

**Gustavo Ribeiro Testa**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICO-COMPUTACIONAL  
DA CRAVAÇÃO DE ÂNCORAS EM SOLOS ARGILOSOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2001

**Gustavo Ribeiro Testa**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICO-COMPUTACIONAL  
DA CRAVAÇÃO DE ÂNCORAS EM SOLOS ARGILOSOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.

*Área de Concentração:*  
Engenharia Mecânica

*Orientador:*  
Edison Gonçalves

São Paulo

2001

“Em toda ciência o difícil é o começo.”

KARL MARX

## RESUMO

A pesquisa desenvolvida neste trabalho vem a contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno de cravação das âncoras de carregamento vertical em solos argilosos, através da realização de simulações numérico-computacionais com âncoras em escala real, e experimentos em tanque de prova com modelos em escala 1:20. O objetivo deste trabalho é o de investigar e compreender o fenômeno, revelando a influência dos parâmetros estudados na cravação destes corpos.

Para as simulações numérico-computacionais desenvolvidas, são apresentados o arrasto e a profundidade da âncora, a inclinação de sua pata, a magnitude e a direção da força na linha de cravação, o comprimento de cabo da linha de cravação dentro do solo e a configuração geométrica em catenária de toda a linha de cravação.

Para os experimentos realizados no tanque de prova com modelos de âncoras em escala 1:20, são revelados: a profundidade, o arrasto e a inclinação da pata da âncora; o esforço e a inclinação da linha de cravação no ponto de tracionamento e a velocidade de deslocamento da âncora.

Através da apresentação gráfica destes resultados é possível visualizar e compreender o que de fato acontece dentro do solo ao longo do processo de cravação. Além disto, de modo a se estabelecer um vínculo e dar maior credibilidade às conclusões inferidas neste trabalho, algumas das simulações e experimentos desenvolvidos são confrontados com testes realizados em mar pela PETROBRAS, com âncoras em escala real. <sup>[1]</sup>

## ABSTRACT

The research developed in this work contributes for a better understanding of the embedment phenomena, in clay soils, of the vertical loaded anchors. To achieve this, numerical simulations with anchors in real scale and experiments with 1:20 scale models were developed and here presented. Therefore, the objective of this work is to investigate and understand the phenomena, revealing the influence of the studied parameters in the embedment of these anchors.

For the numerical simulations developed, it is presented the drag of the anchor, the inclination of the fluke, the magnitude and the direction of the force in the fore-runner, the length of fore-runner into the soil and the full geometric configuration of the whole installation line.

For the experiments developed in the proof tank the following parameters are revealed: the drag and the depth of the anchor, the inclination of the fluke; the magnitude and the direction of the force in the fore-runner; the speed of the anchor.

Through the graphic presentation of these results it is possible to understand what really happens into the soil along the embedment process of these anchors. Besides that, through comparisons with field results, developed by PETROBRAS with full-scale models of the studied anchors, will be established a link between the numerical and experimental results reached in this work with the reality observed in the field. Therefore, this gives larger credibility to the conclusions to be here presented.<sup>[1]</sup>

## **AGRADECIMENTOS**

À CAPES;

Ao CENO-USP;

À PETROBRAS.

## ERRATA

| <i>Página</i> | <i>Correção</i>   |
|---------------|---|
| 11            | Onde se lê “‘taut-leg’ <sup>[7]</sup> (ou sistema de ‘pernas curtas’)”, leia-se “‘taut-leg’ <sup>[7]</sup> (ou sistema de ‘pernas esticadas’)”.   |
| 13            | Onde se lê “aviltados”, leia-se “elevados”.   |
| 17            | Onde se lê “Silte média”, leia-se “Silte médio”.  |
| 17            | Onde se lê “Silte grossa”, leia-se “Silte grosso”.  |
| 17            | Onde se lê “ser expressa em função de sua resistência ao cisalhamento”, leia-se “ser expressa pela sua resistência ao cisalhamento”.  |
| 18            | Onde se lê “Uma de suas propriedades que pode expressar numericamente esta resistência é a tensão de cisalhamento”, leia-se “Uma de suas propriedades que pode expressar numericamente esta resistência é a máxima tensão de cisalhamento”. |
| 19            | Onde se lê “Após o colapso”, leia-se “Após a ruptura”.  |
| 19            | Onde se lê “cai para valores de 90 a 30% da tensão não drenada”, leia-se “pode cair a valores muito baixos, podendo chegar a 5% da tensão não drenada”.   |
| 21            | Onde se lê “O Olhal de vante - representado em verde na FIGURA 1.11 - está localizado na região posterior da pata”, leia-se “O Olhal de vante - representado em verde na FIGURA 1.11 - está localizado na região anterior da pata”.         |
| 21            | Onde se lê “Olhal de Ré - representado em vermelho na FIGURA 1.11 - está localizado na região anterior da pata”, leia-se “Olhal de Ré - representado em vermelho na FIGURA 1.11 - está localizado na região posterior da pata”.             |
| 38            | Onde se lê “Nc: fator de capacidade de contato”, leia-se “fator de capacidade de carga”.  |
| 71 e 73       | Na tabela 2.3 e tabela 2.7 aplicada a série S3.1 de simulações, onde lê-se “ $S_r(z)=0.8S_u(z)$ ”, leia-se “ $S_r(z)=S_u(z)$ ”.   |
| 72 e 73       | Na tabela 2.5 e tabela 2.7 aplicada a série S3.2 de simulações, os valores de $S_r(z)$ devem ser recalculados, de modo que valha a seguinte relação: “ $S_r(z)=0.8S_u(z)$ ”.  |
| 38, 48 e 65   | Onde se lê “não drenada”, leia-se “intacta”.  |
| 66 e 124      | Onde se lê “não drenada”, leia-se “intacta”.  |

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| RESUMO  | II        |
| ABSTRACT  | III       |
| AGRADECIMENTOS  | IV        |
| ÍNDICE  | V         |
| LISTA DE TABELAS  | VIII      |
| LISTA DE SÍMBOLOS   | IX        |
| LISTA DE FIGURAS  | XI        |
| <br>  |           |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Objetivos   | 2         |
| 1.2 Classificação das Âncoras                               | 4         |
| 1.2.1 Âncoras de Sucção                                     | 4         |
| 1.2.2 Âncoras de Arrasto                                    | 6         |
| 1.2.2.1 Âncoras de Carregamento Horizontal                  | 6         |
| 1.2.2.2 Âncoras de Carregamento Vertical ou VLAs            | 11        |
| 1.3 Considerações sobre o solo Marinho                      | 15        |
| 1.3.1 Sistema Particulado do Solo                           | 16        |
| 1.3.2 Propriedades Mecânicas dos Solos Argilosos            | 17        |
| 1.4 Termos e Definições                                     | 20        |
| 1.4.1 VLAs  | 20        |
| 1.4.2 Linha de Cravação                                     | 24        |
| 1.5 Procedimentos de Instalação de uma VLA                  | 26        |
| 1.6 Escopo  | 32        |
| <br>  |           |
| <b>2 ANÁLISE NUMÉRICO-COMPUTACIONAL</b>                     | <b>34</b> |
| 2.1 Formulação do Modelo Numérico-Computacional             | 34        |
| 2.1.1 Formulação Matemática do Programa                     | 34        |
| 2.1.1.1 Trecho da Linha de Cravação em Contato com a Água   | 34        |
| 2.1.1.2 Trecho da Linha de Cravação em Contato com o Solo   | 36        |
| 2.1.1.3 Âncora  | 41        |
| 2.1.2 Metodologia de Cálculo do Programa                    | 44        |
| 2.1.2.1 Método de Penetração da Pata no Modo com Falha      | 46        |
| 2.1.2.2 Método de Penetração da Pata no Modo com Restrições | 48        |



|  |            |
|--|------------|
| <b>2.2 Definição dos Modelos Computacionais Estudados</b>                                | <b>49</b>  |
| 2.2.1 Âncoras  | 49         |
| 2.2.2 Solo   | 65         |
| 2.2.3 Linha de Cravação  | 66         |
| <b>2.3 Especificações das Simulações</b>   | <b>68</b>  |
| 2.3.1 S1: Influência do Ângulo de Ataque   | 70         |
| 2.3.2 S2: Influência do Apêndice de Ré   | 71         |
| 2.3.3 S3: Influência da Linha de Cravação  | 73         |
| 2.3.3.1 S3.1: <i>Influência do Fore-Runner</i>   | 73         |
| 2.3.3.2 S3.2: <i>Influência da Inclinação da Linha de Cravação Sobre o Leito Marinho</i> | 74         |
| 2.3.4 S4: Influência do Solo   | 75         |
| 2.3.5 S5: Simulações com Âncoras Comerciais  | 79         |
| <b>2.4 Resultados das Simulações</b>   | <b>81</b>  |
| 2.4.1 S1: Influência do Ângulo de Ataque   | 81         |
| 2.4.2 S2: Influência do Apêndice de Ré   | 97         |
| 2.4.3 S3: Influência da Linha de Cravação  | 106        |
| 2.4.3.1 S3.1: <i>Influência do Fore-Runner</i>   | 106        |
| 2.4.3.2 S3.2: <i>Influência da Inclinação da Linha de Cravação Sobre o Leito Marinho</i> | 114        |
| 2.4.4 S4: Influência do Solo   | 122        |
| 2.4.5 S5: Simulações com Âncoras Comerciais  | 139        |
| <br>   |            |
| <b>3 ANÁLISE EXPERIMENTAL</b>  | <b>142</b> |
| <b>3.1 Modelos de Âncora</b>   | <b>143</b> |
| <b>3.2 Linha de Cravação</b>   | <b>148</b> |
| <b>3.3 Solo</b>  | <b>149</b> |
| <b>3.4 Infra-Estrutura Laboratorial</b>  | <b>150</b> |
| 3.4.1 Tanque de Prova  | 150        |
| 3.4.2 Sistema de Controle e Monitoramento  | 153        |
| <b>3.5 Procedimentos</b>   | <b>158</b> |
| 3.5.1 Procedimentos de Ensaio  | 158        |
| 3.5.2 Procedimentos de Homogeneização do Solo  | 160        |
| <b>3.6 Especificações dos Ensaios</b>  | <b>161</b> |
| 3.6.1 Série E1: Influência do Ângulo de ataque   | 162        |
| 3.6.2 Série E2: Influência do Apêndice de Ré   | 163        |
| 3.6.3 Série E3: Ensaios com uma Âncora Comercial   | 164        |
| <b>3.7 Resultados</b>  | <b>165</b> |
| 3.7.1 Série E1: Influência do Ângulo de Ataque   | 165        |
| 3.7.2 Série E2: Influência do Apêndice de Ré   | 179        |
| 3.7.3 Série E3: Ensaios com uma Âncora Comercial   | 186        |
| <br>   |            |
| <b>4 TESTES EM MAR</b>   | <b>192</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>                                  | <b>198</b> |
| <b>5.1 Confronto com os Resultados em Mar</b>                    | <b>198</b> |
| 5.1.1 Simulações x Resultados em Mar                             | 198        |
| 5.1.2 Ensaios Experimentais x Resultados em Mar                  | 204        |
| 5.1.3 Ensaios Experimentais x Simulações x Resultados em Mar     | 208        |
| <b>5.2 Influência dos Parâmetros Estudados na Cravação</b>       | <b>211</b> |
| 5.2.1 Influência do Ângulo de Ataque                             | 211        |
| 5.2.2 Influência do Apêndice de Ré                               | 213        |
| 5.2.3 Influência da Linha de Cravação                            | 214        |
| 5.2.4 Influência do Solo   | 216        |
| <b>6 CONCLUSÕES</b>  | <b>219</b> |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                              | <b>221</b> |
| <br>   |            |
| APÊNDICE 1 - Apêndices de Ré da âncora CENO-ROF                  | 223        |
| APÊNDICE 2 - Características Técnicas da Argila MTN-325          | 227        |
| APÊNDICE 3 - Programa Delta Plate Solver                         | 229        |
| APÊNDICE 4 - Resultados das Simulações e Experimentos em CD-ROOM | 235        |

