

ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DE ESTACAS TORPEDO

UILSON ALVES DA SILVA

MOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ESPECIALISTA EM ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES.

Aprovada por:

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, Dsc.

Cipriano J. Medeiros Junior, Engenheiro Civil

Prof. Francisco de Resende Lopes, Ph.D

Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2008

SILVA, UILSON ALVES DA

Análise de cravabilidade de estacas torpedado [Rio de Janeiro] 2008

VI, 48p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, Engenharia de Fundações, 2008)

Monografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. análise dinâmica

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Resumo da monografia apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Especialista

ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DE ESTACAS TORPEDO

Uilson Alves da Silva

Maio/2008

Orientador: Fernando Artur Brasil Danziger

Cipriano J. Medeiros Junior

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho apresenta a aplicação do método dinâmico proposto por Silva (2005) para previsão da penetração dinâmica da estaca torpedo no solo. A abordagem do problema é feita segundo o princípio trabalho-energia considerando a estaca torpedo como elemento rígido. O método apresenta formulação simples, e pode ser usado para solos argilosos e arenosos.

Abstract of Monograph presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of specialist

DRIVEABILITY ANALYSIS OF TORPEDO PILES

Uilson Alves da Silva

May/2008

Advisor: Fernando Artur Brasil Danziger

Cipriano J.Medeiros Junior

Department:Civil Engineering

This work presents the application of the dynamic method considered by Silva (2005) for forecast of the dynamic penetration of the torpedo pile into the ocean bottom. The problem is approached to work-energy principle considering the torpedo pile as rigid element. The method presents simple formularization and can be used for both clay and sand.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1 FUNDAÇÕES PARA PONTOS DE ANCORAGEM.....	3
2.1.1 Fundações superficiais.....	3
2.1.2 Ancoras	5
2.1.2.1 Ancoras de peso.....	5
2.1.2.2 Âncoras de carga vertical	7
2.1.2.2 Âncoras de placa.....	8
2.1.3 Fundações profundas	10
2.1.3.1 Estacas cravadas por percussão	10
2.1.3.2 Estacas cravadas por sucção	10
2.1.3.3 Estacas perfuradas e cimentadas.....	12
2.1.4 Estacas cravadas por gravidade	12
2.2 VELOCIDADE DE IMPACTO	17
2.3 O SOLO SOB CARREGAMENTO DINÂMICO	18
2.4 MODELOS DE SOLO PARA PREVISÃO DA PENETRAÇÃO DINÂMICA	19
2.4.1 O modelo de Smith (1960)	19
2.4.2 O modelo de True (1976)	20
2.4.3 O modelo de Simons (1985).....	23
CAPÍTULO 3 - MÉTODO ANÁLITICO PARA ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DA ESTACA TORPEDO	26
3.1 A EQUAÇÃO DA ONDA APLICADA A ANÁLISE DA ESTACA TORPEDO	26
3.2 MODELO DE SOLO	26
3.3 MODELO NUMÉRICO.....	29
CAPÍTULO 04 - APLICAÇÃO DO MÉTODO	30
4.1 PENETRAÇÃO SIMULADA PARA SOLOS COESIVOS COM AMORTECIMENTO DE SMITH.	30
4.1.1 Penetração simulada $V_0=27$ m/s	32
4.2 PENETRAÇÃO SIMULADA PARA SOLOS NÃO COESIVOS	34
4.2.1 Penetração simulada $V_0=15$ m/s	36
CAPÍTULO 05 - APLICAÇÃO DO MÉTODO COM O AMORTECIMENTO PROPOSTO.....	39
5.1 AMORTECIMENTO PROPOSTO.....	39
5.2 AMORTECIMENTO PROPOSTO PARA SOLOS COESIVOS.....	39
5.3 AMORTECIMENTO PROPOSTO PARA SOLO NÃO COESIVO.....	40
5.4 PENETRAÇÃO SIMULADA PARA SOLOS COESIVOS.....	41

5.5	PENETRAÇÃO SIMULADA PARA SOLOS NÃO COESIVOS	44
	CAPÍTULO 06 – CONCLUSÃO	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fundações superficiais: (a) TLP Snorre B (b) Semi-submersível Troll Olje.....	4
Figura 2 - Fundação superficial: (a) Transporte e (b) detalhe da instalação	4
Figura 3 - âncora de peso.....	5
Figura 4 - Âncora convencional de aço	6
Figura 5 - Instalação da ancora.....	6
Figura 6 – Exemplo de VLA modelo Stevmanta	7
Figura 7 - Instalação da VLA	8
Figura 8 - Ancora de Placa	9
Figura 9 - Instalação da Ancora de Placa	9
Figura 10 – Martelo Hidráulico (Menk, 2008)	10
Figura 11 - Estaca de sucção(Aguiar, 2007).....	11
Figura 12 - Estaca de sucção instalada(SPT, 2007).....	11
Figura 13 – DPA Randolph et al (2004).....	13
Figura 14 - Estaca torpedo sendo transportada, Medeiros (2001)	13
Figura 15 - Instalação para linhas de risers(Medeiros, 2002).....	14
Figura 16 Componentes do sistema de instalação	14
Figura 17 - Instalação de estaca torpedo para ancoragem de <i>risers</i> (MEDEIROS, 2002) ...	15
Figura 18 - Ancoragem de linhas flexíveis (Medeiros, 2001).....	16
Figura 19 - Estaca Torpedo para ancoragem de MODUs	16
Figura 20 - Força de arrasto atuando na estaca	17
Figura 21 - Avaliação da profundidade em função do fator de adesão.	32
Figura 22 – Penetração simulada $v_0=27\text{m/s}$	33
Figura 23 – Resistências mobilizadas durante a penetração.....	34
Figura 24 – Avaliação do ângulo de adesão solo-estaca	36
Figura 25 – Penetração simulada, $v_0=15\text{m/s}$	37
Figura 26 - Resistências mobilizadas durante a penetração.	38
Figura 27 – Influência do amortecimento de ponta e lateral	39
Figura 28 – Amortecimento para solo coesivo.....	40
Figura 29 - Amortecimento para solo não coesivo.....	41
Figura 30 - Perfis de resistência e penetrações medidas e calculadas	43
Figura 31 - Valores da penetração	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Método numérico de True (1976).....	23
Tabela 2 – Propriedades do solo para aplicação do modelo de Simons (1985)	25
Tabela 3 - Propriedades da estaca torpedo (MEDEIROS, 2008)	30
Tabela 4 – Propriedades da estaca torpedo.....	35
Tabela 5 - Torpedos Analisados	42

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

O desafio de explorar e produzir óleo e gás em águas profundas e ultra- profundas trouxe consigo a necessidade de otimizar e reduzir custos dos componentes do sistema flutuante offshore, definido como sendo um conjunto formado pelas unidades marinhas de exploração, produção e/ou armazenamento de hidrocarbonetos, risers e linha de ancoragem.

As fundações das linhas de ancoragem normalmente empregam para tal fim as ancoras de arrasto, estruturas de gravidade e estacas que podem ser instaladas por cravação, sucção ou perfurada e cimentada. Entretanto, essas alternativas mostram-se muito onerosas e apresentam relativa dificuldade de instalação a medida que a lâmina d'água aumenta (MEDEIROS, 2002).

A utilização da estaca torpedo surge dentro desse contexto como uma alternativa de fundação para os pontos de ancoragem.

De uso recente, a estaca torpedo é uma estaca tubular de aço, com aletas ou não, de ponta cônica, lastreada com material de massa específica elevada - para lhe garantir estabilidade durante a queda e maior penetração no solo marinho - cuja cravação se dá pela energia cinética adquirida durante a queda.

No Brasil, essa fundação tem sido utilizada na Bacia de Campos para ancoragem de linhas de risers flexíveis, mono-bóias, estruturas flutuantes de perfuração MODUs (*Mobile Drilling Unit*) e produção UEPs (Unidades Estacionárias de Produção) e, mais recentemente, para instalação de condutores (Medeiros, 2007).

É óbvio que o emprego desta alternativa de fundação está intimamente ligado as condições geotécnicas do local onde se deseja instalar a estaca. Isso porque três situações podem ocorrer durante o processo de instalação; a estaca pode penetrar totalmente no solo; a estaca pode penetrar parcialmente no solo; ou mesmo não penetrar.

Em razão disso, o presente trabalho apresenta um método analítico para prever a penetração da estaca torpedo do solo marinho, baseado no modelo dinâmico proposto por Silva (2005) para problemas de impacto.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a penetração da estaca torpedo no solo oceânico utilizando o modelo dinâmico proposto por Silva (2005).

Avaliar os principais parâmetros que governam a penetração da estaca no solo, sendo estes: a massa, a velocidade, geometria, resistência ao cisalhamento e amortecimento.

Verificar se o modelo proposto é adequado a este tipo de análise.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é composto de seis capítulos organizados conforme se descreve abaixo.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre os principais tipos de fundações empregados para ancoragem de estruturas offshore.

Apresenta ainda aspectos relevantes na análise de penetração dinâmica da estaca torpedo no solo tais como: velocidade de impacto, solo sob carregamento dinâmico e modelos de solo para previsão da penetração dinâmica.

No capítulo seguinte é proposto um método analítico, utilizando o modelo de solo de Smith (1960) e os parâmetros e cálculos da API, para previsão da penetração dinâmica da estaca torpedo.

Avaliam-se, no quarto capítulo, os valores de amortecimento propostos por Smith (1960), na análise de estacas cravadas por gravidade.

No quinto capítulo, são propostos novos valores para o amortecimento de Smith em função do tipo de solo.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões das análises feitas no presente trabalho.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 FUNDAÇÕES PARA PONTOS DE ANCORAGEM

Segundo Mello e Bogossian (1998), existem três tipos de fundação para estruturas oceânicas, que são classificadas segundo o gênero de metodologia de projeto.

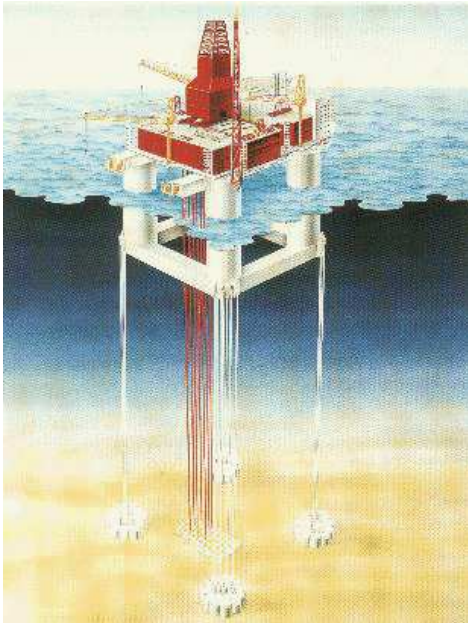
- Fundações Superficiais
- Ancoras
- Fundações Profundas

2.1.1 Fundações superficiais

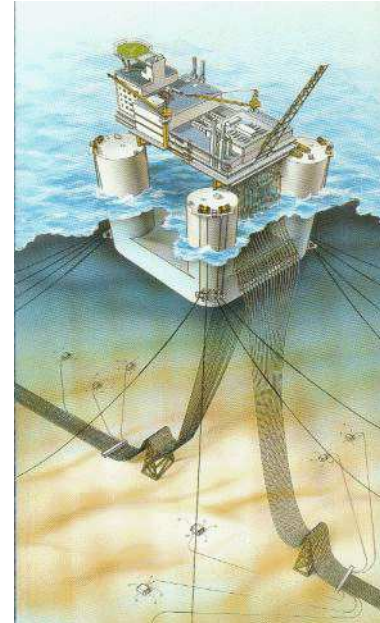
Os tipos usuais de fundações superficiais empregados em estruturas *offshore* são seguintes:

- radier* celular - muito utilizado em plataformas de gravidade.
- radier* plano – utilizado para estruturas de fundo do tipo *manifolds*, que são estruturas destinadas a reunir a produção dos diversos poços e conduzir através de um único duto a plataforma.
- Sapatas – utilizadas em dutos e plataformas auto-elevatórias. Neste último caso, as sapatas são do tipo *spud can*.

Entretanto, não é comum a utilização de fundações superficiais para a ancoragem de estruturas flutuantes. A figura 1 mostra dois exemplos de estruturas flutuantes que utilizam fundação superficial nos pontos de ancoragem.



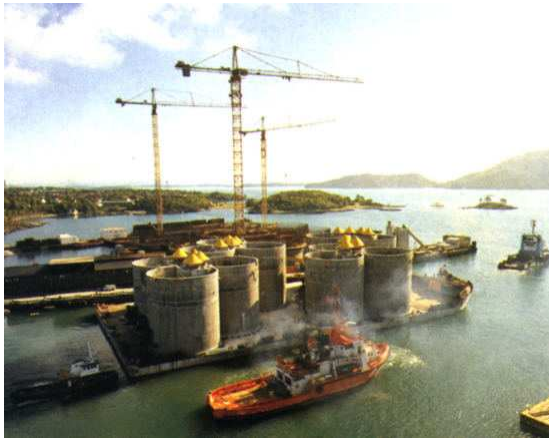
(a)



(b)

Figura 1 – Fundações superficiais: (a) TLP Snorre B (b) Semi-submersível Troll Olje

A fundação superficial que se utiliza nos pontos de ancoragem consiste de uma sapata, normalmente circular, dotada de uma “saia” que penetra no solo marinho, conforme mostra a figura 2b.



