conference Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Vol. 1*, pp. 397-402.

TRUE, D.G., 1976, Undrained vertical penetration into ocean bottom soils. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley.

TORTURELI, M.R., 2016. Ensaio de cisalhamento simples (dss) cíclico na argila mole de Sarapuí II. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

WANG, W.L., 1971, Low velocity projectile penetration. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97 (SM12), 1635-1655.

WERNECK, M.L.G., COSTA FILHO, L.M., FRANÇA, H., 1977, In-situ Permeability and Hydraulic Fracture Test in Guanabara Bay Clay. In; Proc. Conference on Geotechnical Aspect of Soft Clays, pp. 399-418, Bangkok.

WHITMAN, R.V., 1957, The behavior of soils under transient loadings, Proc, Fourth Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. London, England.

WHITMAN, R.V., HEALY, K.A. 1962. Shearing resistance of sand during rapid loadings. Mass. Inst. Techol. R62-113MIT. Cambridge, Mass.

WISSA, A.Z.E., MARTIN, R.T., GARLANGER, J.E., 1975, The piezometer probe. Proc., Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Raleigh, v. 1, pp. 536-545.

YOUNG A.G., BERNARD B. B., REMMES B. D., BABB L.V., 2011, “CPT stinger” – An innovative method to obtain CPT data for integrated geoscience studies, Offshore technology conference, May.

DEJONG, J.T., FROST, J.D., 2002, A multisleeve friction attachment for cone penetrometer, Geotechnical testing journal, GTJODJ, Vol.25, No. 2, Junho, pp 111-127.

ZHENG J., HOSSAIN M.S., WANG D., 2014, Large deformation finite element analysis of CPT on strain softening rate dependent non-homogeneous clay, 3rd *international symposium on cone penetration testing*, Las vegas, Nevada, USA.