## LISTA DE TABELAS

| TABELA | DESCRIÇÃO   | PÁGINA |
|--------|---|--------|
| 1.1    | Granulometria dos solos usualmente encontrados em águas profundas. <sup>[4]</sup>   | 17     |
| 1.2    | Classificação dos solos argilosos segundo sua resistência ao cisalhamento. <sup>[4]</sup>   | 19     |
| 2.1    | Exemplo de parametrização do solo no <b>DIGIN</b> .   | 66     |
| 2.2    | Exemplo de parametrização da linha de cravação no <b>DIGIN</b> .  | 67     |
| 2.3    | Parametrização do solo para S1.   | 71     |
| 2.4    | Parametrização da linha de cravação para S1.  | 71     |
| 2.5    | Parametrização do solo para S2.   | 72     |
| 2.6    | Parametrização da linha de cravação para S2.  | 72     |
| 2.7    | Parametrização do solo para S3.   | 73     |
| 2.8    | Parametrização da linha de cravação para S3.1.  | 74     |
| 2.9    | Parametrização da linha de cravação para S3.2.  | 75     |
| 2.10   | Parametrização do solo para S4.   | 76     |
| 2.11   | Parametrização da linha de cravação para S4.  | 79     |
| 2.12   | Parametrização do solo de Voador para S5.   | 80     |
| 2.13   | Parametrização do solo de Roncador para S5.   | 80     |
| 2.14   | Configuração da linha de cravação para S5.  | 80     |
| 3.1    | Comprimentos dos cabrestos ensaiados.   | 162    |
| 3.2    | Ângulo dos cabrestos ensaiados com a pata da âncora.  | 163    |
| 4.1    | Configuração da linha de cravação para os testes realizados em mar pela PETROBRAS com as âncoras <b>DENLA MK3</b> e <b>STEV MANTA</b> . | 194    |
| 4.2    | Denominação dos testes em mar realizados pela PETROBRAS com data, local, ângulo de ataque e modelo da âncora. <sup>[1]</sup>            | 195    |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| SÍMBOLO                | DESCRIÇÃO   |
|------------------------|---|
| Å                      | Angstrom.   |
| N                      | Newton.   |
| m                      | Metro.  |
| $\mu\text{m}$          | Micro metro.  |
| kgf                    | Kilograma força.  |
| tf                     | Tonelada força.   |
| kN                     | Kilo Newton.  |
| kPa                    | Kilo Pascal.  |
| z                      | Profundidade.   |
| Su                     | Resistência ao cisalhamento não drenada.  |
| Sr                     | Resistência ao cisalhamento amolgada.   |
| $\sigma$               | Tensão de mobilização do solo.  |
| $\rho$                 | Peso específico do solo.  |
| W                      | Peso específico da linha de cravação.   |
| $\phi$                 | Ângulo de inclinação da linha de cravação.  |
| $\phi_0$               | Ângulo de inclinação inicial da linha de cravação.  |
| S                      | Comprimento de um elemento de linha de cravação.  |
| $T_{\text{REBOC}}$     | Esforço horizontal aplicado pelo rebocador na linha de cravação.  |
| $T_{\text{LC}}$        | Esforço de tração presente na linha de cravação.  |
| $T_A$                  | Esforço de tração aplicado na âncora pela linha de cravação.  |
| $q_{\text{LC}}$        | Esforço reativo, por unidade de área, proveniente da interação da linha de cravação com o solo marinho. |
| $\mu_{\text{SOLO}}$    | Coefficiente de atrito do solo.   |
| $\Delta L$             | Comprimento da linha de cravação sobre o leito marinho.   |
| Nc                     | Fator de capacidade de contato.   |
| $\alpha_{\text{solo}}$ | Fator de adesão do solo.  |
| $f_{at}$               | Coefficiente de atrito unitário.  |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $d$                     | Superfície de contato efetiva da linha de cravação com o solo. |
| $\partial s$            | Comprimento do elemento da linha de cravação.                  |
| $\partial A$            | Elemento infinitesimal de área da âncora.                      |
| $B$                     | Área efetiva de contato da linha de ancoragem.                 |
| $f$                     | Grau de mobilização do solo.                                   |
| (n)                     | Direção normal à pata.   |
| (t)                     | Direção tangencial à pata.                                     |
| $\theta_{\text{PATA}}$  | Ângulo de inclinação da pata da âncora.                        |
| R                       | Esforços resultantes aplicados sobre a âncora.                 |
| CG                      | Centro de gravidade.   |
| CP                      | Centro de pressão.   |
| $L_{\text{VANTE}}$      | Comprimento do cabresto de vante.                              |
| $L_{\text{RÉ}}$         | Comprimento do cabresto de ré.                                 |
| $\theta_{\text{VANTE}}$ | Ângulo que o cabresto de vante forma com a pata da âncora.     |
| $\theta_{\text{RÉ}}$    | Ângulo que o cabresto de ré forma com a pata da âncora.        |

## LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | DESCRIÇÃO   | PÁGINA |
|--------|---|--------|
| 1.1    | Âncoras de sucção do sistema de ancoragem do FPSO “Northern Endeavour”, no convés de um rebocador. <sup>[2]</sup>   | 5      |
| 1.2    | Ilustração em corte de três âncoras de sucção instaladas no leito marinho, resistindo a esforços verticais. <sup>[3]</sup>  | 6      |
| 1.3    | Classificação das âncoras de carregamento horizontal. <sup>[4]</sup>  | 8      |
| 1.4    | Máximo ângulo de inclinação que a linha de ancoragem pode formar com a superfície do leito marinho para as âncoras de carregamento horizontal da classe “A”. <sup>[4]</sup>             | 9      |
| 1.5    | Configuração em catenária de um sistema tradicional de ancoragem de uma unidade flutuante. <sup>[4]</sup>   | 10     |
| 1.6    | Âncora STEVPRIS no Convés de um Rebocador. <sup>[5]</sup>   | 11     |
| 1.7    | Configuração em catenária de um sistema de ancoragem “Taut-leg” de uma unidade flutuante. <sup>[4]</sup>  | 12     |
| 1.8    | Ilustração de uma VLA em modo de operação, enterrada no leito marinho, resistindo a esforços verticais. <sup>[4]</sup>  | 12     |
| 1.9    | Âncora <b>STEMMANTA</b> : (a) modo cravação (b) modo operação. <sup>[8]</sup>   | 13     |
| 1.10   | Solo mobilizado por uma VLA em modo de operação.  | 15     |
| 1.11   | Terminologia aplicada a estrutura de uma VLA. <sup>[10]</sup>   | 20     |
| 1.12   | Âncora <b>DENLA MK3</b> de 10m <sup>2</sup> no convés de um rebocador. <sup>[12]</sup>  | 22     |
| 1.13   | Âncora <b>STEMMANTA</b> de 13m <sup>2</sup> no pátio da PETROBRAS.  | 22     |
| 1.14   | Ângulos de ataque da âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 23     |
| 1.15   | Trechos de uma linha de cravação.   | 24     |
| 1.16   | Etapas de instalação de VLA.  | 27     |
| 1.17   | ROV do rebocador Maersk Boulder, utilizado no apoio das operações de instalação de uma VLA: (a) Corpo do ROV; (b) Braços mecânicos; (c) Câmera de monitoração; (d) Hélice de propulsão. | 31     |
| 2.1    | Diagrama dos esforços atuantes no trecho suspenso da linha de cravação.   | 35     |
| 2.2    | Diagrama dos esforços atuantes no fore-runner da linha de cravação.   | 37     |
| 2.3    | Influência dos fenômenos de superfície no fator de capacidade de contato (Nc). <sup>[15]</sup>  | 39     |
| 2.4    | Diagrama dos esforços atuantes na âncora  | 41     |
| 2.5    | Diagrama dos esforços resultantes aplicados na âncora.  | 44     |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.6     | Diagrama dos esforços resultantes aplicados na âncora.   | 47 |
| 2.7     | Exemplo de um membro da pata da âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 51 |
| 2.7     | Placa delta da âncora <b>CENO-ROF</b> .  | 52 |
| 2.9     | Geometria computacional da placa delta da âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 52 |
| 2.10    | Protótipo da âncora <b>CENO-ROF</b> com área projetada de pata de 10m <sup>2</sup> , no convés do rebocador Far Saylor.  | 53 |
| 2.11    | Pata do modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 54 |
| 2.12    | Geometria completa do modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> : (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral; (c) Vista superior.  | 55 |
| 2.13    | Pata da âncora <b>STEV MANTA</b> de 11m <sup>2</sup> .   | 56 |
| 2.14    | Geometria completa do modelo computacional da âncora <b>STEV MANTA</b> : (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral; (c) Vista superior.  | 57 |
| 2.15    | Âncora <b>DENLA MK3</b> de 10m <sup>2</sup> .  | 58 |
| 2.16    | Geometria completa do modelo computacional da âncora <b>DENLA MK3</b> : (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral; (c) Vista superior.   | 59 |
| 2.17    | Centro de Gravidade da Pata da âncora <b>CENO-ROF</b> .  | 60 |
| 2.18    | Definição do ângulo de ataque da âncora <b>CENO-ROF</b> e de seu ponto de conexão com a linha de cravação no <b>DIGIN</b> .  | 61 |
| 2.19    | Centro de rotação da haste da âncora <b>DENLA MK3</b> de 10m <sup>2</sup> .  | 62 |
| 2.20    | Centro de rotação da haste do modelo computacional da âncora <b>DENLA MK3</b> .  | 63 |
| 2.21    | Centro de rotação da haste do modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 64 |
| 2.22    | Configuração da linha de cravação adotada nas simulações.  | 67 |
| 2.23    | Ângulos de ataque investigados para o modelo de âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 70 |
| 2.24    | Configuração de Pata com os apêndices simulados.   | 72 |
| 2.25    | Tipos de fore-runner adotados para S3.1  | 74 |
| 2.26    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.  | 87 |
| 2.27(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.                         | 88 |
| 2.27(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.                              | 89 |
| 2.28(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1. | 90 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 2.28(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.      | 91  |
| 2.29(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.                                     | 92  |
| 2.29(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.      | 93  |
| 2.30    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Comprimento da linha de cravação dentro do solo x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.                            | 94  |
| 2.31    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação ao tocar o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.         | 95  |
| 2.32    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Configuração geométrica da linha de cravação para o ângulo de ataque de 49,3 graus, em função da profundidade da âncora.                      | 96  |
| 2.33    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.  | 99  |
| 2.34(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S2.                         | 100 |
| 2.34(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.                              | 101 |
| 2.35(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S2. | 102 |
| 2.35(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.      | 103 |
| 2.36(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S2.                                     | 104 |
| 2.36(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da pata da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.  | 105 |
| 2.37    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.  | 108 |
| 2.38    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.                       | 109 |



|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 2.39    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1. | 110 |
| 2.40(a) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.                                     | 111 |
| 2.40(b) | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da pata da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.  | 112 |
| 2.41    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação ao tocar o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.         | 113 |
| 2.42    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.  | 117 |
| 2.43    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.                         | 118 |
| 2.44    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2. | 119 |
| 2.45    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Comprimento da linha de cravação dentro do solo x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.                            | 120 |
| 2.46    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da linha de cravação ao tocar o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.         | 121 |
| 2.47    | Evolução exponencial, quadrática, logarítmica e linear da resistência ao cisalhamento do solo.   | 125 |
| 2.48    | Alternância de estados com equilíbrio e sem equilíbrio, ocasionada pela mudança do centro de pressão da âncora.  | 127 |
| 2.49    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S4.  | 130 |
| 2.50    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S4.                           | 133 |
| 2.51    | Modelo computacional da âncora <b>CENO-ROF</b> de 10m <sup>2</sup> : Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade do baricentro da âncora, correspondente a série de simulações S4.                         | 136 |
| 2.52    | Modelo computacional da âncora <b>DENLA MK3</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade do Centro de gravidade da pata âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S5.                               | 140 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.53 | Modelo computacional da âncora <b>STEV MANTA</b> de 11m <sup>2</sup> : Profundidade do Centro de gravidade da pata âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S5. | 141 |
| 3.1  | Modelo em escala 1:20 da âncora <b>CENO-ROF</b> .   | 144 |
| 3.2  | Detalhe de pata do modelo em escala 1:20 da âncora <b>CENO-ROF</b> .  | 145 |
| 3.3  | Modelo em escala 1:20 da âncora <b>STEV MANTA</b> .   | 146 |
| 3.4  | Detalhe de pata do modelo em escala 1:20 da âncora <b>STEV MANTA</b> .  | 147 |
| 3.5  | Detalhe da placa delta em escala 1:20.  | 148 |
| 3.6  | Trecho da linha de cravação utilizada nos ensaios experimentais.  | 148 |
| 3.7  | Solo argiloso utilizado nos ensaios experimentais.  | 149 |
| 3.8  | Dimensões do Tanque de Prova.   | 150 |
| 3.9  | Tanque de interação solo-estrutura do CENO-USP  | 151 |
| 3.10 | Guincho de tracionamento da linha de cravação. <sup>[17]</sup>  | 152 |
| 3.11 | Fuso redirecionador da linha de cravação. <sup>[17]</sup>   | 153 |
| 3.12 | Tela principal do programa de controle e monitoramento do tanque de prova. <sup>[12]</sup>  | 154 |
| 3.13 | Sistema de localização planar do modelo de âncora. <sup>[17]</sup>  | 155 |
| 3.14 | Célula de carga utilizada para medição dos esforços na linha de cravação. <sup>[17]</sup>   | 157 |
| 3.15 | Trecho do arquivo de saída do programa VLAPOS.  | 158 |
| 3.16 | Posicionamento inicial do modelo de âncora no tanque.   | 159 |
| 3.17 | Região de atuação no tanque da bomba lameira.   | 160 |
| 3.18 | Detalhe do Apêndice de Ré aparafusado na pata do modelo da âncora Petrobrás <b>CENO-ROF</b> escala 1:20.  | 164 |
| 3.19 | Posicionamento do fuso em sucessivos instantes do processo de cravação.   | 169 |
| 3.20 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E1.                          | 174 |
| 3.21 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Força na linha de cravação x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E1.       | 175 |
| 3.22 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Ângulo de inclinação da linha de cravação x Profundidade do centro de da âncora, correspondente a série de experimentos E1.  | 176 |
| 3.23 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Ângulo de orientação da pata x profundidade do centro de da âncora, correspondente a série de experimentos E1.               | 177 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.24 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Velocidade de deslocamento da pata x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E1.          | 178 |
| 3.25 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.                                     | 181 |
| 3.26 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Força na linha de cravação x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.                  | 182 |
| 3.27 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Ângulo de inclinação da linha de cravação x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.   | 183 |
| 3.28 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Ângulo de orientação da pata x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.                | 184 |
| 3.29 | Modelo experimental da âncora <b>CENO-ROF</b> escala 1:20: Velocidade de deslocamento da pata x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.          | 185 |
| 3.30 | Modelo experimental da âncora <b>STEV MANTA</b> escala 1:20: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.                                   | 187 |
| 3.31 | Modelo experimental da âncora <b>STEV MANTA</b> escala 1:20: Força na linha de cravação x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.                | 188 |
| 3.32 | Modelo experimental da âncora <b>STEV MANTA</b> escala 1:20: Ângulo de inclinação da linha de cravação x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3. | 189 |
| 3.33 | Modelo experimental da âncora <b>STEV MANTA</b> escala 1:20: Ângulo de orientação da pata x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.              | 190 |
| 3.34 | Modelo experimental da âncora <b>STEV MANTA</b> escala 1:20: Velocidade de deslocamento da pata x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.        | 191 |
| 4.1  | Âncoras instrumentadas com equipamento rastreador de trajetória. <sup>[12]</sup>   | 193 |
| 4.2  | Âncora <b>DENLA MK3</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade x arrasto do centro de gravidade da pata da âncora, correspondente aos testes realizados em mar pela PETROBRAS. <sup>[1]</sup>          | 196 |
| 4.3  | Âncora <b>STEV MANTA</b> de 10m <sup>2</sup> : Profundidade x arrasto do centro de gravidade da pata da âncora, correspondente aos testes realizados em mar pela PETROBRAS. <sup>[1]</sup>         | 197 |
| 5.1  | <b>DENLA MK3</b> : Resultados numéricos x Resultados no MAR <sup>[1]</sup> .   | 199 |
| 5.2  | <b>STEV MANTA</b> : Resultados numéricos x Resultados no MAR <sup>[1]</sup> .  | 199 |
| 5.3  | Estados de posicionamento inicial da âncora.   | 200 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 5.4 | <b>DENLA MK3:</b> Resultados numéricos x Resultados no MAR <sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1.    | 201 |
| 5.5 | <b>STEVMANA:</b> Resultados numéricos x Resultados no MAR <sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1.     | 202 |
| 5.6 | <b>STEVMANA:</b> Resultados experimentais x Resultados no MAR <sup>[1]</sup> - valores absolutos em escala 1:1. | 206 |
| 5.7 | <b>STEVMANA:</b> Resultados experimentais x Resultados no MAR <sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1. | 208 |
| 5.8 | <b>STEVMANA:</b> Tanque de prova x Simulações no Digin x Mar <sup>[1]</sup> - valores absolutos em escala 1:1.  | 210 |
| 5.9 | <b>STEVMANA:</b> Tanque de prova x Simulações no Digin x Mar <sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1.  | 210 |