(a)



(b)

Figura 2 - Fundação superficial: (a) Transporte e (b) detalhe da instalação

Nos últimos anos, esta alternativa de fundação tem se mostrado promissora para estruturas *offshore* destinadas a geração de energia eólica em água rasas, Houlsby (2002).

2.1.2 Âncoras

As âncoras atualmente utilizadas na indústria offshore podem ser classificadas em quatro grupos:

- i. Âncoras de peso;
- ii. Âncoras convencionais de aço;
- iii. Âncoras verticais e;
- iv. Âncoras de placa.

2.1.2.1 Âncoras de peso

De pouca eficiência, estas âncoras são usadas para ancoragens onde é reduzido o risco de perda da locação do meio naval flutuante.



Figura 3 - âncora de peso(Offshore-technology)

Para este tipo de ancoragem, a componente vertical é resistida pelo peso submerso da poita e pela sucção que ocorre entre solo e a base (MELLO E BOGOSSIAN, 1998). Estes autores acrescentam que quando a sucção se dá em solos coesivos, pode vir a dobrar a capacidade de carga da poita.

2.1.2.2 Âncoras convencionais

São fabricadas pela Vryhof Anckers e dividem-se em sete classes, de A a G, distinguindo-se pela geometria. As âncoras do tipo A proporcionam ultrapenetração e, em

razão disso, são chamadas de HHC (*high holding capacity*), enquanto, as do tipo B, proporcionam grande penetração.

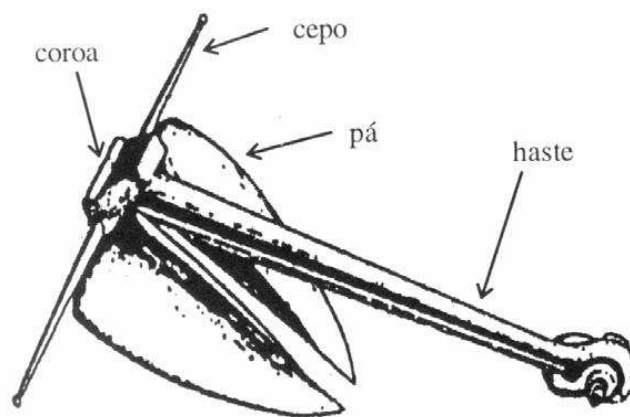


Figura 4 - Âncora convencional de aço

As partes que compõe a âncora são: a haste, onde se conecta o cabo de ancoragem, que dá o ângulo de ataque para o enterramento da âncora no solo; a garra, que é a parte responsável por mobilizar a capacidade de carga; o cepo que é um braço transversal âncora e tem por finalidade impedir a rotação da âncora no solo; e a coroa, que garante a rigidez a âncora por unir as três partes.

O processo de instalação é por arrasto. A embarcação de apoio, por intermédio da âncora, iça a linha de ancoragem da plataforma utilizando um cabo de apoio, *work wire*. Durante esta operação, os guinchos da plataforma e da embarcação liberam quantidades de linha até que o alvo seja atingido.

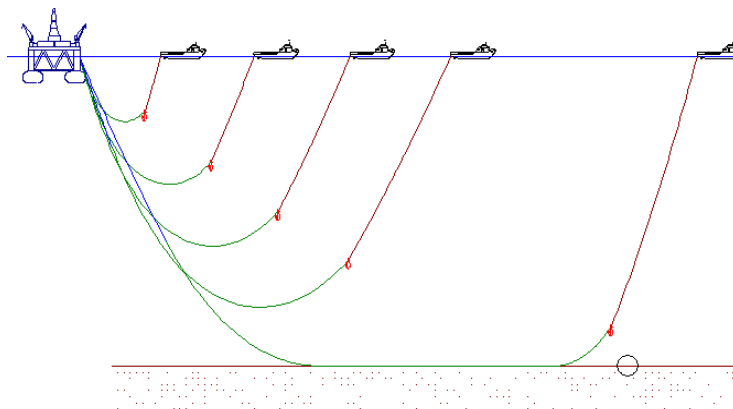


Figura 5 - Instalação da âncora

Tem sido utilizada no sistema de ancoragem convencional, com a linha em catenária, face ao seu menor custo.

2.1.2.2 Âncoras de carga vertical

As âncoras de carga vertical ou VLAs (Vertical Loaded Anchors) possuem eficiência superior as ancoras do tipo HHC, face a sua grande profundidade de enterramento. Segundo Mello (1998), o modelo Stevmanta de 150 t, atingiu uma profundidade da ordem de 17m, nos solos argilosos da bacia de Campos.



Figura 6 – Exemplo de VLA modelo Stevmanta

O processo de instalação é muito semelhante ao das ancoras convencionais e pode ser visualizado na figura abaixo.

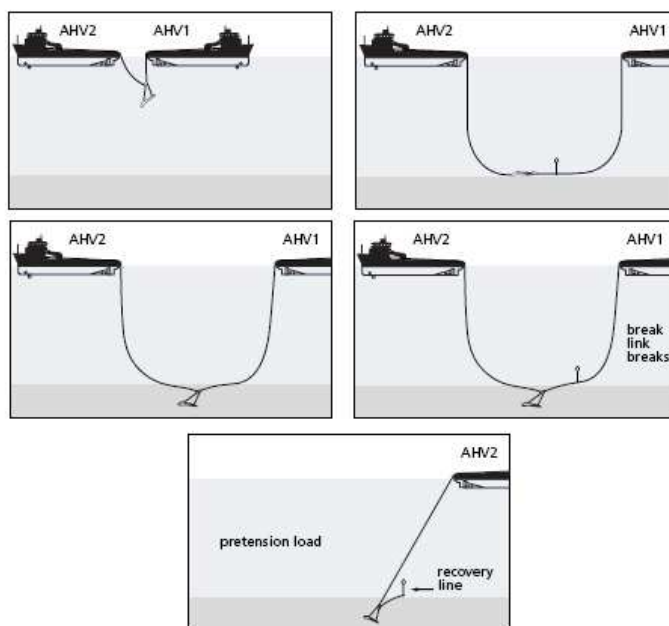


Figura 7 - Instalação da VLA

2.1.2.2 Âncoras de placa

Âncoras de placa ou PEA (Plate Embedment Anchor) diferem-se das âncoras convencionas pela maneira com que penetram no solo marinho. A penetração se dá por vibração ou pela utilização de propelentes. Apresentam três principais vantagens em relação às âncoras convencionais:

- i. Elas resistem de forma eficiente a carregamentos em qualquer direção, inclusive a cargas verticais.
- ii. Elas podem ser instaladas de maneira precisa em qualquer alvo.
- iii. Apresentam elevada capacidade de carga, que está relacionada com a profundidade atingida pela âncora no solo.

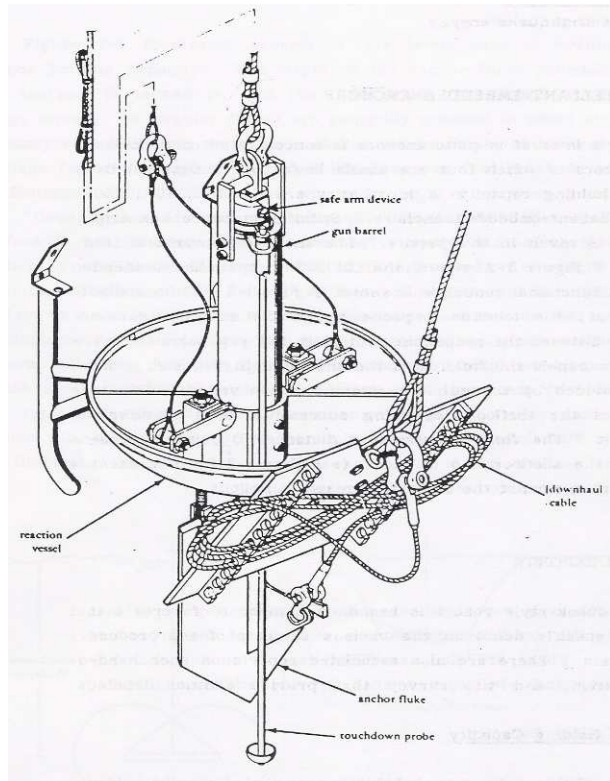


Figura 8 - Ancora de Placa

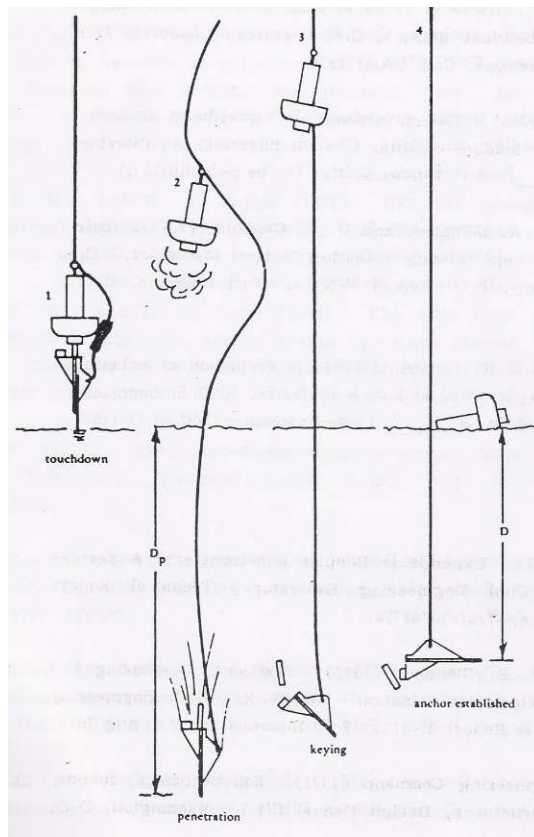


Figura 9 - Instalação da Ancora de Placa

2.1.3 Fundações profundas

O aço é o material normalmente empregado nas fundações profundas em razão da facilidade para reparos e emendas de estacas longas. É comum a utilização de estacas de seção circular com espessura de parede variando de 2,5 cm a 5 cm (MELLO, 1998).

2.1.3.1 Estacas cravadas por percussão

Podem ser de ponta aberta ou fechada e para sua cravação utilizam martelos à percussão dos seguintes tipos:

- i. A vapor de simples e dupla ação;
- ii. Diesel de simples e dupla ação;
- iii. Hidráulicos de dupla ação e;
- iv. Vibratórios.



Figura 10 – Martelo Hidráulico (Menk, 2008)

2.1.3.2 Estacas cravadas por sucção

Este tipo de fundação tem sido utilizado na ancoragem de plataformas flutuantes do tipo “*taut leg*” ou de raio curto. Consiste de uma estaca metálica, normalmente de grande diâmetro, aberta na ponta e com o topo tamponado.

A instalação se dá posicionando a estaca no leito marinho, onde esta penetrará uma dada profundidade (até que a resistência do solo se iguale ao peso da estaca) em virtude do

peso próprio, devendo-se, sempre, garantir sua verticalidade. Acopla-se uma bomba centrífuga de sucção na câmara e inicia-se o bombeamento. A água existente no interior da câmara começa a ser removida, criando, assim, um diferencial de pressão. A força de cravação é o produto da área do topo pelo diferencial de pressão.



Figura 11 - Estaca de sucção(Aguiar, 2007)



Figura 12 - Estaca de sucção instalada(SPT, 2007)

Embora tenha sido desenvolvida para solos argilosos moles, também pode ser empregada em solos arenosos. Uma discussão mais profunda sobre o tema encontra-se em Moreno (2005).

2.1.3.3 Estacas perfuradas e cimentadas

Este tipo de estaca é normalmente utilizado quando se dispõe de um meio naval para perfuração de poço. Mello (1998) acrescenta que outros tipos de equipamentos podem ser utilizados para executar este tipo de estaca, como, por exemplo, sondas rotativas que se acoplam diretamente na cabeça da estaca e motor rotativo tipo turbina, acionado por fluido de perfuração, trabalhando com broca acoplada.

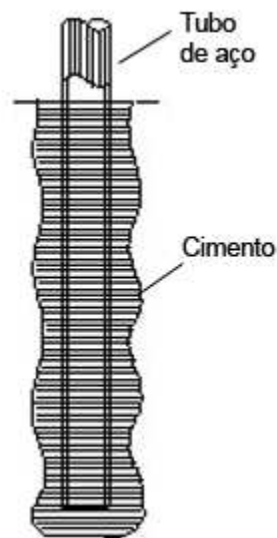


Figura 13- Estaca perfurada e cimentada

2.1.4 Estacas cravadas por gravidade

Atualmente existem dois tipos de estacas que são cravadas por gravidade; as estacas torpedo e as DPAs (*Deep Penetrating Anchors*). Face à similaridade entre os dois tipos, apenas a estaca torpedo é discutida neste trabalho. Uma discussão mais profunda sobre as DPAs pode ser encontrada em Lieng *et al* (1999).



Figura 14 – DPA Randolph et al (2004)



Figura 15 - Estaca torpedo sendo transportada, Medeiros (2002)

O grande mérito deste tipo de solução para pontos de ancoragem reside no fato de que a fabricação e a instalação desse tipo de estaca são simples. Não requer a operação de equipamentos especiais na profundidade de lançamento e também não necessita de meio naval relativamente grande (MEDEIROS, 2002). Este autor observa ainda que o processo de instalação da estaca torpedo é pouco sensível ao aumento da lamina d'água, viabilizando, assim, seu emprego em águas ultra-profundas.

A instalação da estaca para ancoragem de linhas flexíveis se dá da seguinte forma: uma embarcação de apoio posiciona a estaca a uma dada altura do leito marinho, chamada de altura de queda, em seguida prende-se a linha de lançamento no primeiro *shark jaw* fazendo a alça de tiro, comprimento necessário para o lançamento e também para penetração do torpedo, que é presa ao segundo *shark jaw*. Verificado o posicionamento, a estaca é liberada após a abertura do primeiro *shark jaw*.



Figura 16 - Instalação para linhas de risers(MEDEIROS, 2002)

Os componentes do sistema de instalação da estaca torpedo T-98 são os que se apresentam na figura 16.

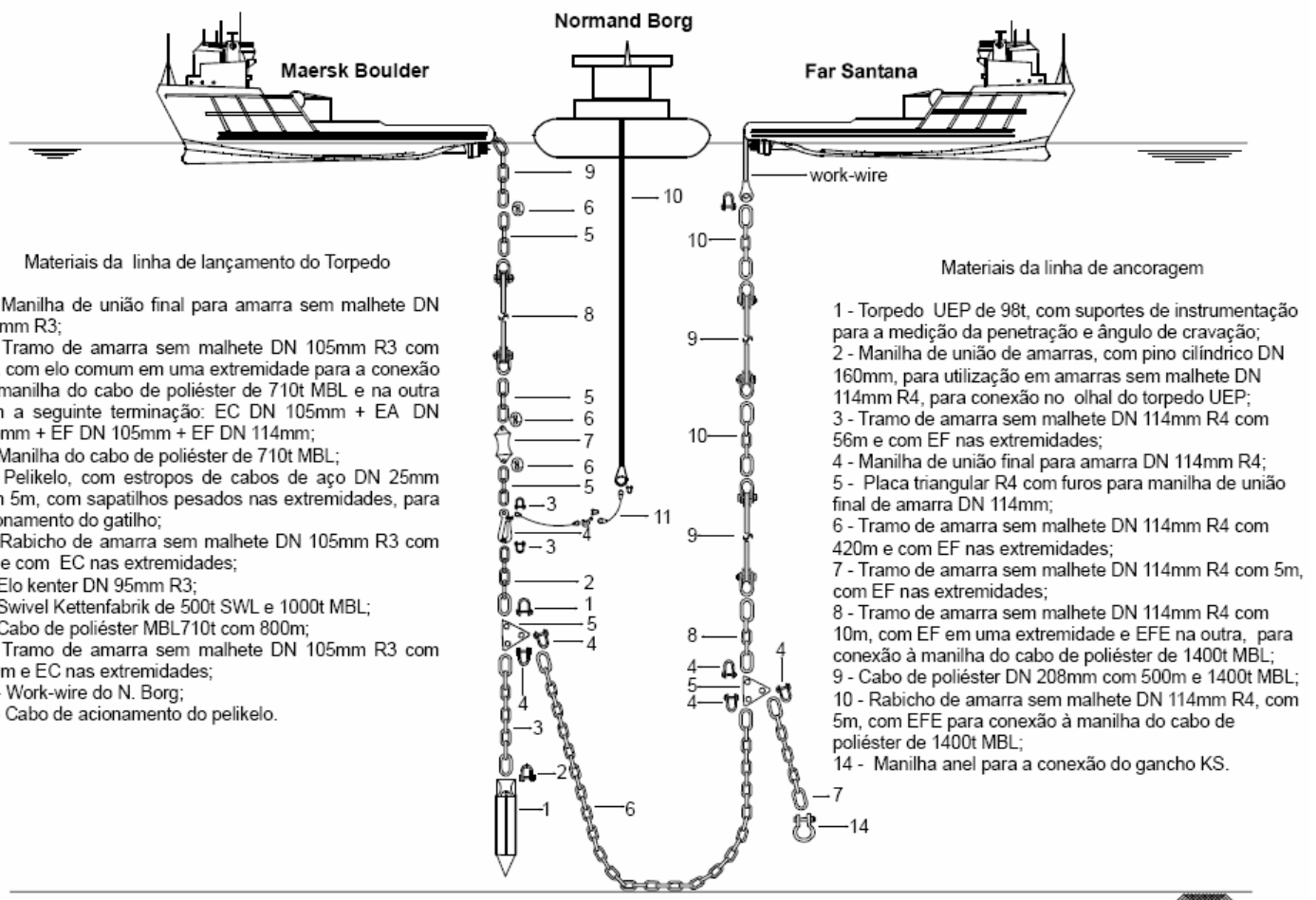


Figura 17 Componentes do sistema de instalação

Três diferentes tipos de torpedo têm sido utilizados para ancoragem de estruturas que, neste trabalho, denominar-se-á; Torpedo I, Torpedo II e Torpedo III.

O Torpedo I é utilizado para ancoragem de linhas flexíveis, com a função de impedir que os esforços de tração provenientes do movimento das unidades flutuantes cheguem até os equipamentos de fundo. Consiste essencialmente de uma estaca tubular de 762 mm de diâmetro externo, 12 m de comprimento e pesando cerca de 240 kN (peso fora d' água).



Figura 18 - Instalação de estaca torpedo para ancoragem de *risers* (MEDEIROS, 2002)

É comum a utilização de um torpedo para a ancorar linhas com três risers de 0,305 m de diâmetro. Esta solução resultou numa redução considerável no comprimento das linhas de fundo necessárias para absorver os esforços provenientes das unidades flutuantes por interação solo-linha. Este tipo de torpedo apresenta a vantagem de poder ser recuperado após a instalação. Entretanto, para os outros dois tipos de torpedo, não se consegue com o meio naval força suficiente para desinstalar (MEDEIROS, 2007).

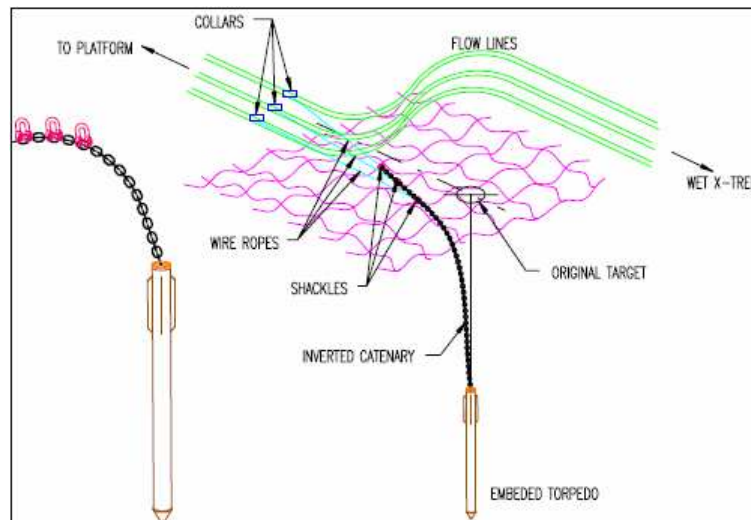


Figura 19 - Ancoragem de linhas flexíveis (Medeiros, 2002)

Semelhante ao Torpedo I, exceto pela presença de quatro aletas medindo 0.45 m por 9 m de comprimento, o Torpedo II é utilizado para ancoragem de MODUs.



Figura 20 - Estaca Torpedo para ancoragem de MODUs(Medeiros, 2002)

O Torpedo III possui diâmetro externo de 1,067 m, quinze metros de comprimento e 950 kN de peso(forá d`água). Apresenta ainda quatro aletas medindo 0.90 m de largura e 10 m de comprimento. Tem sido utilizado para ancoragem de sistemas flutuantes de produção FPS (Medeiros, 2007).

2.2 VELOCIDADE DE IMPACTO

A penetração da estaca torpedo no solo é função da energia cinética adquirida durante a queda. Por assim dizer, a velocidade de impacto torna-se um parâmetro importante na previsão da penetração dinâmica da estaca. Assim, é intuitivo pensar que quanto maior a altura de queda maior será a velocidade de impacto e, como consequência, a profundidade alcançada pela estaca no solo. Entretanto, durante a trajetória da estaca na água, esta fica sujeita a atuação da força de arrasto, que é a força que se opõe ao deslocamento da estaca na água. Sabe-se, da hidrodinâmica, que a atuação da força de arrasto num corpo submerso faz com que este tenha sua velocidade levada assintoticamente a um valor constante, caso não se choque com o solo antes de atingir tal velocidade, naturalmente. Esta velocidade é chamada de terminal. A essa velocidade o peso do corpo é totalmente equilibrado pela resistência do meio e, a partir daí, sua aceleração é zero (FOX *et al* ,2003).

A força de resistência normalmente é caracterizada pela massa e geometria do corpo. Assim, nota-se que a forma do corpo também influi na penetração.

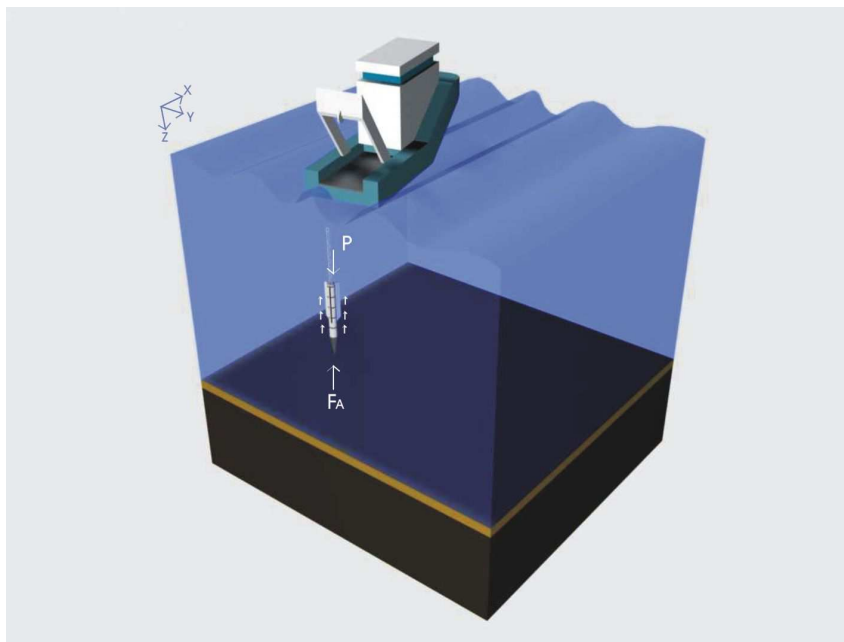


Figura 21 - Força de arrasto atuando na estaca

Admitindo-se a existência de tal condição, ou seja, que a estaca atinja a velocidade terminal, da teoria hidrodinâmica do arrasto tem-se a seguinte expressão para o cálculo desta velocidade (Randolph *et al*,2004):

$$v_i = \sqrt{\frac{2W_a}{C_d A_p \rho_a}} \quad (2.1)$$

Em que:

v_i – velocidade de impacto

W_a – peso submerso

C_d – coeficiente de arrasto

A_p – área de projeção da ponta

ρ_a – peso específico da água

Da equação (2.1), nota-se que o coeficiente de arrasto é dentre as variáveis envolvidas no cálculo da velocidade terminal, aquela que apresenta maior variabilidade. Freeman e Hollister (1988) estimaram o valor de C_d medindo a velocidade terminal de penetrômetros em queda livre. Esses autores propõem a seguinte expressão para o cálculo de C_d .

$$C_d = 0,039 + 0,0109 \frac{L}{d} \quad (2.2)$$

Em que:

L – comprimento da estaca

d – diâmetro da estaca

Do ponto de vista hidrodinâmico, a geometria mais eficiente para que a estaca ganhe mais velocidade durante a queda é o formato de “*lagrima*” (FOX, 2003).