# 1 INTRODUÇÃO

O conceito de âncora surgiu da necessidade de se manter a posição de uma unidade flutuante. Há 4 milênios atrás, na China antiga, a história revela a utilização de grandes pedras amarradas a linhas como sistema de ancoragem utilizado pelas embarcações da época. Com o passar do tempo, as pedras foram sendo substituídas por sacos de areia, mas o princípio continuava o mesmo: a capacidade das âncoras dependia essencialmente de seu peso e do coeficiente de atrito com a superfície com a qual estava em contato. Mesmo sem o conhecimento das leis físicas que atuavam sobre suas âncoras primitivas, estas civilizações foram aperfeiçoando sua geometria. Com a introdução do ferro em sua manufatura, por volta de 800 antes de Cristo, as âncoras passaram a ter uma forma que possibilitasse uma melhor penetração no solo.

O princípio de sustentação começava pouco a pouco ser alterado, porque agora a resistência do solo, ainda que pequena, passou a contribuir para o aumento do poder de retenção das âncoras. Novas geometrias, todas em ferro, iam surgindo tentando aumentar sua máxima força de retenção. Dessa evolução surgiu, na década de 90, o conceito de âncora de carregamento vertical (VLA), âncora com poder de retenção intimamente associado à sua elevada capacidade de penetração no solo, que em grandes lâminas d'água (superiores a 500 metros) é geralmente formado por argilas.

A vinculação do poder de retenção destas âncoras às propriedades mecânicas do solo exige que as VLAs sejam instaladas a vários metros abaixo

do leito marinho. Uma das maneiras de se executar esta tarefa é através da cravação destes corpos, executada com o apoio de um rebocador.

Porém, o fenômeno de cravação destas âncoras em águas profundas é, ainda hoje, muito pouco conhecido. Essa falta de informação se deve principalmente aos altos custos envolvidos nas operações de cravação destas âncoras, e à natureza do fenômeno, que se processa abaixo do solo, sendo impossível de ser visualizado.

As poucas informações que hoje dispomos sobre a cravação das VLAs provêm de testes extremamente caros realizados pela Petrobras, pioneira na exploração de petróleo em águas profundas. O custo destas operações facilmente atinge a casa de 70.000 US\$/dia, impondo uma “muralha” monetária à realização de pesquisas em mar com âncoras em escala real.

## **1.1 Objetivos**

A pesquisa desenvolvida neste trabalho vem a contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno de cravação, através da realização de simulações numérico-computacionais e experimentos em tanque de prova. O objetivo deste trabalho é sempre de investigar e compreender o fenômeno, revelando a influência de determinados parâmetros na cravação destes corpos.

Para as simulações numérico-computacionais desenvolvidas, será possível conhecer, para cada faixa de profundidade estudada num processo de integração passo-a-passo, o comportamento de uma série de variáveis ao longo de toda a trajetória de cravação, de tal sorte que, para cada passo de integração do programa, obtem-se:

- A distância horizontal percorrida pela âncora (arrasto);
- A profundidade no solo penetrada pela âncora;
- A inclinação da pata da âncora;
- A força na linha de cravação no ponto de contato desta com o leito marinho;
- A inclinação da linha de cravação no ponto de contato com o leito marinho;
- A inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora;
- O comprimento de cabo da linha de cravação dentro do solo;
- A configuração geométrica em catenária de toda a linha de cravação, tanto a parte dentro d'água como a parte dentro do solo.

Para os experimentos realizados no tanque de prova com modelos de âncoras em escala 1:20, são revelados:

- A distância horizontal percorrida pela âncora (arrasto);
- A profundidade no solo penetrada pela âncora;
- A inclinação da pata da âncora;
- A força na linha de cravação;
- A inclinação da linha de cravação;
- A velocidade de deslocamento da âncora.

Através da apresentação gráfica destes resultados é possível visualizar e compreender o que de fato acontece dentro do solo ao longo do processo de cravação. Além disto, de modo a se estabelecer um vínculo e dar maior credibilidade às conclusões inferidas neste trabalho, algumas das simulações e experimentos desenvolvidos são confrontadas com testes realizados em mar pela PETROBRAS, com âncoras em escala real. <sup>[1]</sup>

## **1.2 Classificação das Âncoras**

As âncoras modernas podem ser classificadas conforme seu procedimento de instalação, ou se preferirmos, conforme o método de cravação destes corpos. Neste âmbito, existem duas grandes classes de âncoras: as âncoras de sucção e as âncoras de arrasto.

Neste trabalho será estudado a cravação, em solos argilosos, de uma classe particular das âncoras de arrasto: as âncoras de carregamento vertical, a serem aqui referidas pela sigla VLA (“Vertical Loaded Anchors”).

### **1.2.1 Âncoras de Sucção**

As âncoras de sucção são tubos abertos em sua extremidade inferior e fechados em sua extremidade superior. A FIGURA 1.1 mostra um conjunto destas âncoras no convés de um rebocador, com sua parte superior voltada para cima na imagem.

Seu método de cravação envolve uma operação extremamente cara e demorada, podendo durar meses a instalação de todo o conjunto de âncoras. Para cada uma delas, uma bomba de sucção, (daí o seu nome), é posicionada, usualmente com o auxílio de um ROV (“Remote Operate Vehicle”, ou veículo de operação remota - vide item 1.5 deste capítulo), sobre a extremidade superior do tubo. Esta bomba entra então, em operação, reduzindo a pressão interna no interior do tubo. A pressão externa, maior do que a interna, enterra o tubo no solo marinho. As âncoras mostradas na FIGURA 1.1 foram enterradas 12 metros dentro do solo (conforme mostram as marcas graduadas na figura).





FIGURA 1.1 - Âncoras de sucção do sistema de ancoragem do FPSO "Northern Endeavour", no convés de um rebocador. [2]

A estes grandes tubos estão amarrados as linhas de ancoragem, em posições que podem variar conforme as condições de projeto. Estas âncoras são capazes de resistir a esforços verticais provenientes das linhas de ancoragem da unidade flutuante. A FIGURA 1.2 ilustra, em corte, um conjunto de três âncoras de sucção instaladas no leito marinho, resistindo a esforços normais à sua superfície.

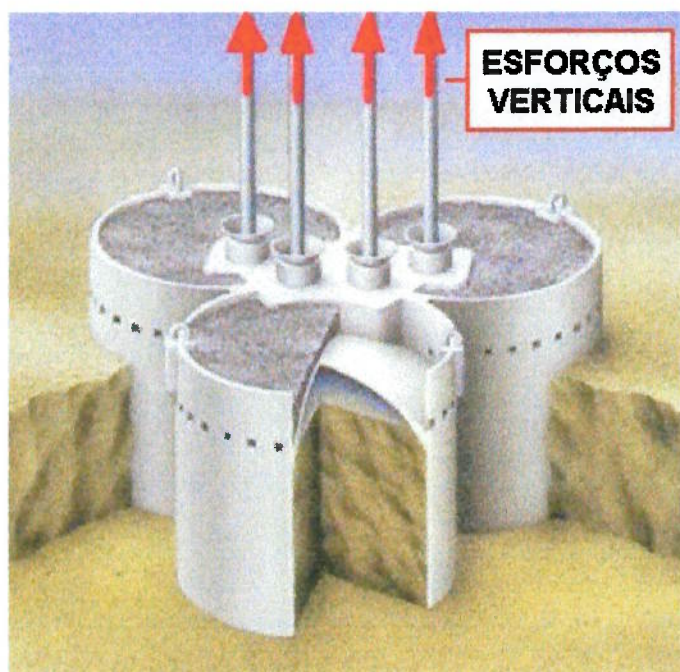


FIGURA 1.2 - Ilustração em corte de três âncoras de sucção instaladas no leito marinho, resistindo a esforços verticais.<sup>[3]</sup>

## 1.2.2 Âncoras de Arrasto

Âncoras de arrasto são âncoras cujo método de instalação está baseado no arraste destes corpos, daí o seu nome. Estas âncoras podem ser divididas em duas classes: as âncoras de carregamento horizontal e as âncoras de carregamento vertical, ou VLAs.

### 1.2.2.1 Âncoras de Carregamento Horizontal

As âncoras de carregamento horizontal são as mais antigas do planeta, e, como o próprio nome diz, são âncoras que só resistem a carregamentos basicamente horizontais.

A abertura de uma tumba no Egito antigo revela que, já em 2000 AC, essa civilização ancorava suas embarcações à praia através da utilização de estacas cônicas de madeira, amarradas a linhas de papiro. Na china antiga, a história revela a utilização de âncoras compostas por grandes pedras, sacos de