2.3 O SOLO SOB CARREGAMENTO DINÂMICO

A determinação da resistência ao cisalhamento do solo pode ser obtida por ensaio de laboratório e de campo. Entretanto, nesses ensaios, a velocidade do carregamento se desenvolve num período de tempo relativamente grande. Assim, para esta condição, o carregamento a que o solo está submetido é dito estático ou quase estático.

A penetração da estaca torpedo no solo constitui-se essencialmente de um carregamento dinâmico face à elevada velocidade com que a estaca atinge o leito marinho. Dessa forma, a reação dinâmica do solo face à estática não pode ser desprezada.

Danziger (1991) comenta que, em geral, a resistência do solo aumenta com a velocidade do carregamento. Este autor menciona ainda que o acréscimo de resistência que o solo apresenta sob carregamento transiente se deve ao amortecimento.

Lambe e Whitman (1969) distinguem dois tipos de amortecimento em solo; o amortecimento material e o amortecimento geométrico(Danziger, 1991).

O amortecimento material representa a perda de energia na massa de solo devido aos efeitos viscosos e histeréticos. O amortecimento viscoso é a parcela do amortecimento material que é proporcional à velocidade. Já o amortecimento histerético representa a perda de energia durante um ciclo de carregamento e descarregamento e tem como origem o atrito entre as partículas do solo, Simons (1985).

Lysmer e Richart (1966), citado por Danziger (1991), comentam que o amortecimento geométrico representa a perda de energia pela propagação das ondas a partir das proximidades da fonte.

2.4 MODELOS DE SOLO PARA PREVISÃO DA PENETRAÇÃO DINÂMICA

A penetração dinâmica em solos é um problema complexo e tem sido estudada há várias décadas por muitos pesquisadores. Pode-se citar, dentre outros, os trabalhos de Allen *et al* (1957), Rachmatullin *et al* (1964), Thompson (1975), True (1976) e Sogomonyan (1974). Muitos modelos têm sido propostos para avaliação da penetração dinâmica no solo. Entretanto, neste trabalho, serão abordados o modelo de Smith (1960), True (1976) e Simons (1985), por serem estes bastante difundidos no meio técnico.

2.4.1 O modelo de Smith (1960)

Smith (1955) propôs um método numérico para solução de problemas de impacto fundamentado na teoria da equação da onda unidimensional. Posteriormente, em 1960, Smith aplica o método a análise de cravação de estacas.

Nesse modelo, a estaca é representada por um sistema de massas concentradas conectadas por molas, de peso desprezível, que representam a rigidez axial.

O solo por sua vez, é representado por um sistema mola - amortecedor. A mola representa a parcela estática da resistência enquanto o amortecedor representa o amortecimento viscoso, ou seja, proporcional a velocidade. Smith (1960) admite uma variação linear entre a resistência estática e dinâmica e a velocidade (DANZIGER,1991).

No modelo de Smith, adotam-se valores distintos de amortecimento para a ponta e para a superfície lateral. O amortecimento lateral é admitido como sendo um terço do amortecimento de ponta.

$$J_L = \frac{J_P}{3} \quad (2.3)$$

Em que:

J_L – amortecimento lateral;

J_P – amortecimento de ponta.

Smith (1960) sugere que os valores tomados para o amortecimento lateral e de ponta sejam, respectivamente 0,167 e 0,501 s/m.

A resistência lateral unitária é a soma da parcela estática com a dinâmica, sendo calculada da seguinte forma:

$$R = R_L(1 + J_L v) \quad (2.4)$$

Já a resistência unitária de ponta, de modo semelhante a resistência lateral, é calculada pela expressão abaixo:

$$R = R_P(1 + J_P v) \quad (2.5)$$

2.4.2 O modelo de True (1976)

True (1976) desenvolveu um método analítico que utiliza a segunda lei de Newton para avaliar a penetração dinâmica de âncoras de placa em solo coesivo.

True (1976), citado por Randolph (2004), comenta que uma aproximação mais racional para se prever a penetração dinâmica no solo deve levar em consideração a parcela de resistência do solo dependente da velocidade e a força de arrasto. Assim, equação do movimento pode ser escrita da seguinte forma:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = P_{submerso} + R_f (N_c S_u A_{ponta} + \alpha S_u A_{lateral}) + \frac{1}{2} C_d \rho_s A_{ponta} v^2 \quad (2.6)$$

Em que:

m – massa do projétil;

z – profundidade;

t – intervalo de tempo;

$P_{submerso}$ – peso submerso do projétil;

R_f – termo dependente da velocidade;

N_c – fator de capacidade de carga;

S_u – resistência não – drenada do solo amolgado;

A_{ponta} – área frontal do projétil

α – fator de adesão

$A_{lateral}$ – massa do projétil;

C_d – coeficiente de arrasto;

ρ_s – massa específica do solo;

v – velocidade do projétil;

A solução da equação (2.6) não é fechada. Dessa forma, necessita-se de um método numérico para resolvê-la. True (1976) utilizou o método das diferenças finitas, considerando que a âncora de placa é um objeto pontual no i -ésimo incremento de profundidade.

$$v_{i+1} = v_{i-1} + \frac{2\Delta z}{v_i(M + 2\rho_s V)} \left\{ [P_{submerso} - V\gamma_s] - \left[\frac{1}{2} C_d \rho_s A_s v_i^2 \right] \right. \\ \left. S_u \left[A_{ponta} N_c + \frac{A_{lateral} \alpha}{S_t} \right] \left[\frac{S_e^*}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_e v_i}{S_u t} + 0.06}}} \right] \right\} \quad (2.7)$$

termo_dependente_da_velocidade

Sendo:

C_e – coeficiente empírico da taxa de deformação;

t – espessura da âncora de placa;

S_e – sensibilidade;

S_e^* – fator empírico da máxima taxa de deformação do solo para altas velocidades¹.

True (1977) recomenda o valor de 0,7 para o coeficiente de arrasto C_d , 4 para valor de S_e^* e que C_e seja tomado como 20 Ns/m². Para o cálculo do fator de adesão pode-se utilizar a equação (2.8).

$$\alpha = 1 - \frac{1 + 3,5 \left[1 - e^{-\frac{1}{3,5} \left(\frac{L}{4t \tan \delta} - 1 \right)} \right]}{\frac{L}{4t \tan \delta}} \quad (2.8)$$

Os ciclos de iterações que se deve seguir até que a velocidade chegue a zero ou mude de sinal é o seguinte:

¹ Randolph(2004) comenta que o termo dependente da velocidade geralmente é formulado usando uma função logarítmica (Mitchell,1993), hiperbólica (Mitchell,1993) ou exponencial (Biscontin e Pestana, 2001). Sugere ainda, para a análise de penetração da DPA a expressão abaixo.

$$R_f = \left(1 + \lambda \log \frac{v}{v_s} \right)$$

Em que λ é uma constante e v_s é a velocidade de penetração de referência, representativa de condições estáticas (3mm/s em condições de centrífuga).

Tabela 1 – Método numérico de True (1976)

i. Início $i=1$
ii. $v_1=v_0$
iii. Calcula-se v_2 pela equação (2.7)
iv. Reavalia-se v_1 como: $v_1 = \frac{v_0 + v_2}{2}$
v. Resolve-se a equação (2.7) para $i=1$, com o novo valor de v_1 .
vi. Continua-se as iterações para $i=2,3,\dots,v_{i+1} \leq 0$
vii. Calcula-se a profundidade final $D_p=i(\Delta z)$.

2.4.3 O modelo de Simons (1985)

Utilizando a teoria da elastodinâmica, Simons (1985) apresenta um modelo para determinação do coeficiente de rigidez e amortecimento. O modelo utiliza mecanismo de ruptura consistente com os processos físicos envolvidos (DANZIGER, 1991).

Tal como no modelo descrito em 2.4.1, a resistência do solo pode ser modelada por uma serie de sistemas de mola e amortecedor. A resistência ao longo do fuste é dada por:

$$\tau = \frac{1}{2\pi r_0 l} \left[K_s u_s + C_s \frac{\partial u_p}{\partial t} \right] \quad (2.9)$$

Em que:

G - módulo cisalhante do solo

r_0 - raio da estaca;

u_s - deslocamento do solo;

K_s - coeficiente de rigidez solo;

C_s – coeficiente de amortecimento lateral;

$\frac{\partial u_p}{\partial t}$ - velocidade da estaca;

ρ – massa específica do solo.

Sendo K_s dado por:

$$K_s = \frac{2,9G}{2\pi r_0} \quad (2.10)$$

e o coeficiente de amortecimento por:

$$C_s = \sqrt{G\rho} \quad (2.11)$$

Já para a interação na ponta, a força mobilizada na base da estaca pode ser representada em termos do deslocamento e velocidade como:

$$P_p = K_p u + C_p \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.12)$$

Em que:

K_p – coeficiente de rigidez da ponta;

C_p – coeficiente de amortecimento da ponta;

ν – coeficiente de Poisson.

Sendo K_p calculado por

$$K_p = \frac{4Gr_0}{1-\nu} \quad (2.13)$$

e C_p avaliado por:

$$C_p = \frac{3,4r_0^2}{1-\nu} \sqrt{\rho G}$$

Danziger (1991) apresenta a sugestão de Randolph e Simons (1985 e 1986) para os parâmetros do solo aplicados a casos reais de análise de cravabilidade, utilizando o modelo unidimensional de Simons (1985).

Tabela 2 – Propriedades do solo para aplicação do modelo de Simons (1985)

Propriedades do solo	Areias	Argilas
Peso específico aparente natural (kN/m ³)	20	20
Atrito lateral	0,4s'v	0.6Su
Módulo Cisalhante	70s'v	150-300Su

CAPÍTULO 3 - MÉTODO ANÁLITICO PARA ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DA ESTACA TORPEDO

3.1 O MODELO DE SILVA APLICADA À ANÁLISE DA ESTACA TORPEDO

Os modelos normalmente utilizados para se avaliar a penetração dinâmica no solo utilizam a segunda lei de Newton. Pode-se citar, dentre outros, o modelo de True (1976) para solo coesivo e Boguslavskii *et all* (1995) para solo não coesivos.

A penetração dinâmica da estaca torpedo constitui, em virtude de suas características de cravação, essencialmente de um problema de impacto. Esta, ao ser lançada a partir de um barco de apoio, é acelerada pela gravidade e, no momento do choque com o leito marinho, é objeto de uma onda longitudinal de energia de impacto, agindo da ponta para topo da estaca. A resistência do solo produz uma perturbação que é transmitida ao longo de todo comprimento da estaca, fazendo alterar seu deslocamento, sua velocidade, sua aceleração, a força e as tensões (SILVA, 2005).

O método consiste em considerar a estaca torpedo, como elemento rígido², dotada de uma dada energia cinética no momento do choque com o leito marinho. Assim, à medida que a estaca penetra no solo, as forças de resistência do solo atuam fazendo com que a estaca perca energia cinética. A redução da energia provoca a diminuição da velocidade da estaca até que chegue a zero.

3.2 MODELO DE SOLO

O modelo de solo adotado é o mesmo utilizado por Smith (1960). Em razão disso, a resistência do solo é composta de uma parcela estática e outra dinâmica.

A parcela estática é calculada de acordo com parâmetros e cálculos da API RP2A 20th. Assim, para solos coesivos, a resistência lateral unitária é função da resistência não-drenada e do fator de adesão estaca-solo.

$$f = \alpha S_u \quad (3.1)$$

² Silva (2005) apresenta a formulação do problema considerando a estaca como elemento flexível.

Sendo:

α – fator de adesão estaca-solo;

S_u – perfil de resistência não drenada.

Em aplicações *offshore* é comum utilizar-se um perfil de resistência variando linearmente com a profundidade. Para as argilas normalmente adensadas da Bacia de Campos adota-se a expressão $S_{uz}=5+2z$, sendo S_{uz} dada em kPa e z em metros(Medeiros, 2007).

O fator de adesão estaca-solo função da razão entre S_u e a tensão efetiva vertical do solo na profundidade considerada, denominada de Ψ .

Sendo:

$$\alpha = 0,5\Psi^{-0,5} \text{ para } \Psi < 1; \quad (3.2)$$

ou

$$\alpha = 0,5\Psi^{-0,25} \text{ para } \Psi > 1. \quad (3.3)$$

API RP2A 20th recomenda ainda que não se deve tomar valor de α maior que a unidade.

Randolph (2004) sugere que o valor de α seja 0,4, no caso de se avaliar a penetração de estacas de gravidade tipo DPAs no solo. Este autor acrescenta ainda que este valor apresenta-se bem próximo da faixa 0,36-0,39 apresentados por Chen e Randolph (2004).

Para problemas de impacto envolvendo grandes deformações, a hipótese de se utilizar a resistência não-drenada amolgada parece razoável. Por esse motivo, o valor do perfil de resistência deve ser dividido pela sensibilidade do solo S_t .

Já a resistência unitária de ponta é função de um fator de capacidade de carga e da resistência não drenada.

$$q = N_c S_u \quad (3.4)$$

Em que,

N_c – fator de capacidade de carga;

S_u – resistência não drenada amolgada.

API RP2A sugere $N_c=9,0$. Arup (1982) citado por Randolph (2004) sugere a utilização de um fator de capacidade de carga dinâmico $N_c=18$.

Para solos não coesivos, o atrito lateral unitário é função do coeficiente de empuxo lateral, da tensão efetiva na profundidade considerada e do ângulo de adesão estaca solo (API RP2A, 1993).

$$f_a = K \sigma'_{vo} \tan \delta \quad (3.5)$$

Em que:

K – coeficiente de empuxo lateral;

σ'_{vo} – tensão vertical efetiva;

δ – ângulo de adesão solo-estaca.

Mello e Bogossian (1998) comentam que o valor de K pode ser tomado como 0,8 para estacas de ponta aberta em condição de não plugada. Entretanto, para estacas de ponta fechada ou ponta aberta na condição de plugada, K pode ser igual a um.

Para estacas cravadas de aço, normalmente adotam-se os seguintes valores para o ângulo de adesão solo estaca (MELLO e BOGOSIAN,1998).

$$\delta = \frac{3}{4} \phi \quad (3.6)$$

Sendo ϕ o ângulo de atrito da areia. Ou ainda, δ pode ser admitido como sendo o ângulo de atrito menos 5 graus.

A resistência unitária de ponta por sua vez é função da tensão efetiva na profundidade considerada e do fator de capacidade de carga.

Assim tem-se:

$$q_a = \sigma'_{vo} N_q \quad (3.7)$$

Onde:

σ'_{vo} – tensão vertical efetiva na profundidade considerada;

N_q – fator adimensional de capacidade de carga.

3.3 MODELO NUMÉRICO

Considere-se que no momento do choque com o leito marinho o torpedo com uma dada velocidade de impacto v_i . (o subscrito i indica o instante considerado). Assim, sua energia cinética inicial é dada por:

$$Ec_i = \frac{1}{2}mv_i^2$$

Num intervalo de tempo Δt , a estaca desloca a quantidade ΔD dada por:

$$\Delta D_i = v_i \Delta t$$

Nesse instante, a reação do solo começa a atuar e o trabalho resistente é então dado por:

$$\Delta U_i = R_i \Delta D_i$$

e a variação de energia é então :

$$Ec_i = Ec_{i-1} - \Delta U_i$$

A nova velocidade pode então ser dada por:

$$v_i = \sqrt{\frac{2Ec_i}{m}}$$

E o ciclo de iterações se repete até que a velocidade final chegue a zero. Assim, de forma simples, o método permite estimar a penetração dinâmica de estacas torpedo no solo.

CAPÍTULO 04 - APLICAÇÃO DO MÉTODO

4.1 PENETRAÇÃO SIMULADA EM SOLO ARGILOSO COM AMORTECIMENTO DE SMITH.

Busca-se avaliar neste capítulo a influência do amortecimento de Smith (1960) na penetração da estaca torpedo. Viu-se no item 2.4.1 que no modelo de Smith admite-se, independente do tipo de solo, valores distintos para o amortecimento de ponta e lateral. Os valores de amortecimento apresentados por Smith (1960) foram usados na análise de estacas cravadas a percussão. Neste capítulo, verifica-se se é adequado utilizar os valores de amortecimento propostos originalmente por Smith ao problema de penetração dinâmica de estacas torpedo.

Para tanto, realizam-se penetrações simuladas tomando-se por base os registros do CENPES/PETROBRAS com as características do torpedo e os parâmetros do solo fornecidos. Apresenta-se também a penetração da estaca sem a consideração do amortecimento e compara-se com a obtida com a consideração do amortecimento de Smith.

A penetração da estaca é analisada isoladamente. Dessa forma, não se considera o efeito da linha de ancoragem.

- PROPRIEDADES DA ESTACA

A estaca torpedo utilizada na penetração simulada apresenta as características descritas na tabela abaixo.

Tabela 3 - Propriedades da estaca torpedo (MEDEIROS, 2008)

PROPRIEDADES DO TORPEDO III - T98	
Comprimento do fuste (m)	15
Comprimento da ponteira (m)	2
Diâmetro do fuste(m)	1,067
Comprimento da aleta (m)	10
Largura da aleta(m)	0.90
Espessura da aleta (m)	0.05
massa (t)	10

- VELOCIDADE DE IMPACTO

A velocidade de impacto aferida para este torpedo foi de 27 m/s para uma altura de queda de 170 m. Assim, a penetração simulada apresentada neste item tem como referência esta velocidade.

- PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS

O solo onde fora cravado o torpedo apresenta 5kPa de resistência não-drenada de superfície e variação com a profundidade de 2kPa/m. Dessa forma, o perfil de resistência não drenada para o valor da sensibilidade da Bacia de Campos que é de 2,5 é:

$$S_u(z) = 2,0 + 0,8z \quad (4.1)$$

Sendo $S_u(z)$ dado em kPa.

O peso específico submerso adotado ($6,0\text{kN/m}^3$), corresponde ao valor tipicamente avaliado para as argilas do campo A, na Bacia de Campos, onde foi instalado o torpedo.

O fator de adesão solo-estaca α na análise da penetração dinâmica foi definido como sendo 0,025 para o valor de St adotado. O valor foi obtido após análise de penetrações para valores de α variando de 0 a 0,8 (figura 18).

Observa-se que para a afixa de valores compreendida entre 0,2 e 0,8 o valor da adesão solo-estaca admite uma penetração entre 20 e 15m, para o menor e maior valor, respectivamente. Observa-se, portanto, um aumento discreto no enterramento da estaca. Entretanto, para a faixa de valores entre 0 e 0, 2, nota-se um aumento considerável nas penetrações alcançadas. Tal comportamento sugere a utilização de valores compreendidos nesse intervalo.

Sugere-se no presente trabalho que o valor de α seja corrigido em função do perfil de resistência não drenada do solo adotada na análise. Assim, o autor do presente trabalho sugere que se utilize a seguinte expressão para o cálculo do fator de adesão solo-estaca:

$$\alpha = 0,0235 + 0,000198S_{u(1)} \quad (4.2)$$

Os valores calculados pela expressão 4.2 são válidos para $S_{u(1)}$ em kPa, variando entre 1,5 e 60.

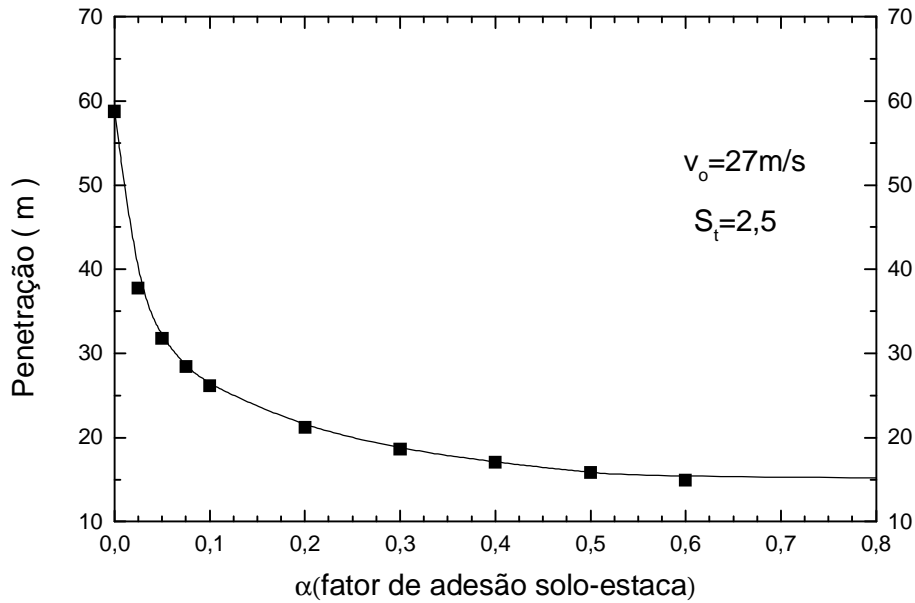


Figura 22 - Avaliação da profundidade em função do fator de adesão.

Na avaliação da resistência unitária de ponta emprega-se a expressão 3.4. O valor de N_c usado nesta expressão é 9.

Leva-se em consideração no cálculo da resistência de ponta o fator de forma da ponta, F_p . A forma da ponta da estaca tem forte influência na profundidade de enterramento da estaca (RANDOLPH et al, 2004).

O autor do presente trabalho, após analisar penetrações simuladas para fatores de forma da ponta variando entre 0 e 1, concluiu que o valor 0,15 fornece bons resultados de penetração.

4.1.1 Penetração simulada $V_0=27$ m/s

A penetração alcançada pelo torpedo no local da instalação foi de 35m (posição da ponta do fuste).

Para penetração simulada, com a consideração do amortecimento de Smith (1960), a profundidade alcançada pelo torpedo foi de aproximadamente 20m.

Na penetração simulada sem a consideração do amortecimento, a estaca atingiu 40m.

A figura 19 mostra a influência do amortecimento no enterramento do torpedo. Nota-se que com a consideração do amortecimento de Smith (1960), o torpedo penetra $\sim 1,18L$, sendo L o comprimento total da estaca, 17 m. Essa penetração é inferior a penetração real da estaca torpedo que, nesse caso, foi de $\sim 2,05L$.

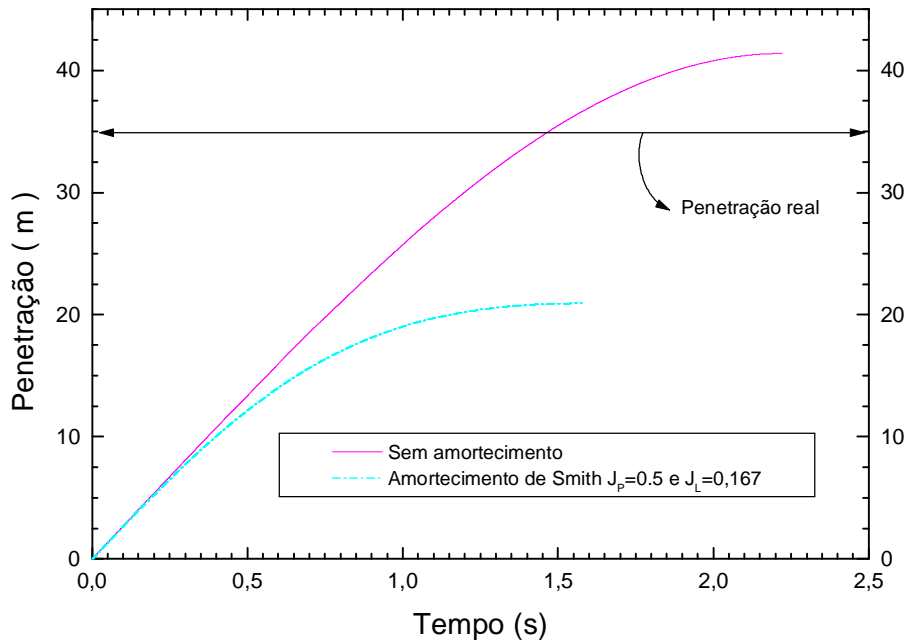


Figura 23 – Penetração simulada $v_0=27\text{m/s}$

Observa-se, na figura 20, o comportamento da resistência mobilizada para condição amortecida e não amortecida. A consideração do efeito viscoso produz aumento considerável da resistência. Por outro lado, a condição não amortecida apresenta um comportamento quase linear.

Pode-se observar também na figura 20, uma descontinuidade nas curvas de resistência que corresponde à influência da aleta na resistência.

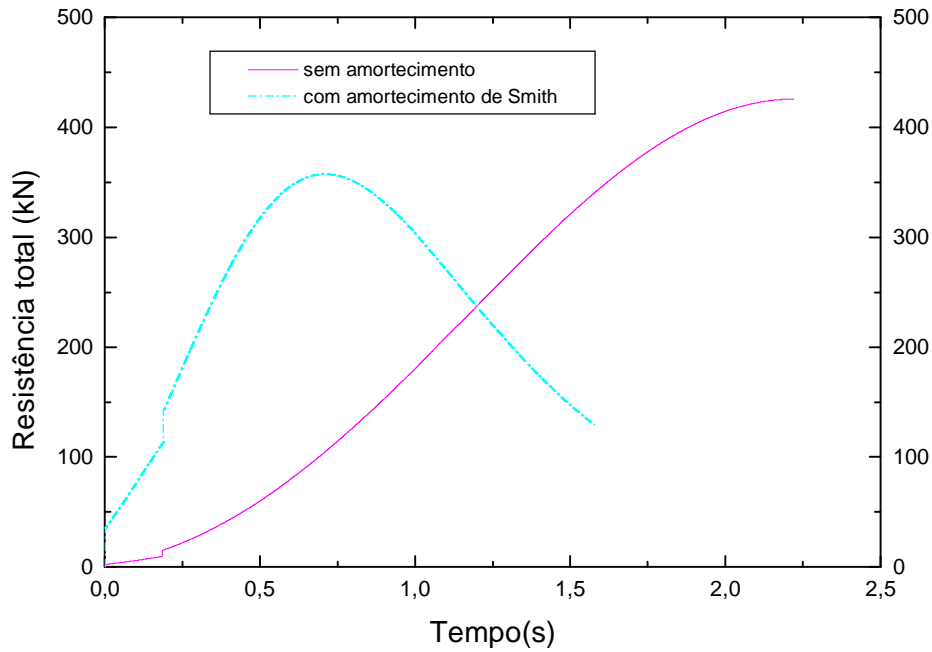


Figura 24 – Resistências mobilizadas durante a penetração.