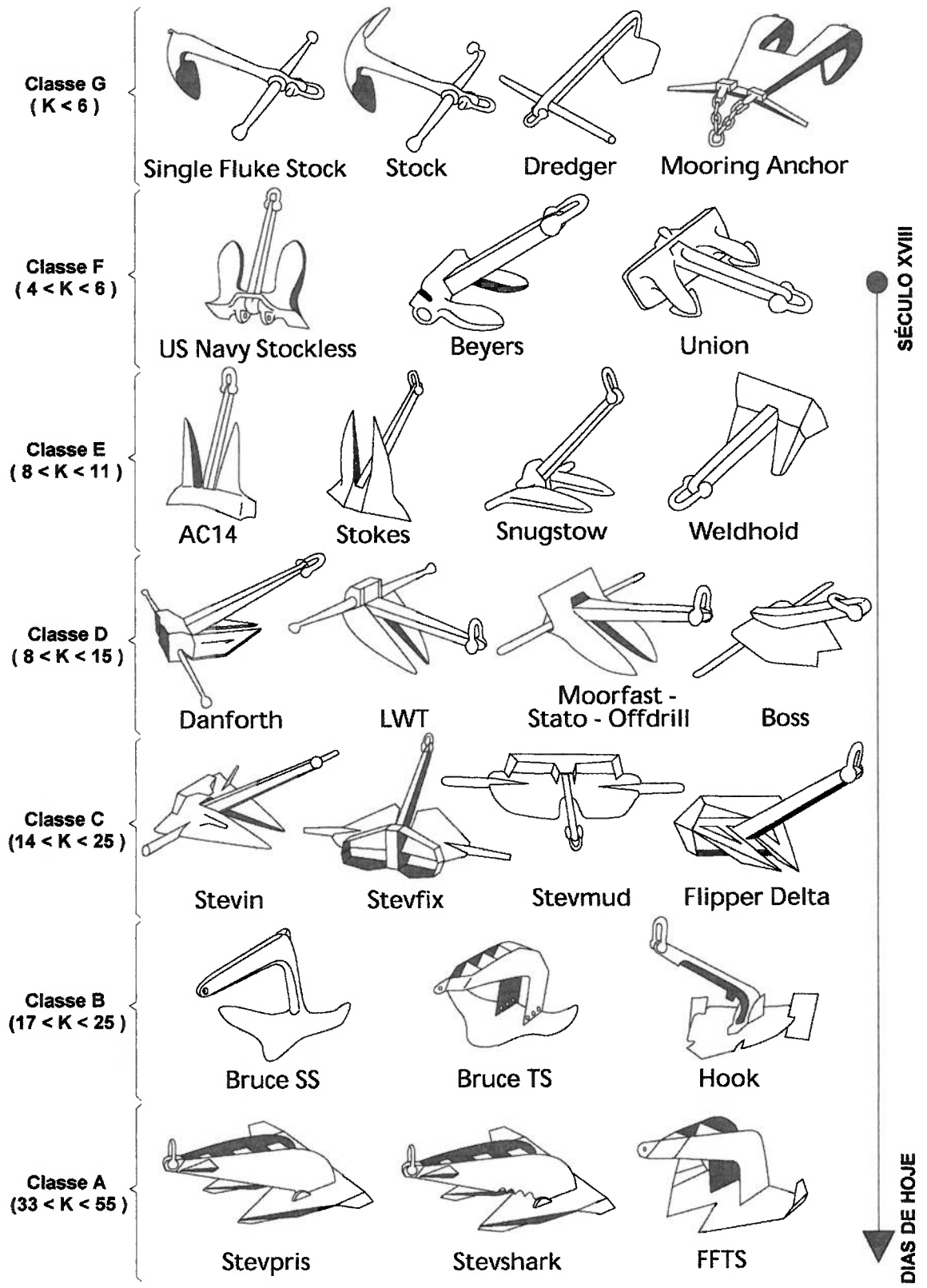
areia, cestos de pedras ou mesmo troncos de madeira preenchidos com chumbo, como alternativas para seus primitivos sistemas de ancoragem. Estas âncoras resistiam, devido a sua concepção, a esforços puramente horizontais, fazendo desta classe a primeira das quais se tem registro histórico.

A grande evolução desta classe de âncora veio com a introdução do ferro em sua manufatura. Através dela, o poder de retenção destas âncoras, antes unicamente dependentes de seu próprio peso e de seu coeficiente de atrito com a superfície do solo, passou a depender, cada vez mais, de sua resistência estrutural e de sua capacidade de penetração no solo.

Neste contexto, novas formas começaram a surgir de modo a aumentar o poder de retenção destas âncoras. Âncoras com formas de “patas” foram inventadas com o intuito de tirar proveito da resistência do solo na sua máxima capacidade de retenção. Moedas gregas, datadas de 280 AC, revelam a presença de patas rudimentares nas âncoras de ferro da frota naval Ateniense.

Um dos primeiros problemas enfrentados pelas embarcações que se utilizaram desta nova solução em sistema de ancoragem era a baixa resistência dos materiais empregados na fabricação de suas âncoras. Estes materiais, aliados a formas que induziam à formação de concentrações de tensão, levavam à ruptura do material. A evolução destas âncoras fez com que novas formas de “hastes” e “patas” fossem inventadas (a definição dos termos “pata” e “haste” pode ser encontrada no item 1.4.1).

De acordo com as novas geometrias que foram surgindo, durante a história, as âncoras de carregamento horizontal podem ser agrupadas em classes, conforme mostra a FIGURA 1.3. Nesta figura, também se pode observar como a eficiência (K) destas âncoras evoluiu com o tempo.



$$K = \frac{\text{MÁXIMA FORÇA DE RETENÇÃO}}{\text{PESO DA ÂNCORA}}$$

FIGURA 1.3 - Classificação das âncoras de carregamento horizontal. [4]

A evolução das formas fez com que em 1813 uma nova geometria, para os padrões da época, fosse introduzida na fabricação destas âncoras, classificadas como âncoras de “classe G” - FIGURA 1.3. Estas âncoras possuíam na região superior de sua haste um estabilizador, lembrando uma “cruz”. Este estabilizador tinha a função de garantir que a pata da âncora penetrasse no solo.

Em 1821 foi inventada a âncora “stockless” - FIGURA 1.3 -, um novo modelo que levou o estabilizador da parte superior da haste para a pata, tornando estas âncoras mais fáceis de serem manuseadas. A presença do estabilizador instalado na pata se mantém presente até os dias de hoje.

Após sucessivas evoluções, motivadas pela necessidade de ancoragem de unidades permanentes para exploração de petróleo em alto mar, chega-se às âncoras classe “A”, ou âncoras de alta capacidade de carga. Estas âncoras conseguem suportar esforços até 55 vezes seu próprio peso, e cuja direção forme, com a superfície do solo na qual estão enterradas, um ângulo de até 20 graus, conforme mostra o desenho da FIGURA 1.4.



FIGURA 1.4 - Máximo ângulo de inclinação que a linha de ancoragem pode formar com a superfície do leito marinho para as âncoras de carregamento horizontal da classe “A”. [4]

Porém, devido a esta limitação, os sistemas de ancoragem que se utilizam destas âncoras têm que adotar grandes raios de ancoragem - conforme mostra a FIGURA 1.5 - de modo a permitir que o próprio peso da linha de ancoragem forme uma geometria em catenária tal, que ao tocar o leito marinho, sua inclinação não exceda a máxima inclinação permitida pelo projeto do sistema. Estes sistemas são conhecidos hoje como sistemas tradicionais de ancoragem.

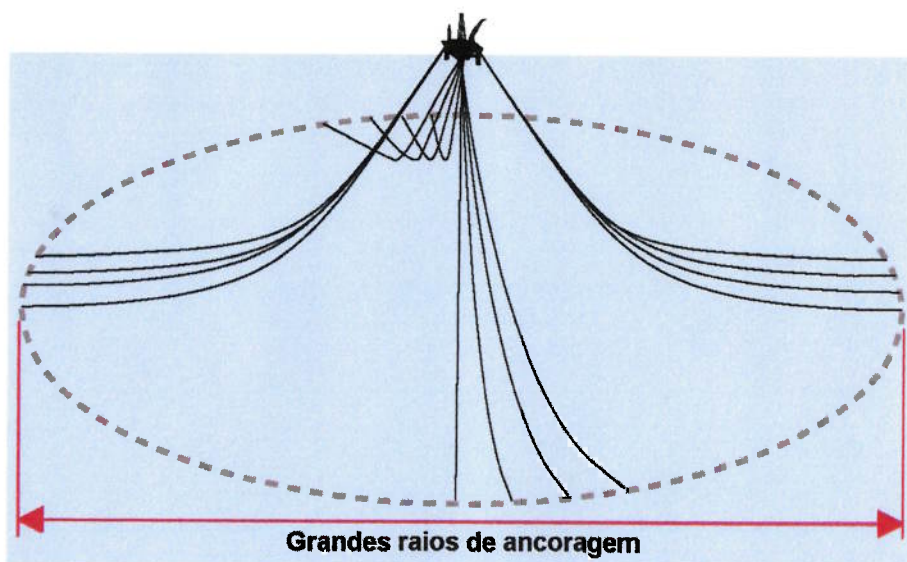


FIGURA 1.5 - Configuração em catenária de um sistema tradicional de ancoragem de uma unidade flutuante.<sup>[4]</sup>

Como solução atualmente empregada na ancoragem de plataformas de petróleo localizadas em águas rasas, tem-se o modelo STEVPRIS<sup>[5]</sup>, uma âncora da "classe A", fabricada pela empresa holandesa VRYHOF ANKERS<sup>[6]</sup>. Este modelo pode suportar cargas horizontais de até 3.000 toneladas, e está ilustrado na FIGURA 1.6.



FIGURA 1.6 - Âncora STEVPRIS no Convés de um Rebocador. [5]

#### 2.1.2.2 Âncoras de Carregamento Vertical ou VLAs

Como o próprio nome diz, âncoras de carregamento vertical são âncoras capazes de suportar esforços de natureza vertical.

Com a exploração de petróleo, e demais atividades marítimas em todo o mundo, se dirigindo para águas cada vez mais profundas, a utilização de sistemas de ancoragem convencionais, como o ilustrado na FIGURA 1.5, implica num brutal aumento do raio de ancoragem para estas instalações, em virtude da grande lâmina d'água. Um sistema destes seria um tanto quanto robusto, e de custo excessivamente alto. Para estas águas, então, o sistema tradicional de ancoragem se torna uma alternativa cada vez menos atraente.

Como alternativa de redução de custos, e robustez do sistema de ancoragem para fixação das unidades flutuantes, surge um sistema denominado "taut-leg" [7] (ou sistema de "pernas curtas"), ilustrado na FIGURA

1.7. Neste sistema, as linhas de ancoragem são extremamente curtas e leves. Esta configuração, porém, aumenta a componente vertical do esforço que solicita a âncora - FIGURA 1.8 - tornando-se necessário a utilização de VLAs, únicas âncoras de arrasto capazes de resistir a esforços verticais.

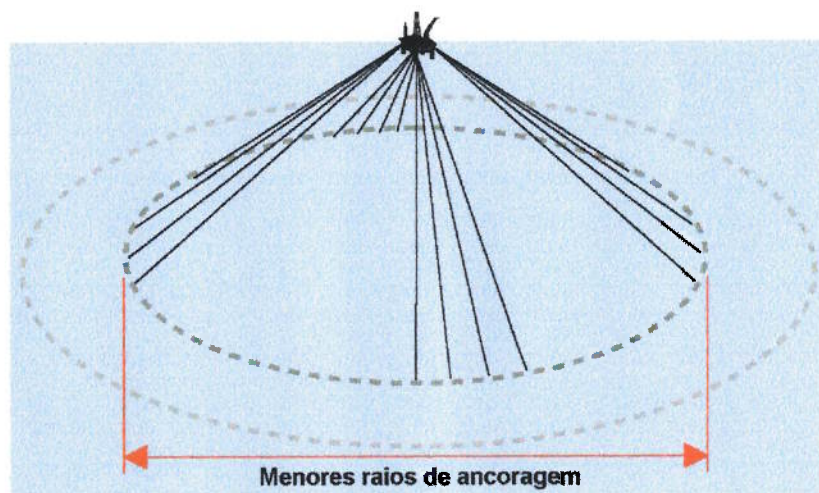


FIGURA 1.7 - Configuração em catenária de um sistema de ancoragem "Taut-leg" de uma unidade flutuante. [4]

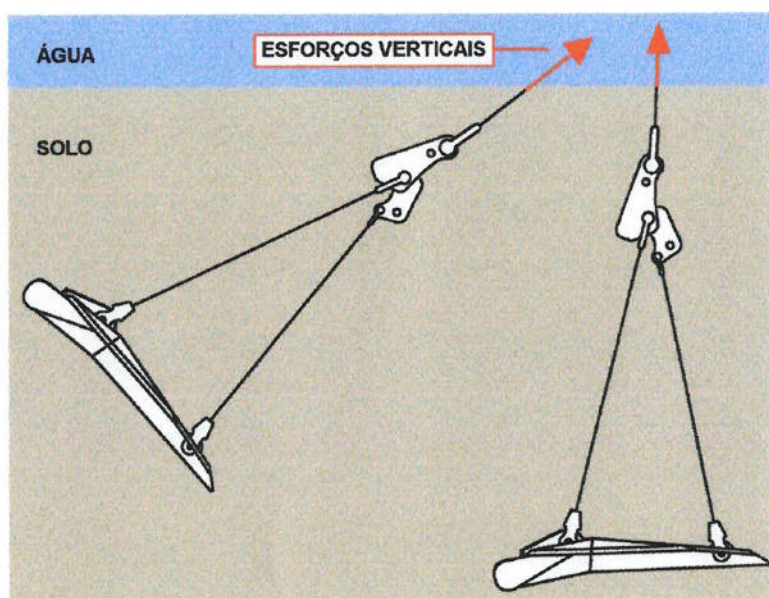


FIGURA 1.8 - Ilustração de uma VLA em modo de operação, enterrada no leito marinho, resistindo a esforços verticais. [4]

Por ser uma solução relativamente recente, as VLAs dispõem de pouquíssimos fabricantes no mundo, sendo sua comercialização realizada, em



regime de quase monopólio, com preços aviltados. No presente momento, a PETROBRAS já tem realizada sua primeira experiência com a âncora STEVMANTA<sup>[8]</sup>, VLA da VRYHOF ANKERS, instalada em águas profundas nas plataformas PETROBRAS-27 e PETROBRAS-36, bacia de Campos. Esta experiência, pioneira no mundo, tem demonstrado a real possibilidade de que tal solução venha a ser empregada cada vez mais frequentemente, justificando o desenvolvimento e pesquisas neste setor.