4.2 PENETRAÇÃO SIMULADA EM SOLOS ARENOSOS

No presente item, avalia-se aplicação do método proposto a solos não coesivos.

Medeiros (2007) comenta que nos solos não coesivos da Bacia de Campos a estaca torpedo penetra normalmente seu comprimento.

A estaca torpedo discutida neste item foi instalada também na Bacia de Campos em área de água rasa cujo solo é constituído de areia calcárea não cimentada. A penetração alcançada pela ponta do fuste foi de 12m.

- PROPRIEDADES DA ESTACA

A estaca objeto desta análise tem as características que se apresentam na tabela 4. A estaca possuía ainda uma ponta cônica de 60° e não apresentava aletas no fuste.

Tabela 4 – Propriedades da estaca torpedo

PROPRIEDADES DO TORPEDO III – T62	
Comprimento do fuste (m)	12
Comprimento da ponteira (m)	2
Diâmetro do fuste(m)	1,067
Massa (t)	6,30

- VELOCIDADE DE IMPACTO

A velocidade medida no momento do impacto da estaca com o leito marinho foi de 15 m/s. Assim, na presente análise, avalia-se a penetração da estaca para esta velocidade.

- PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS

Para solos não coesivos, os principais parâmetros de resistência avaliados no modelo são: o ângulo de atrito, o peso específico submerso, coeficiente de empuxo e o ângulo de atrito solo-estaca.

O ângulo de atrito adotado na análise é de 25 graus e corresponde ao valor obtido através de ensaios de laboratório em amostras de solo.

O peso específico submerso para a areia do referido campo foi avaliado como sendo 7,5 kN/m³.

Segundo a API RP 2A 20th, o valor do coeficiente de empuxo pode variar entre 0,5 e 1. Adota-se o valor 0,5 na análise. O autor do presente trabalho, após realizar análises variando o valor de K, concluiu que o valor do coeficiente de empuxo não implica em grandes variações nas penetrações alcançadas para valores do ângulo de adesão solo-estaca menores que 2,5 graus.

O ângulo de atrito solo-estaca, por sua vez, apresenta forte influência no resultado das penetrações. Nota-se na figura 24, que para valores de δ compreendidos no intervalo de 7,5 a 30, a curva apresenta um comportamento quase linear. Dentro dessa faixa de valores e admitindo-se $K=0.5$, a estaca penetra entre 10,18 e 8,9 m para o menor e maior valor do ângulo de adesão, respectivamente. Entretanto, para valores de δ compreendidos entre 0 e 7,5, a curva apresenta comportamento fortemente não linear. A penetração obtida é de 13,27 e 10,18 m para o menor e maior valor de δ , respectivamente.

Tal fato sugere que para análise de penetração dinâmica o valor do ângulo de adesão solo-estaca assuma valores relativamente baixos.

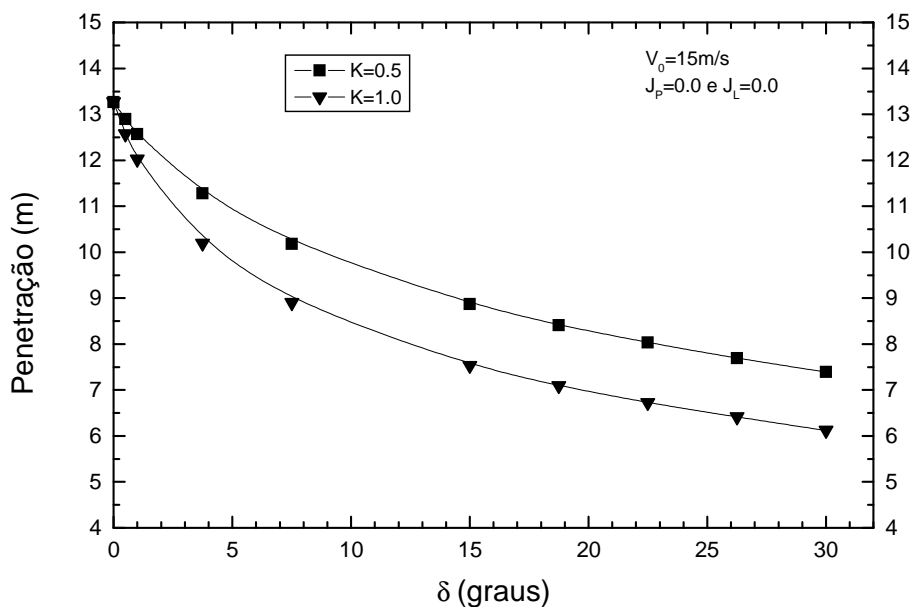


Figura 25 – Avaliação do ângulo de adesão solo-estaca

Assim, de modo simples, o valor de δ é calculado pela seguinte expressão:

$$\delta = \frac{\phi}{30} \quad (4.1)$$

4.2.1 Penetração simulada $V_0=15$ m/s

A penetração da estaca, nesse caso, também é analisada isoladamente. Assim, não se considera o efeito da linha de ancoragem.

Para penetração simulada, com a consideração do amortecimento de Smith (1960), a profundidade alcançada pelo torpedo foi de aproximadamente 6,0m (posição da ponta do fuste).

Na penetração simulada sem a consideração do amortecimento, a estaca atingiu aproximadamente 12,7m.

A figura 25 mostra a influência do amortecimento, no caso de solo não coesivo, no enterramento do torpedo. Nota-se que com a consideração do amortecimento de Smith (1960), o torpedo penetra $\sim 0,5L$, sendo L o comprimento total da estaca, 14 m. Essa penetração é inferior a penetração real da estaca torpedo que, nesse caso, foi de $\sim L$, ou seja, o topo da estaca ficou no nível do leito marinho.

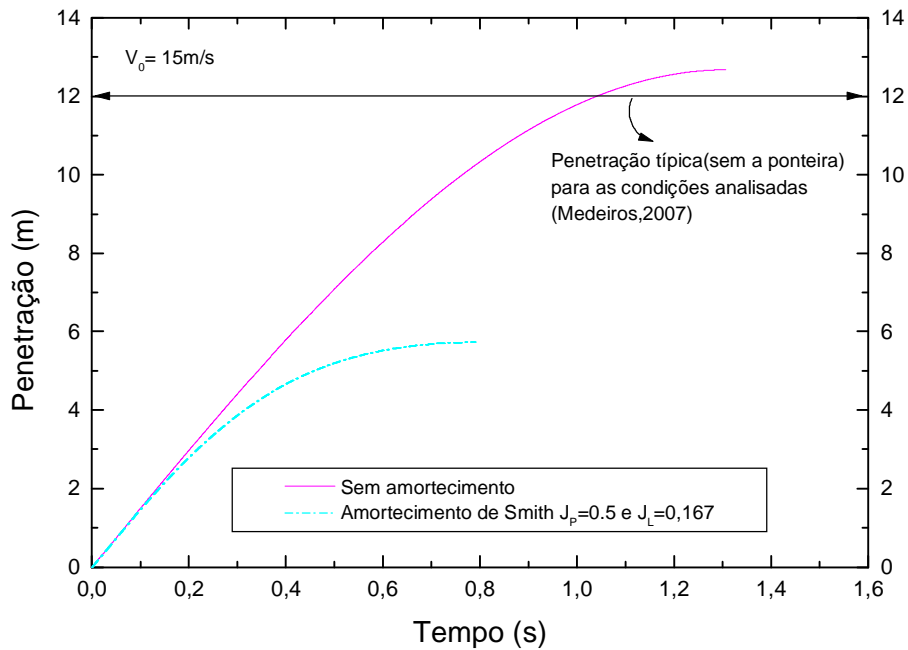


Figura 26 – Penetração simulada, $v_0=15\text{m/s}$.

Observa-se, na figura 26, o comportamento da resistência mobilizada para condição amortecida e não amortecida. A consideração do efeito viscoso no solo não coesivo também implica em aumento considerável da resistência. Por outro lado, a condição não amortecida apresenta um comportamento quase linear.

Pode-se observar também na figura 26, que não há descontinuidade nas curvas de resistência. Isso indica que o torpedo não possui aletas e toda resistência se dá na ponta e no fuste.

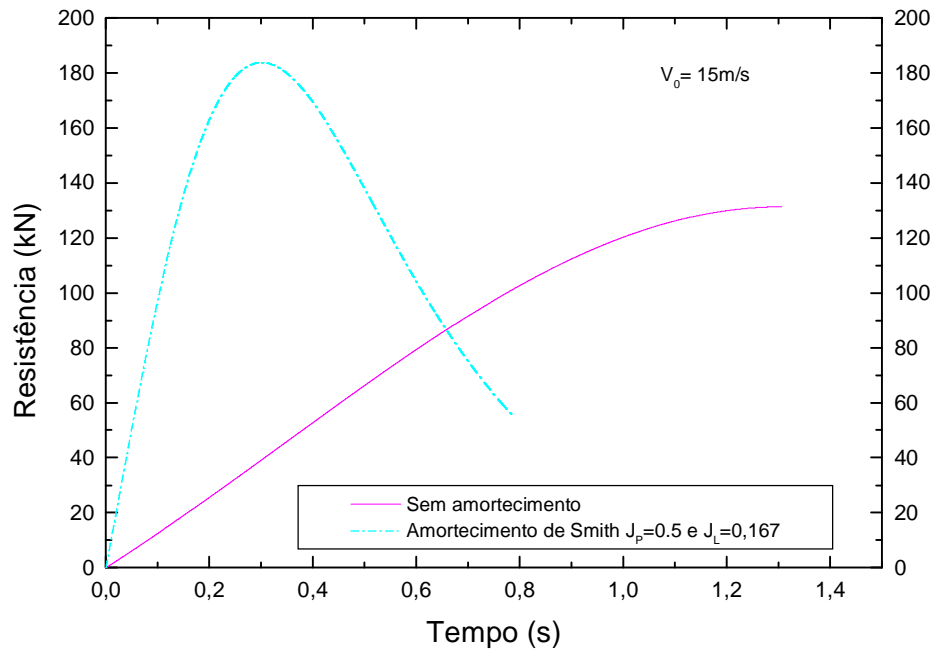


Figura 27 - Resistências mobilizadas durante a penetração.

CAPÍTULO 05 - APLICAÇÃO DO MÉTODO COM O AMORTECIMENTO PROPOSTO

5.1 AMORTECIMENTO PROPOSTO

Viu-se no capítulo 4, que os valores propostos por Smith para o amortecimento de ponta e lateral não conduzem a bons resultados na análise de penetração dinâmica. Tais valores implicam em penetrações inferiores as observadas nos testes de campo. Este fato sugere que os valores apresentados por Smith (1960) sejam mais adequados à análise de estacas cravadas a percussão. Diferentemente do que propõe Smith, no presente trabalho, sugerem-se valores distintos para o amortecimento lateral e de ponta em função do tipo de solo encontrado.

As análises realizadas utilizam o programa TORPDRIVEN para se estimar a penetração dinâmica do torpedo. O programa calcula, a cada intervalo de tempo, a posição do torpedo no solo. Permite ainda avaliar as parcelas de resistência estática e dinâmica do solo.

5.2 AMORTECIMENTO PROPOSTO PARA SOLOS ARGILOSOS

No caso de solos coesivos, o valor do amortecimento lateral mostra ter mais influência na profundidade de enterramento do que o amortecimento de ponta.

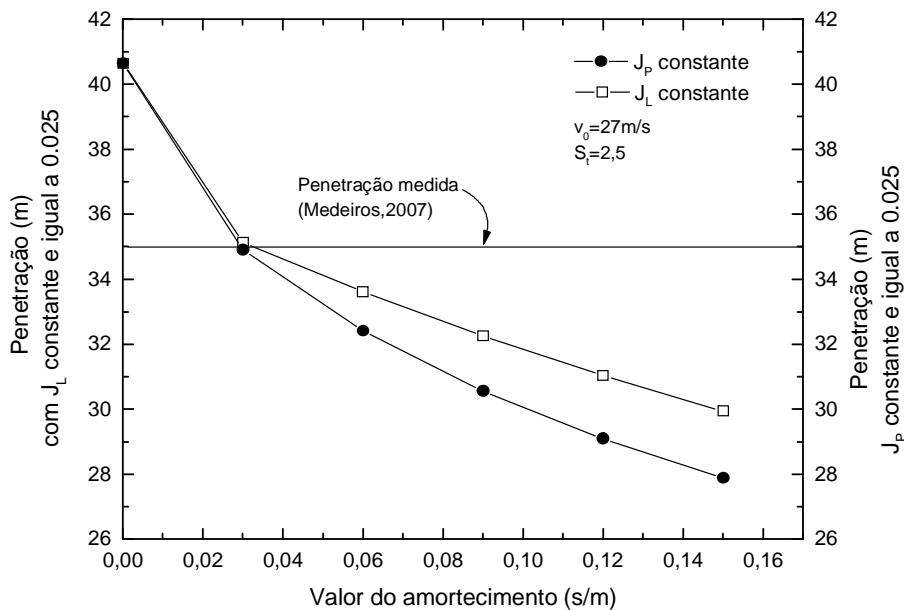


Figura 28 – Influência do amortecimento de ponta e lateral

A resistência do solo também influi no valor do amortecimento. Assim, no caso de solo argiloso, os valores do amortecimento de ponta e lateral sofrem sensíveis variações. Dessa forma, o amortecimento viscoso de uma argila muito mole é bem superior ao de uma argila rija. No presente trabalho sugere-se que o valor do amortecimento lateral seja avaliado pelo gráfico da figura 5.1. Assim, o parâmetro de entrada é a resistência não drenada a um metro de profundidade. O amortecimento de ponta por sua vez, pode ser avaliado como sendo $J_L = 0,005$.

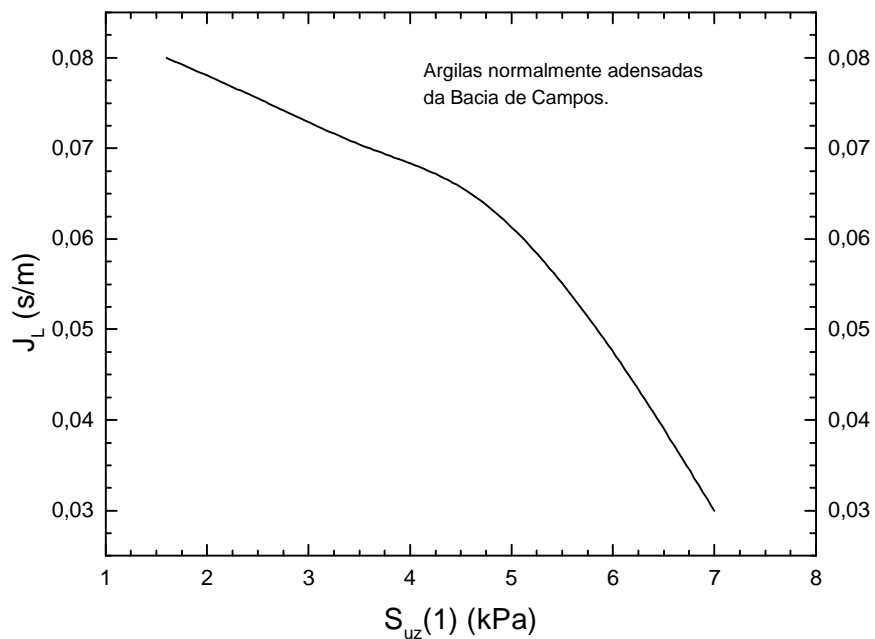


Figura 29 – Amortecimento para solo coesivo

5.3 AMORTECIMENTO PROPOSTO PARA SOLO ARENOSO

No caso de solo arenoso, o amortecimento de ponta mostrou-se mais influente no resultado da penetração. Entretanto, os valores para o amortecimento de ponta e lateral são inferiores aos dos solos coesivos.

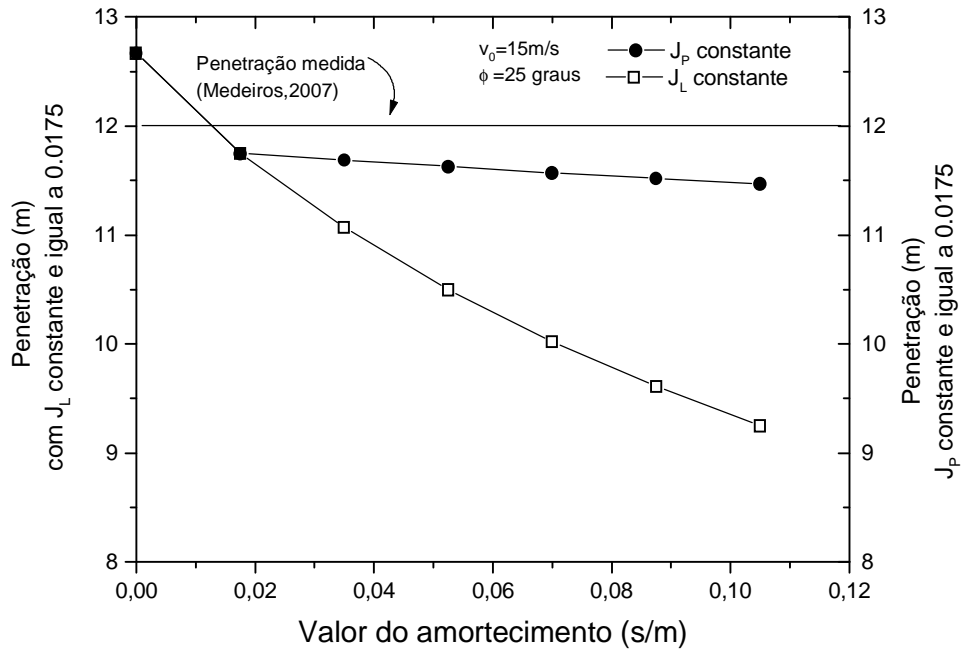


Figura 30 - Amortecimento para solo não coesivo

5.4 PENETRAÇÃO SIMULADA EM SOLOS ARGILOSOS

As simulações realizadas em solos coesivos tiveram como referência os perfis de resistência não drenada da Bacia de Campos e da Bacia do Espírito Santo. Nesses dois campos foram instalados três diferentes tipos de torpedo. Na Bacia de Campos, cujo perfil de resistência não drenada é o que se apresenta na figura 31, foi instalado o torpedo T-98 para ancoragem da P-50. Na Bacia do Espírito Santo, foram instalados dois tipos de torpedo, o T-66 e o T-Teste. Este último, como o próprio nome sugere, destinava-se apenas a testes de penetração. O perfil de resistência não drenada da Bacia do Espírito Santo, assim como, as velocidades de impacto avaliadas estão apresentadas na figura 31.

As características dos torpedos instalados nesses campos apresentam-se na tabela 5. Como se pode notar, os torpedos apresentam diferentes características de geometria e massa.

Tabela 5 - Torpedos Analisados

PROPRIEDADES DO TORPEDO	T98	T66	TESTE
Comprimento do Fuste(m)	15	12	10
Comprimento da Ponteira(m)	2	2	2
Diâmetro (m)	1,067	1,067	0,762
Comprimento da Aleta (m)	10	8	-----
Largura da Aleta (m)	0,9	0,9	-----
Espessura da Aleta (m)	0,05	0,05	-----
Massa (t)	10	6,7	1,84

Na Bacia de Campos, a penetração simulada forneceu como resultado o valor de 36,90 m (posição da ponteira do torpedo), bem próximo do valor medido 37 m.

Para a Bacia do Espírito Santo, os resultados obtidos na simulação de penetração do torpedo T-66 foram bem próximos da penetração medida. A velocidade média do torpedo T-66 foi de 23,35 m. A penetração para faixa de velocidade obtida para este campo produz um aumento linear na penetração medida e, como consequência, na simulada. Este comportamento também foi observado na Bacia de Campos. Nesse último caso, o resultado apresentado no presente trabalho refere-se a um torpedo instalado próximo a um furo de investigação geotécnica.

Entretanto, no caso do T-Teste, a diferença entre a penetração simulada e a medida foi de aproximadamente 1 metro. Este torpedo também fora instalado junto a um furo de investigação geotécnica.

Tal fato mostra a influência da ausência das aletas na penetração. Os resultados podem ser melhor ajustados adotando-se, no caso da estaca não possuir aletas, um acréscimo discreto no fator de adesão solo-estaca de aproximadamente 0,01. Assim, melhor resultado pode ser obtido com $\alpha=0,035$.

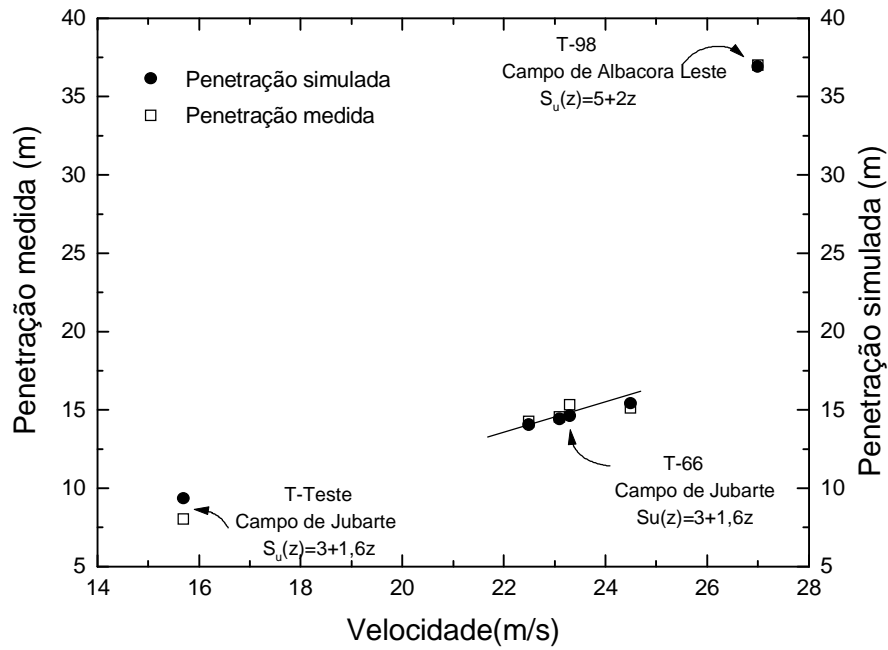


Figura 31 - Perfis de resistência e penetrações medidas e calculadas

Nota-se, na figura 32, que os valores obtidos na penetração simulada apresentam boa concordância com os valores medidos para diferentes faixas de velocidade de impacto, geometria e massa do torpedo.

Também foram avaliados diferentes perfis de resistência encontrados nas Bacias em estudo.

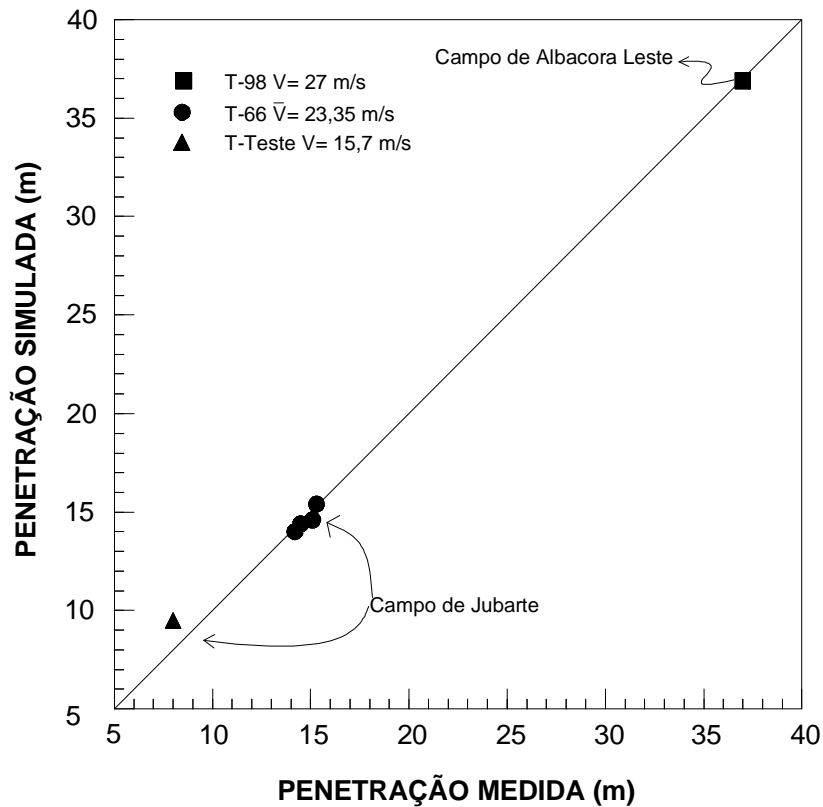


Figura 32 - Valores da penetração

5.5 PENETRAÇÃO SIMULADA EM SOLOS ARENOSOS

A análise do torpedo cravado em solo arenoso da Bacia de Campos tem por objetivo mostrar a aplicação do método a solos não coesivos. Pode-se dizer que é raro a instalação de torpedos em tais tipos de solos. Isso porque, em águas profundas e ultra-profundas da Bacia de Campos, não há predominância desse tipo de solo.