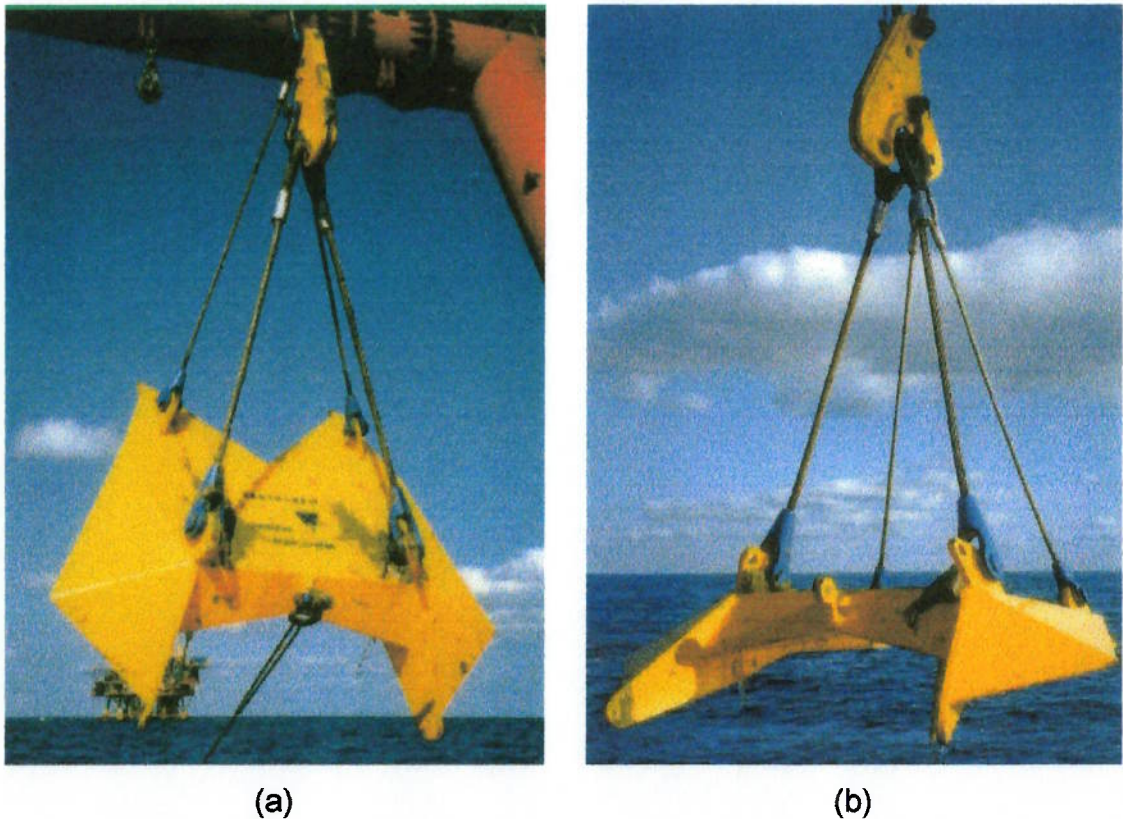


FIGURA 1.9 - Âncora STEVMANTA: (a) modo cravação (b) modo operação. <sup>[8]</sup>

As VLAs possuem um mecanismo de mudança do modo de cravação para o modo de operação, variando o ângulo de ataque da âncora (definido no item 1.4.1 desta dissertação). O mecanismo de variação deste ângulo é característico de cada fabricante, sendo sua presença essencial para a instalação destas âncoras. Quando posicionado no modo de cravação, esta

configuração permite a instalação da âncora em uma determinada profundidade. Uma vez instalada, o mecanismo é acionado, e a âncora passa para o modo de operação. A FIGURA 1.9 mostra o modelo **STEV MANTA** da **VRYHOF ANKERS** no modo de cravação e operação.

Ressalte-se que, como particularidade única das âncoras de arrasto, as VLAs são projetadas para trabalhar enterradas a vários metros abaixo do leito marinho, de tal modo que, suas características operacionais dependem de sua boa interação com a lama do fundo oceânico.

### 1.3 Considerações sobre o solo Marinho

Até a década de 70, o projeto e a geometria das âncoras estava baseada fundamentalmente em processos empíricos. Nesta época, a arte era muito mais utilizada do que a ciência, e o uso de fórmulas e modelos físicos nesta área era raro. Isto acontecia, e ainda acontece nos dias de hoje, porque pouco se conhece sobre o assunto. O cálculo dos esforços resultantes da interação entre a estrutura da âncora e o solo, esteja a âncora em seu modo de cravação ou operação, depende de um conhecimento mais apurado das leis atuantes neste cenário, principalmente no que tange à interação solo-âncora.

Neste âmbito, o principal problema é a predição do volume de material do solo mobilizado pela âncora. De uma maneira mais genérica, é este volume que determina sua máxima capacidade de retenção, ou seja, a máxima força que o solo consegue resistir, sem colapsar, a solicitação da âncora. A FIGURA 1.10 ilustra o solo mobilizado por uma âncora VLA já em modo de operação.

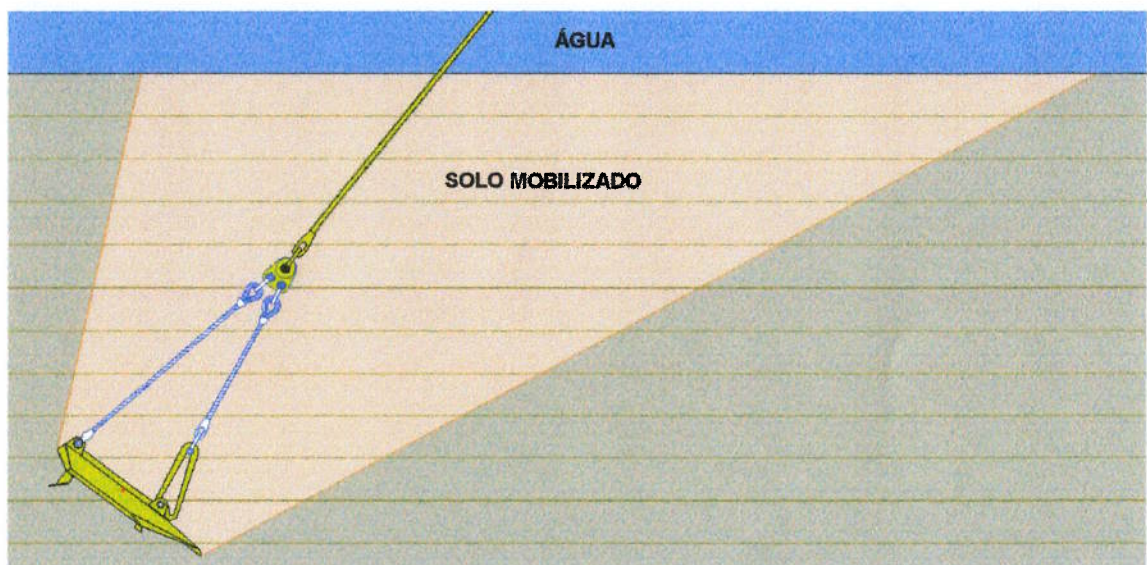


FIGURA 1.10 - Solo mobilizado por uma VLA em modo de operação.

### **1.3.1 Sistema Particulado do Solo**

Na constituição dos solos está presente um conjunto de partículas associadas a um líquido, (geralmente água), contendo ar em seus espaços intermediários. As partículas se encontram livres para se movimentarem entre si. Em alguns casos, uma pequena cementação pode ocorrer entre as partículas, mas numa intensidade bem mais baixa do que nos cristais de um metal, ou nos agregados de um concreto. É graças a esta liberdade de movimento entre as partículas, que a cravação torna-se possível.

Alguns solos possuem grãos visíveis a olho nu, como os grãos de pedregulho, ou a areia do mar, enquanto outros solos têm grãos tão finos que, quando misturados à água, transformam-se numa pasta, popularmente conhecida por lama, não se visualizando individualmente as partículas. A diversidade do tamanho dos grãos é muito grande. Enquanto algumas partículas de argila chegam a apresentar espessuras da ordem de 10 Å (0,000001 mm), partículas de areia comumente atingem dimensões de 1 a 2 mm. Se uma partícula de argila fosse ampliada de forma a ficar do tamanho de uma folha de papel, o grão de areia acima citado ficaria com dimensões de 100 a 200 metros”, segundo Carlos de Souza Pinto<sup>[9]</sup>.

Denominações específicas classificam os solos quanto ao tamanho de seus grãos. Os solos encontrados em águas profundas são solos que apresentam granulometria da ordem representada na TABELA 1.1.

TABELA 1.1 - Granulometria dos solos usualmente encontrados em águas profundas. <sup>[4]</sup>

| Granulometria<br>[ $\mu m$ ] | Classificação |
|------------------------------|---------------|
| < 2                          | Argila        |
| 2 – 6                        | Silte fino    |
| 6 – 20                       | Silte média   |
| 20 – 60                      | Silte grossa  |
| 60 – 200                     | Areia fina    |
| 200 – 600                    | Areia média   |
| 600 – 2000                   | Areia grossa  |

### 1.3.2 Propriedades Mecânicas dos Solos Argilosos

A resistência dos solos pode ser expressa em função de sua resistência ao cisalhamento. Uma de suas propriedades que pode expressar numericamente esta resistência é a tensão de cisalhamento.

De uma maneira genérica, os solos argilosos marinhos podem ser caracterizados por sua tensão de cisalhamento e adensamento pela profundidade, conforme a seguinte relação:

$$SU[z] = a + b \times z \quad (1)$$

Onde:

- SU[z] : Resistência ao cisalhamento na profundidade "z";
- z : Profundidade;
- a : Coeficiente que indica a resistência ao cisalhamento quando z=0;

- b :Coeficiente que indica a variação linear da resistência ao cisalhamento com o aumento progressivo da profundidade.

Observando-se a formulação apresentada acima, pode-se notar que, de uma maneira genérica, a resistência ao cisalhamento do solo cresce linearmente com a profundidade. Quanto maior a profundidade, mais adensado estará o solo, e tanto maior será sua resistência ao cisalhamento. Por este motivo, quanto maior a profundidade, tanto maiores os valores das tensões de mobilização, (tensões que surgem fruto da interação solo-âncora), apresentadas pelo solo como resposta às solicitações de uma âncora.

A consistência das argilas está diretamente relacionada com sua resistência ao cisalhamento. Estes valores podem ser obtidos em laboratório pelo teste UCT ("Unconfined Compression Test") e no local pelo SPT ("Standard Penetration Test"), ou pelo CPT ("Cone Penetration Test"). A resistência ao cisalhamento pode também ser estimada por um teste aplicado em engenharia de solos: o teste de palhetas. Este teste consiste em aplicar uma torção em uma região mobilizada pelas palhetas do instrumento de medição. O torque medido, em função do tempo, está diretamente relacionado com a resistência do solo. Na iminência da ruptura, temos o máximo torque que este solo pode aguentar sem colapsar. Este teste foi aplicado no solo do tanque de prova no qual foram realizados os ensaios experimentais deste trabalho, na tentativa de se determinar sua máxima tensão de cisalhamento.

A classificação das argilas segundo sua resistência ao cisalhamento está apresentada na TABELA 1.2.

TABELA 1.2 - Classificação dos solos argilosos segundo sua resistência ao cisalhamento. <sup>[4]</sup>

| Consistência da argila | Su<br>[kPa]               | Su<br>[kPa]              |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                        | Classificação ASTM D-2488 | Classificação BS CP-2004 |
| Muito mole             | 0 – 13                    | 0 – 20                   |
| Mole                   | 13 – 25                   | 20 – 40                  |
| Firme                  | 25 – 50                   | 40 – 75                  |
| Rígida                 | 50 – 100                  | 75 – 150                 |
| Muito rígida           | 100 – 200                 | 150 – 300                |
| Dura                   | 200 – 400                 | 300 – 600                |
| Muito dura             | > 400                     | > 600                    |

A argila, quando mole, é comumente denominada de lama. Este meio tem características específicas bem diferentes dos materiais que estamos acostumados a trabalhar. Define-se para a lama resistências ao cisalhamento variáveis com a profundidade, em função do adensamento, normalmente variando linearmente de acordo com a formulação definida em (1). Neste estado, temos a resistência ao cisalhamento não drenada. Após o colapso, a resistência ao cisalhamento, agora denominada resistência amolgada, cai para valores de 90 a 30% da tensão não drenada.

## 1.4 Termos e Definições

### 1.4.1 VLAs

Antes de se apresentar a fenomenologia da cravação, é importante que o leitor tenha ciência dos principais termos e definições usualmente aplicados as VLAs. No âmbito da estrutura da âncora, é necessária a definição dos termos apresentados na FIGURA 1.11.

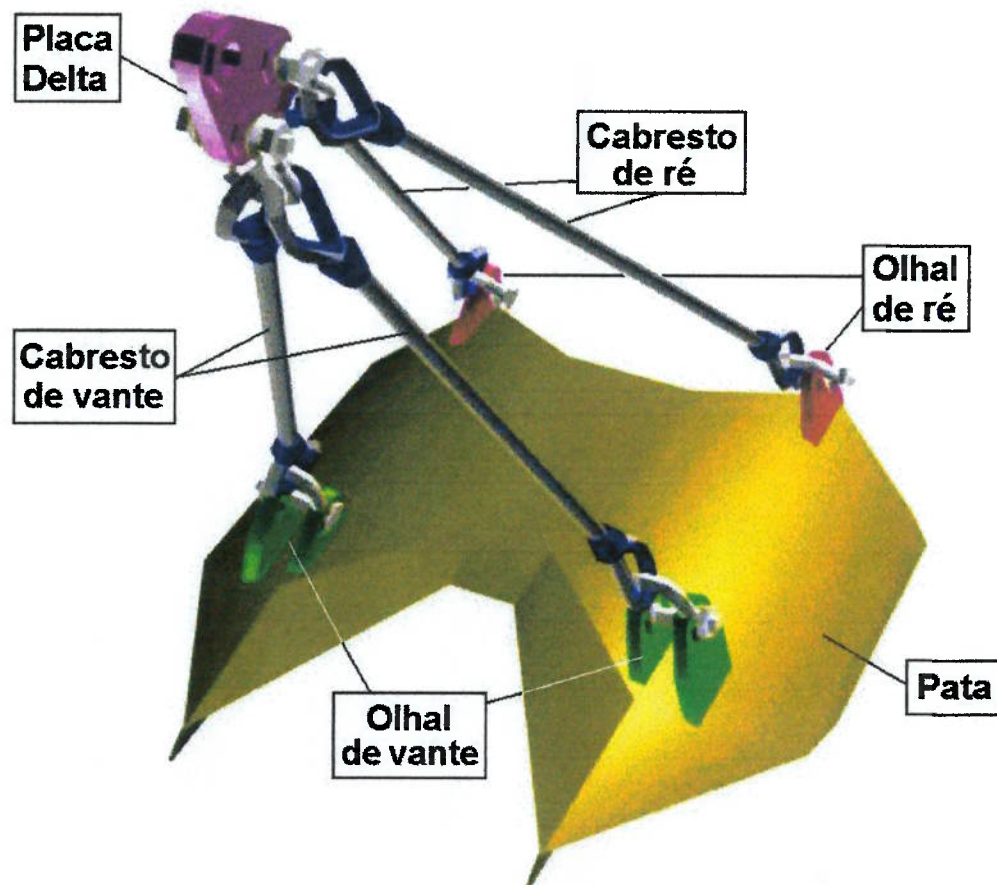


FIGURA 1.11 - Terminologia aplicada à estrutura de uma VLA. <sup>[10]</sup>

A pata é a estrutura da âncora composta por chapas de aço, responsável diretamente por sua capacidade de retenção. A força de retenção de uma âncora é diretamente proporcional à área projetada da pata no plano normal à direção do esforço de sollicitação.



À pata da âncora também pertencem os olhais de ré e de vante. O Olhal de vante - representado em verde na FIGURA 1.11 - está localizado na região posterior da pata, e tem a função de conectar o cabresto de vante à pata. Olhal de Ré - representado em vermelho na FIGURA 1.11 - está localizado na região anterior da pata, e por sua vez tem a função de conectar o cabresto de ré à pata da âncora.

A haste é a estrutura da âncora que conecta sua pata à linha de cravação (definido adiante). Nas VLAs, a haste pode ser rígida ou flexível. Hastes rígidas, como o próprio nome diz, são estruturas rigidamente presas à pata da âncora, transmitindo a esta, forças e momentos. Um caso típico de haste rígida pode ser encontrado na âncora DENLA MK3<sup>[11]</sup> - FIGURA 1.12 -, fabricada pela empresa BRUCE ANCHORS<sup>[11]</sup>. Hastes flexíveis, por sua vez, têm em sua composição cabos de aço, e são conectadas à pata da âncora através de articulações. Não transmitem, portanto, momentos, somente forças. A haste flexível também pode ser referenciada pelo termo cabresto, e é encontrada, por exemplo, nas âncoras VRYHOF STEVMANTA<sup>[8]</sup> e PETROBRAS CENO-ROF<sup>[12]</sup>, conforme mostram as FIGURAS 1.13 e 1.14.

Para o caso particular da haste flexível, novas terminologias necessitam ser apresentadas. O cabresto de vante, como o próprio nome diz, é o trecho do cabresto que conecta o olhal de vante à placa delta. O cabresto de ré, por sua vez, é o trecho do cabresto que conecta o olhal de ré à placa delta. E a placa delta - ilustrada em cor roxa na FIGURA 1.11 - é a estrutura que conecta os cabrestos de ré e vante à linha de cravação.



FIGURA 1.12 - Âncora DENLA MK3 de 10m<sup>2</sup> no convés de um rebocador. <sup>[11]</sup>



FIGURA 1.13 - Âncora STEVMANTA de 13m<sup>2</sup> no pátio da PETROBRAS.

O ângulo de ataque de uma âncora é definido como o ângulo que a haste forma com sua pata. Como a pata é uma região um tanto quanto extensa numa âncora, o valor deste ângulo depende de se definir um ponto de referência na pata, através do qual será feita a medição. Cada fabricante tem o

seu ponto de referência. A FIGURA 1.14 mostra duas configurações de cabresto para a âncora CENO-ROF<sup>[12]</sup>, cada uma delas definindo um diferente ângulo de ataque. No caso da figura, o ponto de referência na pata para a medição do ângulo de ataque foi o centro da furação do olhal de ré. O ponto de referência na haste é via de regra o ponto de conexão com a linha de cravação.

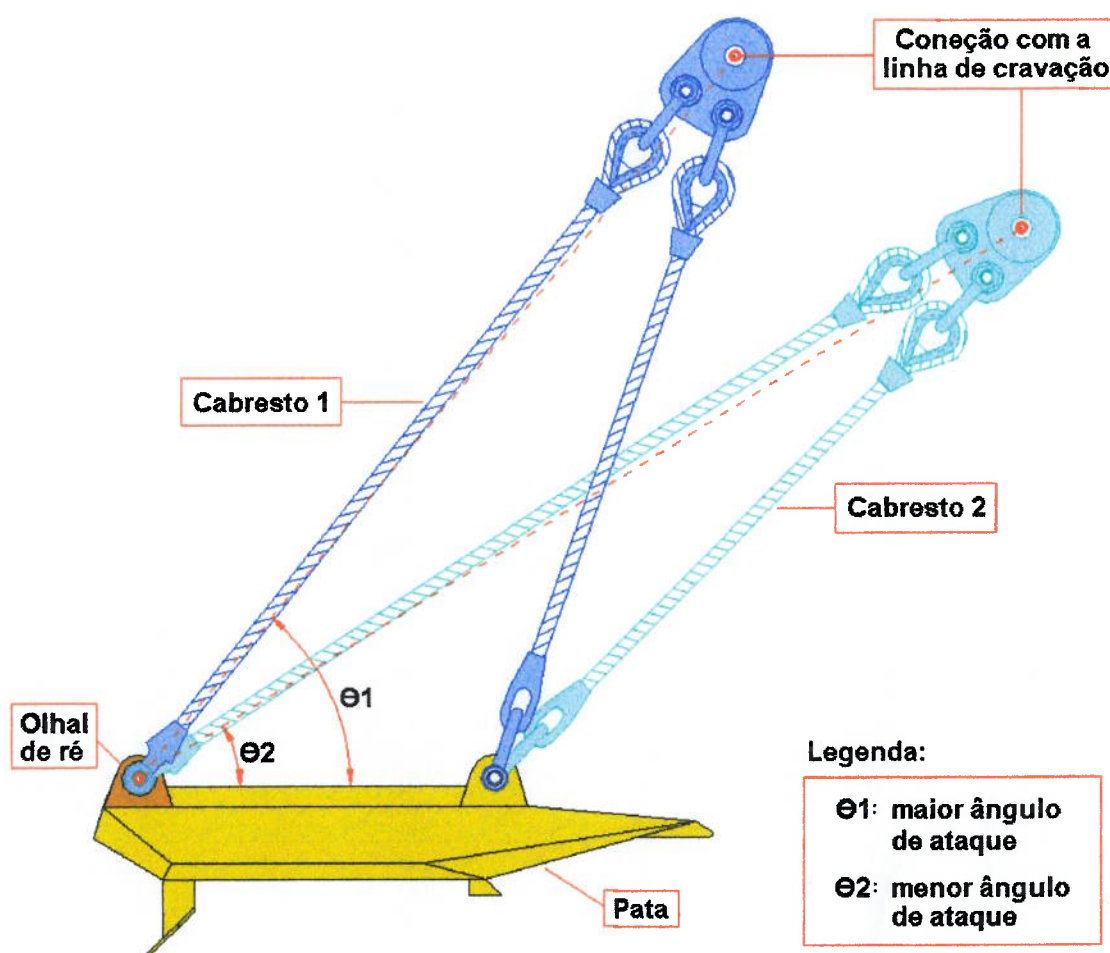


FIGURA 1.14 - Ângulos de ataque da âncora CENO-ROF.

### 1.4.2 Linha de Cravação

A linha de cravação é composta por todo e qualquer elemento que faça a ligação entre o rebocador e a âncora. Com a exploração de petróleo se dirigindo para águas cada vez mais profundas, é comum o emprego de linhas de cravação com mais de 1000 metros de comprimento.

Durante a fase de cravação, a ser vista mais detalhadamente no próximo item, é fundamental que o ângulo que a linha de cravação forma com a superfície do leito marinho não exceda 8 graus. Quanto maior for este ângulo, tanto menor será a componente horizontal do esforço transmitido à âncora, e tanto maior a componente vertical. Assim, é fundamental a minimização deste ângulo. De modo a atingir esta meta, é comum o emprego de linhas de cravação compostas por vários trechos, conforme mostrado na FIGURA 1.15.

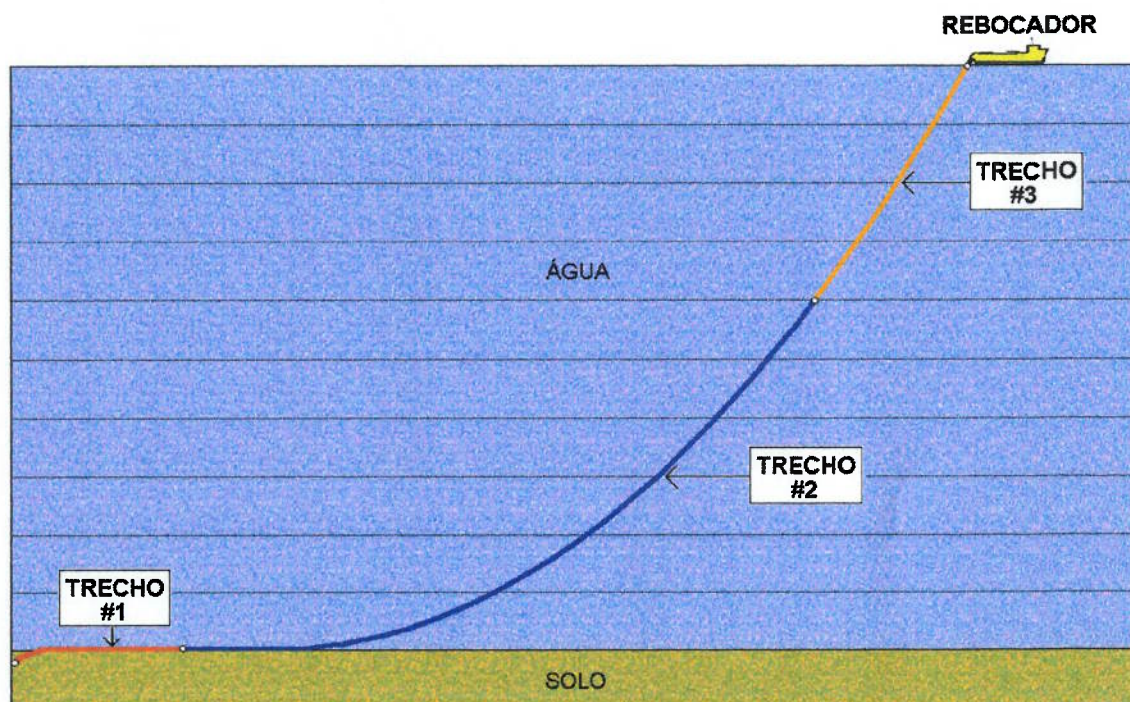


FIGURA 1.15 - Trechos de uma linha de cravação.

O primeiro trecho - FIGURA 1.15 – TRECHO #1 -, conectado à âncora, é conhecido popularmente como fore-runner. Geralmente composto por cabos de aço, este trecho irá cortar o solo durante a cravação. Quanto menor for seu diâmetro externo, tanto menor serão os esforços de resistência impostos pelo solo como reação à sua penetração.

O segundo trecho - FIGURA 1.15 – TRECHO #2 -, conectado ao fore-runner, é a linha de peso. É este trecho o responsável diretamente pela minimização do ângulo que a linha de cravação forma com a superfície do leito marinho, graças ao seu elevado peso por unidade de comprimento de linha. Por essa razão, este trecho é composto por amarras.

O terceiro trecho - FIGURA 1.15 – TRECHO #3 -, popularmente conhecido como working-wire, tem a função de conectar a linha de peso ao rebocador. Composto geralmente por cabo de aço, seu comprimento depende fundamentalmente da lâmina d'água. Seu emprego pode ser suprimido para lâminas d'água pouco profundas.

## 1.5 Procedimentos de Instalação de uma VLA

A instalação de uma VLA - esquematizada na FIGURA 1.16 - é uma tarefa de difícil realização, sendo comum o emprego de mais de uma embarcação para a realização desta árdua tarefa. A quantidade mínima de embarcações para realizar a instalação de uma VLA é de, no mínimo, duas. Uma para realizar o tracionamento da linha de cravação, e outra para a monitoração, através de um ROV, da cravação, conforme mostram as imagens da FIGURA 1.16.