A penetração alcançada pela estaca nas simulações foi de aproximadamente 13,5 m (posição da ponteira). O resultado obtido mostrou boa concordância com o valor medido nos testes de campo, 14 m.

CAPÍTULO 06 – CONCLUSÃO

O modelo de solo proposto por Smith (1960) e adotado no presente trabalho mostrou-se adequado as análises feitas. Entretanto, os valores de amortecimento lateral e de ponta propostos por Smith não se mostraram adequados. As penetrações obtidas com estes valores são bastante inferiores às penetrações medidas. Tal fato sugere que os valores propostos por Smith sejam adequados à análise de estacas cravadas a percussão.

O valor do amortecimento lateral nos solos coesivos estudados mostrou-se mais influente no resultado das penetrações do que o amortecimento de ponta. Tal fato mostra que a hipótese de se adotar o amortecimento de ponta como sendo três vezes superior ao lateral, conforme propôs Smith, também não se mostrou adequada. O mesmo ocorre no caso de solo não coesivo.

Por outro lado, os valores de amortecimento de ponta e lateral propostos apresentaram bons resultados. Viu-se que a adoção de valores distintos para o amortecimento lateral e de ponta em função do tipo de solo mostrou-se adequada. Tal consideração difere da proposta feita por Smith de se adotar valores de amortecimento independente do tipo de solo.

No caso particular de solos coesivos, a consideração do aumento do amortecimento com a diminuição do perfil de resistência adotado, mostrou-se adequada.

A penetração simulada para o perfil de resistência do solo coesivo da Bacia de Campos, onde se utilizou o torpedo T-98 apresentou diferença de menos de um metro. O mesmo ocorreu para o torpedo T-66 instalado na Bacia do Espírito Santo. Entretanto, no caso do torpedo T-Teste, também instalado na Bacia do Espírito Santo, a diferença encontrada entre a penetração medida e simulada foi superior a um metro. Tal fato se deve possivelmente à ausência de aletas no torpedo.

Para o solo arenoso da Bacia de Campos, a diferença encontrada entre a penetração medida e a simulada também foi inferior a um metro. Isso indica que o modelo pode ser usado também no caso de solo não coesivo. Entretanto, é necessário um número maior de registros de torpedos cravados nos solos arenosos da Bacia de Campos, para se calibrar o modelo. Vale observar que é rara a ocorrência desse tipo de solo em águas profundas e ultra-profundas.

As penetrações simuladas realizadas em diferentes tipos de solos, com diferentes velocidades de impacto e com diferentes tipos de torpedos mostrou que o modelo, embora simples, fornece resultados bem próximos da realidade.

As análises apresentadas no presente trabalho mostraram que o método dinâmico proposto por Silva(2005) pode ser usado na análise de cravabilidade de estacas cravadas por gravidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, W. A et al, 1957. *Dynamics of a projectile penetrating sand* J. Appl. Phys. 28
- BOSSARD, A. and CORTE, J.F., 1984. *Analysis of pile response to impact loading and Use of static soil-pile interaction laws*. Proceedings of the Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory on Piles. A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 178-185.
- CHAPRA, S. C., and CANALE, R. P., 1985. *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY. Chapter 16. CORTE, J.-F., and LEPERT, R., 1986. Lateral Resistance During Driving and Dynamic
- DANZIGER, B. R., *Análise Dinâmica da Cravação de Estacas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, 1991.
- DRABKIN, S 1995. *Low level vibration induced settlement of granular soils* PhD Dissertation Polytechnic University, Brooklyn, New York
- EULER, L., 1745. *Neue Grundsätze der Artillerie Berlin* (Reprinted Euler's Opera Omnia vol 14, series II (Teubner))
- FORRESTAL, M. J, Brar, N. S and Luk, V. K 1991. *Penetration of strain-hardening targets with rigid spherical-nose rods* ASME J. Appl. Mech. 58 7-10
- FORRESTAL, M. J, Lee ,L. M and Jenrette, L. M 1986. *Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s* ASME J. Appl.Mech. 53 317-20
- HEARST, J. R and Lynch, C. S 1994. *Measurement of in situ strength using projectile penetration* Int. J. Rock Mech., Mining Sci. Geomech. Abstracts 31 243-51Mechanics (New York: Academic)
- LOWERY, L.L.JR. HIRSCH, T.J., EDWARDS, T.C., COYLE, H.M.,AND SAMSON, C.H.JR. *Pile Driving Analysis - State of Art*,Research Report #33-13, Texas A&M University,College Station, 1969.
- MEDEIROS, C. J. JR. (2002), *"Torpedo Anchor for Deep Water"*, DOT Conference, Rio de Janeiro,Oct. 2002.
- MELLO, J. R., BOGOSSIAN, F., *"Fundações de Estruturas Offshore"*. In: Hachich, W., Falconi, F. F., Saes, J. L., et al. (eds), *Fundações: Teoria e Prática*, 2 ed., cap. 11, São Paulo, SP, Editora Pini, 1998.
- NJ.GOBLE, G. G., and RAUSCHE, F., 1976. *Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP Program*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC. Report FWHA-IP-76-13 (4 Vols.).

O'LOUGHLIN,C.D, RANDOLPH, M.F.,RICHARDSON,M., “ *Experimental and Theoretical Studies of Deep Penetrating Anchors*”, Offshore Technology Conference, Houston,Texas,May 2004.

SILVA, U.A., *Análise Dinâmica de Estacas Torpedo*. Dissertação de M.Sc.,Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, 2005.

SMITH, E.A.L. *Pile-Driving Analysis by the Wave Equation*. *Trans. of ASCE* Vol.27 (1962), 1145-1193.

SOGOMONYAN, A. Ya 1974, *The Theory of Penetration Phenomena*J. *Mech.Solids*.

TATSUOKA, F. *et al* 1994 *Measurements of elastic properties of geomaterials in laboratory compression tests* *Geotech.Testing J.* **17** 80–94

TAYLOR, T. Fragaszy R J and Ho C L 1991 *Projectile penetration in granular soils* *ASCE J. Geotech. Eng.* **117** 658–72

THOMPSON, J.B III 1975 *Low-velocity impact penetration of low-cohesion soil deposits* Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering University of California, Berkeley

TRUE, D .G., 1976 *Undrained vertical penetration into ocean bottom soils* Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering University of California, Berkeley

ZUKAS, J. A, Nicholas T, Swift H F, Greszczuk L and Curra D R1982 *Impact Dynamics* (New York: Wiley)

APÊNDICE I

Cálculo da Penetração e Resistência ao Arrancamento de uma Estaca Torpedo Instalada no Campo de Albacora Leste para Ancoragem da P-50

O torpedo T-98 apresentado na figura abaixo deverá ser instalado no campo de Albacora Leste para a ancoragem da plataforma P-50. Deseja-se estimar:

- i. A penetração da estaca
- ii. A resistência ao arrancamento pós instalação utilizando a metodologia proposta pela API RP2A (1993).

Os dados com as características do torpedo apresentam-se na tabela 6. Os parâmetros do solo encontram-se na tabela 7.

Utilizar o programa TORPDRIVEN (Silva, 2005)

PROPRIEDADES DA ESTACA TORPEDO T-98	
Comprimento do fuste (m)	15
Comprimento da ponteira (m)	2
Diâmetro do fuste (m)	1,067
Comprimento da aleta (m)	10
Largura da aleta (m)	0.90
Espessura da aleta (m)	0.05
massa (t)	10

Tabela 6. Propriedades da estaca torpedo T-98 (Medeiros, 2007).

Argila - Campo de Albacora Leste				
γ'	$Su_{superfície}$	$Su_{profundidade}$	S_t	N_c
(kN/m ³)	(kPa)	(kPa/m)		
6	5	2	2,5	9

Tabela 7. Parâmetros do solo para campo de Albacora Leste.

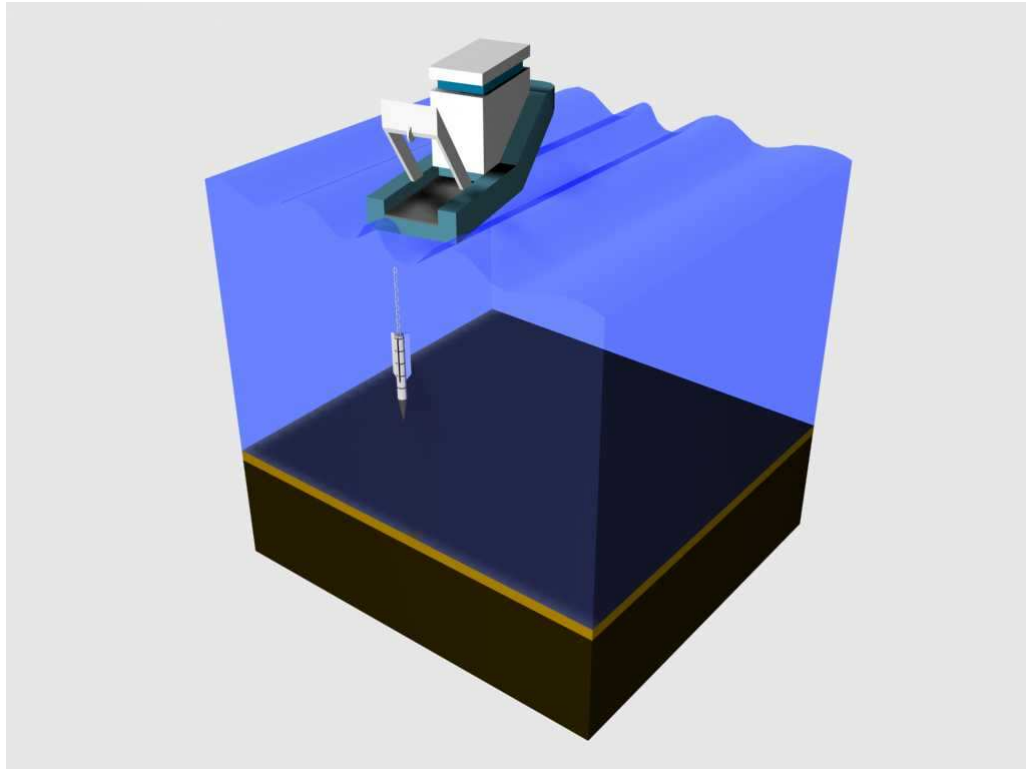


Figura 33 - Instalação do Torpedo T-98

A penetração da estaca e a resistência estática lateral e de ponta na profundidade de enterramento da estaca podem ser obtidas diretamente da saída do programa.

i) Nota-se na segunda coluna da tab.8 que a profundidade de enterramento do fuste é de aproximadamente 35 m. Somando-se mais dois metros da ponteira chega-se a profundidade total atingida pela estaca, 37m.

ii) Segundo a API, a capacidade axial de uma estaca pode ser determinada pela soma de três parcelas: a resistência lateral, a resistência de ponta e o peso próprio do elemento estrutural. Assim, a resistência ao arrancamento da estaca torpedo pode ser avaliada pela seguinte expressão:

$$Q_{ULT} = Q_L + Q_P + W_S$$

Onde:

Q_L – Resistência Lateral

Q_P – Resistência de Ponta

W_S – Peso submerso

O cálculo das resistências lateral e de ponta pode ser feito de acordo com o apresentado no capítulo 3. Entretanto, no cálculo da resistência lateral, admitiu-se $\alpha=0,8$.

TEMPO	DESL.	GAMA	SIGMALV	Su	PSI	ALFAD	VELOC.	R.PONTA	R.LATERAL	R.TOTAL
SEG	M	kN/M**3	kPa	kPa			M/S	KN	KN	KN
0,0003	0,0068	6	0,0405	2,0054	49,52	0,025	26,9999	16,1385	0,0363	16,1748
0,0005	0,0135	6	0,081	2,0108	24,82	0,025	26,9998	16,1819	0,0728	16,2547
0,0008	0,0202	6	0,1215	2,0162	16,59	0,025	26,9997	16,2254	0,1095	16,3349
.
.
.
0,7775	19,994	6	119,9655	17,995	0,15	0,025	22,8358	173,9707	3037,3499	3211,321
0,7777	20	6	119,9998	18	0,15	0,025	22,8328	174,0148	3038,9878	3213,003
.
.
.
2,0097	34,901	6	209,4028	29,92	0,143	0,025	0,0996	289,2554	8815,082	9104,338

Q _L (kN)	5776,1	J8097-J3164
Q _P (kN)	174,01	J3164
W _S (kN)	815	
Q _{ULT} (kN)	6765,1	Q _L +Q _P +W _S

Tabela 8 - Saída do programa TORPDRIVEN