O início da operação de instalação de uma VLA se dá quando a âncora é lançada ao mar - FIGURA 1.16 (a). Neste instante, o ROV - ilustrado na FIGURA 1.17 - se dirige até a âncora, de modo a realizar uma breve vistoria, e assegurar que a âncora está apta para ser lançada no alvo de cravação sobre o leito marinho - FIGURA 1.16 (b). Quando sobre o alvo de lançamento, o ROV novamente se dirige até à âncora, retira suas coordenadas, verifica sua orientação e a informa ao rebocador, de modo que este realize sua movimentação na mesma direção na qual a âncora se encontra orientada. Caso a orientação da âncora esteja fora do alinhamento previsto pelo procedimento cravação, a âncora deve ser lançada novamente sobre o alvo até que se consiga um alinhamento aceitável.

Uma vez posicionada e orientada corretamente sobre o alvo de lançamento, âncora permanece em repouso, pousada sobre o solo - FIGURA 1.16 (b) "DETALHE ÂNCORA" - até que o rebocador se posicione para dar início ao processo de cravação, se movimentando ao mesmo tempo em que libera linha de cravação, de modo a evitar qualquer movimentação na âncora.....

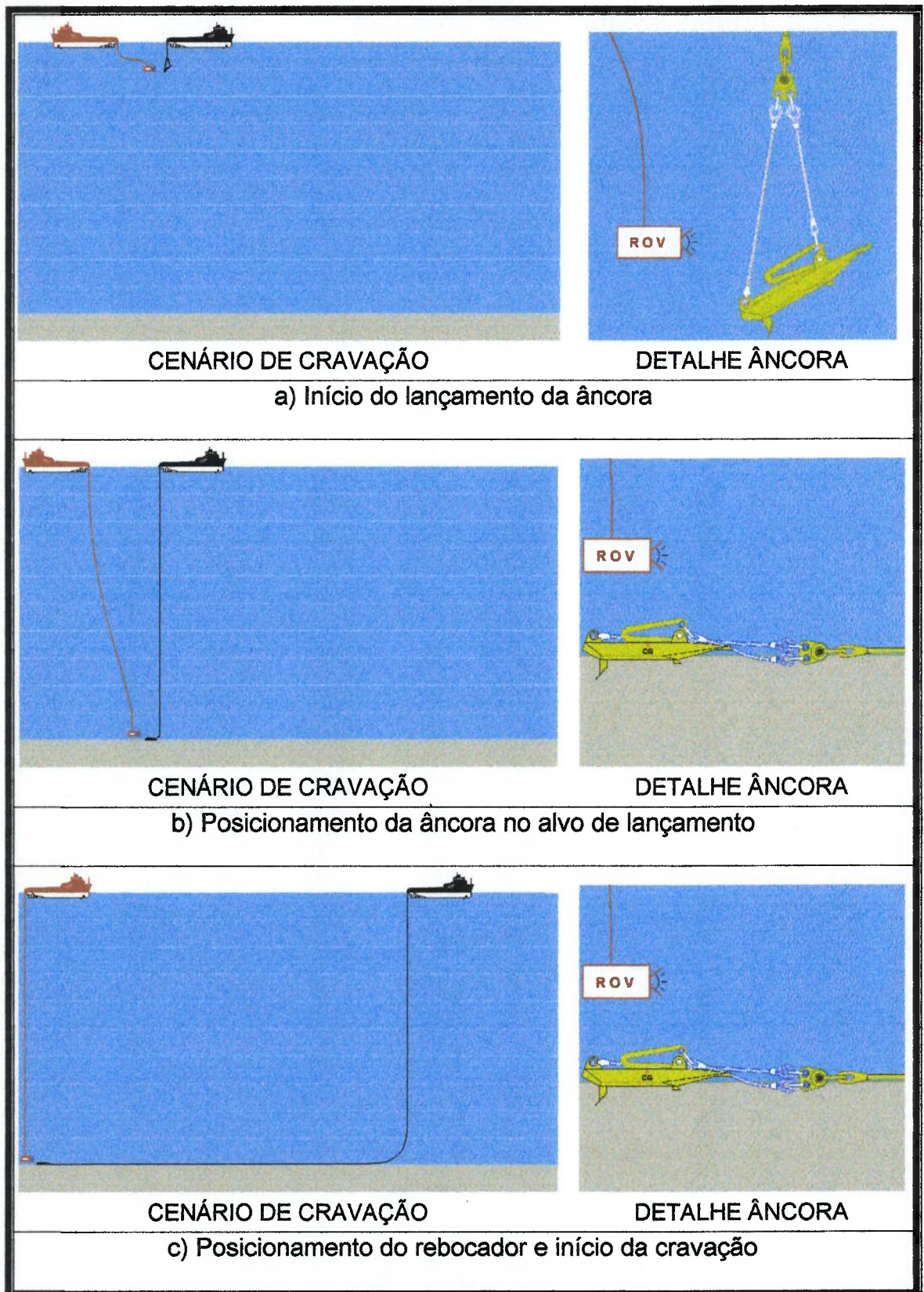


FIGURA 1.16 - Etapas de instalação de VLA.

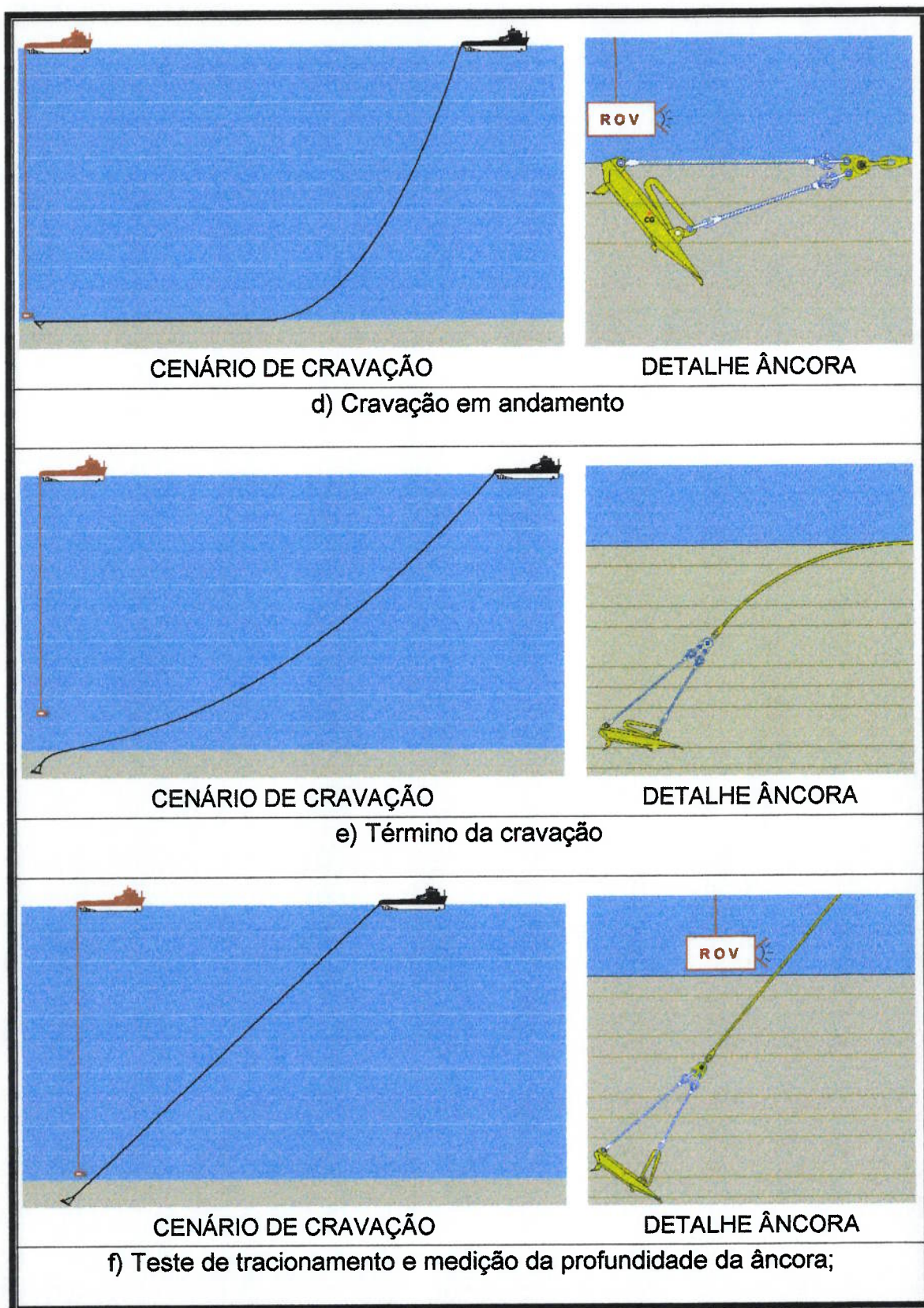


FIGURA 1.16 - Etapas de instalação de uma VLA.



Uma vez posicionado, o rebocador dará então, início ao processo de cravação - FIGURA 1.16 (c) - movimentando-se lentamente a velocidade constante (por volta de 0,8 nós), mas desta vez com o guincho travado, sem liberação da linha de cravação. Durante toda a evolução da cravação - FIGURA 1.16 (d) - o comprimento da linha de cravação permanece inalterado, enquanto o rebocador se movimenta em linha reta e sempre a velocidade constante. A força de tração que a embarcação impõe à linha de cravação é controlada pelo seu próprio sistema computacional, que aumenta ou diminui o esforço propulsor do rebocador, de modo a sempre manter sua velocidade de movimentação constante.

Enquanto o rebocador se movimenta, tracionando a linha de cravação, a âncora vai penetrando no solo marinho. Quanto maior for a profundidade em que se encontra a âncora, tanto maior será a resistência do solo à sua penetração - conforme visto no item 1.3.2 -, e portanto, tanto maior será também o esforço que o rebocador precisará impor à linha de cravação. Porém, irá existir uma profundidade na qual a força implementada pelo rebocador não irá conseguir superar os esforços de resistência impostos pelo solo mobilizado à penetração da âncora. Neste instante, o sistema composto pelo rebocador, a linha de cravação e a âncora entram num equilíbrio de forças, e a cravação chega ao seu término - FIGURA 1.16 (e).

Apesar de atingido o término da cravação, a operação de instalação ainda não chegou ao fim, pois ainda é necessário realizar a medição da profundidade atingida pela âncora, bem como acionar o mecanismo que altera seu modo de cravação para o modo de operação. O acionamento do mecanismo é realizado tracionando-se a linha de cravação a um determinado

ângulo de inclinação com o leito marinho, ângulo este específico para cada modelo de âncora. Acionado o mecanismo, é realizada a medição da profundidade da âncora - FIGURA 1.16 (f) -, com o auxílio do ROV. Diversas são as maneiras de se medir a profundidade. Todas elas se baseiam na determinação da inclinação da linha de cravação no espaço tridimensional. Conhecido esta inclinação e o comprimento de cabo dentro do solo, (determinado através de graduações na linha de cravação), chega-se facilmente à profundidade atingida pela âncora. O seu caminho solo adentro continua porém, uma incógnita.

Apesar da operação de instalação de uma VLA ser uma tarefa um tanto quanto demorada, facilmente ultrapassando 8 horas de duração, quando tudo saí conforme o programado, o tempo reservado à cravação em si, dificilmente ultrapassa 1 hora de duração, deste o instante que a âncora inicia a penetração no solo - FIGURA 1.16 (c) - até o instante que a mesma interrompe sua movimentação - FIGURA 1.16 (e) -, instante esse, no qual o esforços de resistência impostos pelo solo mobilizado a penetração da âncora superam os empreendidos pelo rebocador, entrando o sistema composto pela âncora, linha de cravação e rebocador em equilíbrio estático, conforme citado anteriormente.

A instalação das 16 VLAs do sistema de ancoragem da plataforma PETROBRAS-36, por exemplo, realizada no campo petrolífero de RONCADOR, bacia de campos, necessitou de 4 rebocadores, que, operando numa lâmina d'água de 1200m, trabalharam ininterruptamente, durante praticamente dois meses, dia e noite, até o término da operação. Como se tratavam de âncoras de 13m<sup>2</sup> de área projetada - já ilustradas neste trabalho na FIGURA 1.13 -, foram necessários a utilização de dois rebocadores que,

conectados entre si, aplicavam ao término da etapa de cravação um total de 400 toneladas de força horizontal, cravando cada uma das 16 âncoras a uma profundidade média situada entre 30 e 40 metros solo adentro. A terceira embarcação, equipada com ROV, fazia a monitoração da operação, enquanto a quarta segurava a linha de ancoragem.

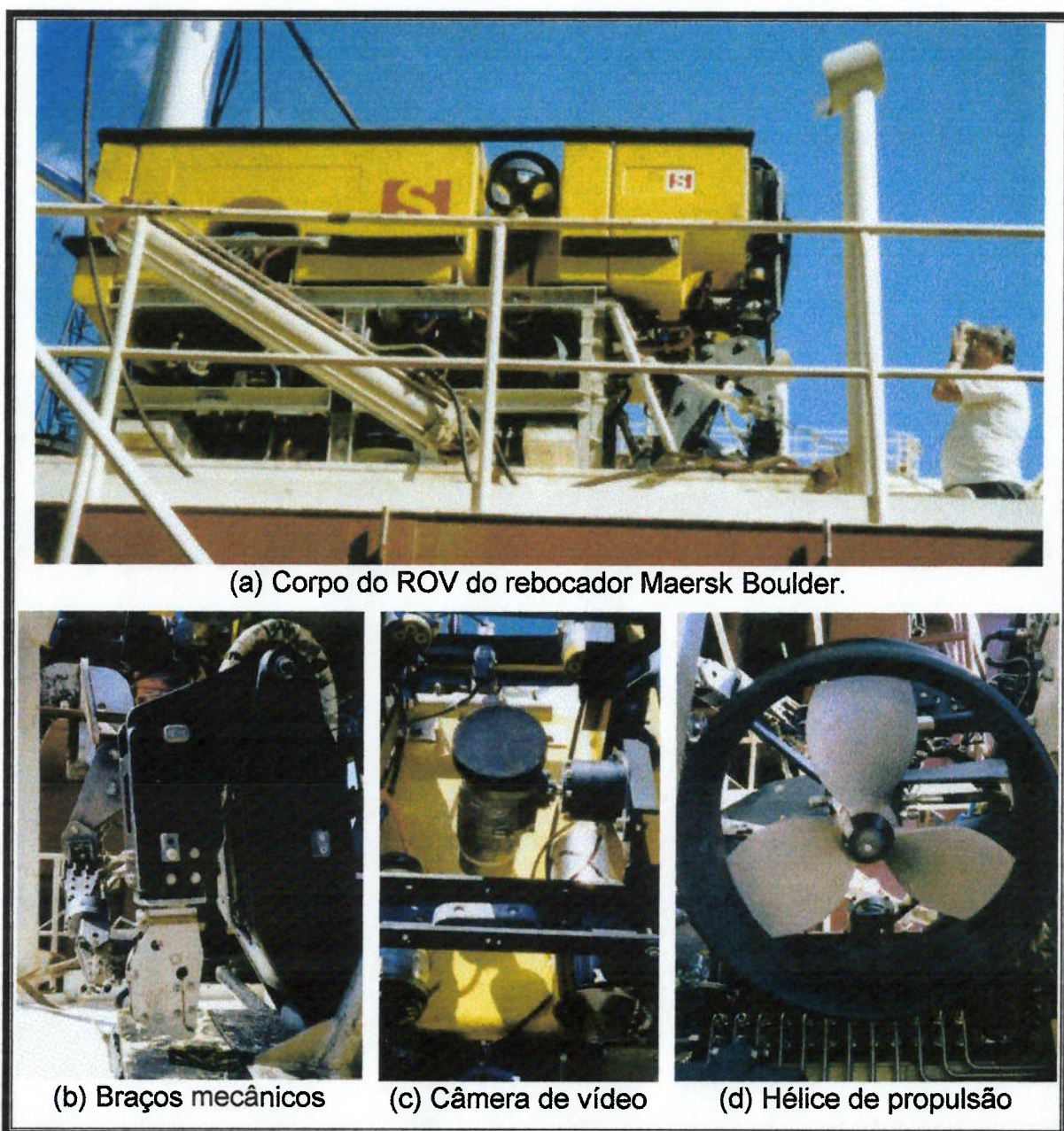


FIGURA 1.17 - ROV ("Remoted Operated Vehicle").

## 1.6 Escopo

**CAPÍTULO 1:** Apresentação do problema, das justificativas e dos objetivos da pesquisa, dos aspectos relevantes ao entendimento do problema, no que tange a caracterização dos solos, das âncoras e de seu procedimento de instalação.

**CAPÍTULO 2:** Descrição das simulações numéricas desenvolvidas em computador, passando antes por uma breve descrição da formulação matemática do modelo numérico-computacional. As simulações, organizadas em séries, se propõem a investigar a influência de um conjunto de parâmetros na cravação. As séries de simulações S1, S2, S3 e S4 foram desenvolvidas com a âncora CENO-ROF<sup>[12]</sup>. Para as séries S1 e S2 são variados parâmetros associados a âncora. Para a série S3 são variados parâmetros associados a linha de cravação. A série S4 investiga o comportamento desta âncora em diferentes tipos de solo. Por fim, a série S5, desenvolvida com as âncoras DENLA MK3<sup>[11]</sup> e STEVMANTA<sup>[8]</sup>, visa retratar no computador o ambiente dos testes realizados em mar pela PETROBRAS<sup>[1]</sup>, com estas mesmas âncoras. Após suas especificações, as séries têm seus resultados apresentados ao final do capítulo.

**CAPÍTULO 3:** Descrição dos experimentos desenvolvidos no tanque de prova do CENO-USP, com os modelos em escala 1:20 das âncoras CENO-ROF<sup>[12]</sup> e STEVMANTA<sup>[8]</sup>. De maneira análoga ao capítulo anterior, os experimentos estão organizados em séries. A série E1 se propõe a investigar a influência do ângulo de ataque do modelo experimental da âncora CENO-ROF<sup>[12]</sup>, enquanto que a série E2 investiga a influência do apêndice de ré desta mesma âncora. Por fim, a série E3, desenvolvida um modelo da âncora STEVMANTA<sup>[8]</sup>, tem o intuito de correlacionar os resultados obtidos em laboratório com os resultados apresentados em mar com esta mesma âncora, porém em escala real. Após suas especificações, as séries têm seus resultados apresentados ao final do capítulo.

**CAPÍTULO 4:** Apresentação dos resultados obtidos nos testes realizados em mar pela PETROBRAS<sup>[1]</sup>, com as âncoras DENLA MK3<sup>[11]</sup> e STEVMANTA<sup>[8]</sup>, ambas em escala real.

**CAPÍTULO 5:** Análise dos resultados apresentados.

**CAPÍTULO 6:** Apresentação das conclusões inferidas neste trabalho.

**CAPÍTULO 7:** Apresentação das referencias bibliográficas referenciadas nesta dissertação.

## **2 ANÁLISE NUMÉRICO-COMPUTACIONAL**

As simulações apresentadas neste capítulo foram realizadas no programa DIGIN<sup>[13]</sup>, de propriedade da PETROBRAS.

Resultado de uma pesquisa patrocinada por um grupo de empresas, dentre elas a PETROBRAS UK, STATOIL, SAGA PETROLEUM, SHELL, DNV, BRUCE ANCHOR, dentre outras, este programa, desenvolvido em linguagem FORTRAN 77, é destinado ao cálculo de esforços, trajetórias e configurações geométricas envolvidas na cravação e arrancamento das âncoras de placa (âncoras que tenha sua geometria definida basicamente através da composição de placas planas), dentre elas as âncoras de carregamento vertical (VLAs).

Antes de serem apresentadas as simulações, objetivo principal deste capítulo, será feito, primeiramente, uma breve descrição da formulação do modelo numérico-computacional do programa DIGIN.

### **2.1 Formulação do Modelo Numérico-Computacional**

Será apresentado neste item a metodologia de cálculo empregada pelo programa, bem como a formulação matemática do problema, definindo-se os esforços atuantes na cravação através de diagramas de corpo livre.

#### **2.1.1 Formulação Matemática do Programa**

##### *2.1.1.1 Trecho da Linha de Cravação em Contato com a Água*

São aqui apresentados, para o trecho da linha de cravação que vai desde o rebocador até o ponto no qual esta mesma linha toca o leito marinho, a

configuração geométrica e esforços atuantes, conforme esquematizado na FIGURA 2.1, segundo a formulação do programa DIGIN.

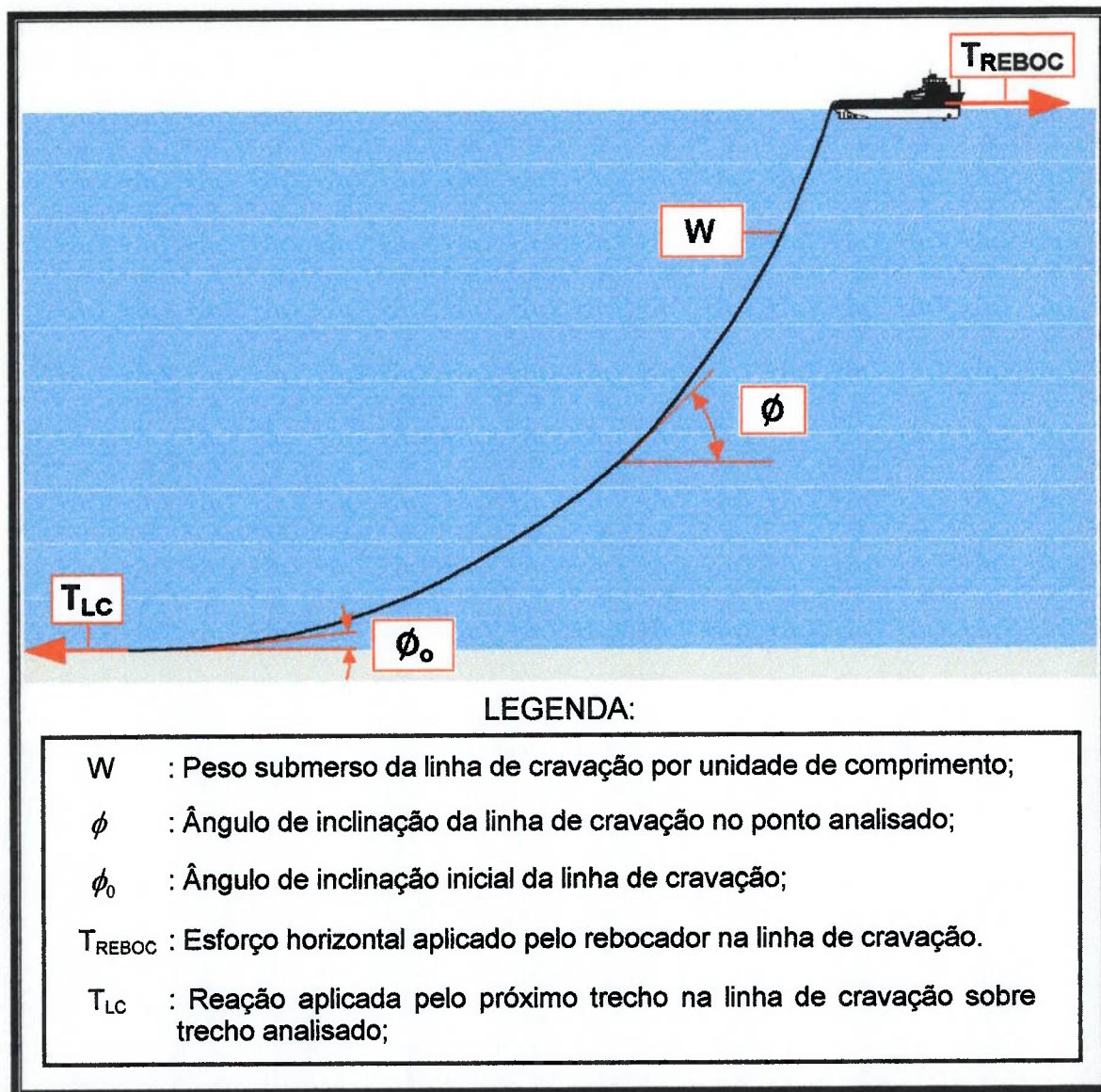


FIGURA 2.1 - Diagrama dos esforços atuantes no trecho suspenso da linha de cravação.

De acordo com o procedimento de cálculo desenvolvido por R.J. Taylor<sup>1</sup>, através do equilíbrio de forças para um segmento de comprimento "S", ficam

<sup>1</sup> R. J., Taylor e H. J. Lee, "Direct embedment anchor holding capacity", NCEL TN-1245, 1972 citado em: DET NORSKE VERITAS, "Report no. 96-3637", DIGIN ver. 5.3. DNV, Hovik, 1998.

definidas as coordenadas da cada ponto analisado no trecho suspenso da linha de cravação, conforme representadas na FIGURA 2.1, pelas seguintes equações:

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \tan(\phi_0) + \frac{S \cdot W}{T_{REBOC}} \right\} \quad (2)$$

$$\Delta Z = \frac{T_{REBOC}}{W} (\sec(\phi) - \sec(\phi_0)) \quad (3)$$

$$\Delta X = \frac{T_{REBOC}}{W} \ln \left( \frac{\tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})}{\tan(45^\circ + \frac{\phi_0}{2})} \right) \quad (4)$$

Onde:  $W$  : Peso submerso da linha de cravação por unidade de comprimento;

$\phi$  : Ângulo de inclinação da linha de cravação no elemento de linha analisado;

$\phi_0$  : Ângulo de inclinação inicial da linha de cravação;

$S$  : Comprimento do elemento de linha;

$\Delta X$  : Projeção horizontal do elemento de linha;

$\Delta Z$  : Projeção vertical do elemento de linha;

$T_{REBOC}$ : Esforço horizontal aplicado pelo rebocador na linha de cravação.

#### 2.1.1.2 Trecho da Linha de Cravação em Contato com o Solo

São aqui descritos os esforços atuantes no trecho da linha de cravação em contato com o solo, durante a cravação, conforme esquematizado na FIGURA 2.2, segundo a formulação do programa DIGIN.



A configuração geométrica deste trecho da linha de cravação, fruto do equilíbrio de forças resultante de sua interação com o solo, é fundamental na compreensão do processo de cravação, uma vez que dela depende a intensidade e a orientação do esforço que chega à âncora<sup>[14]</sup>.

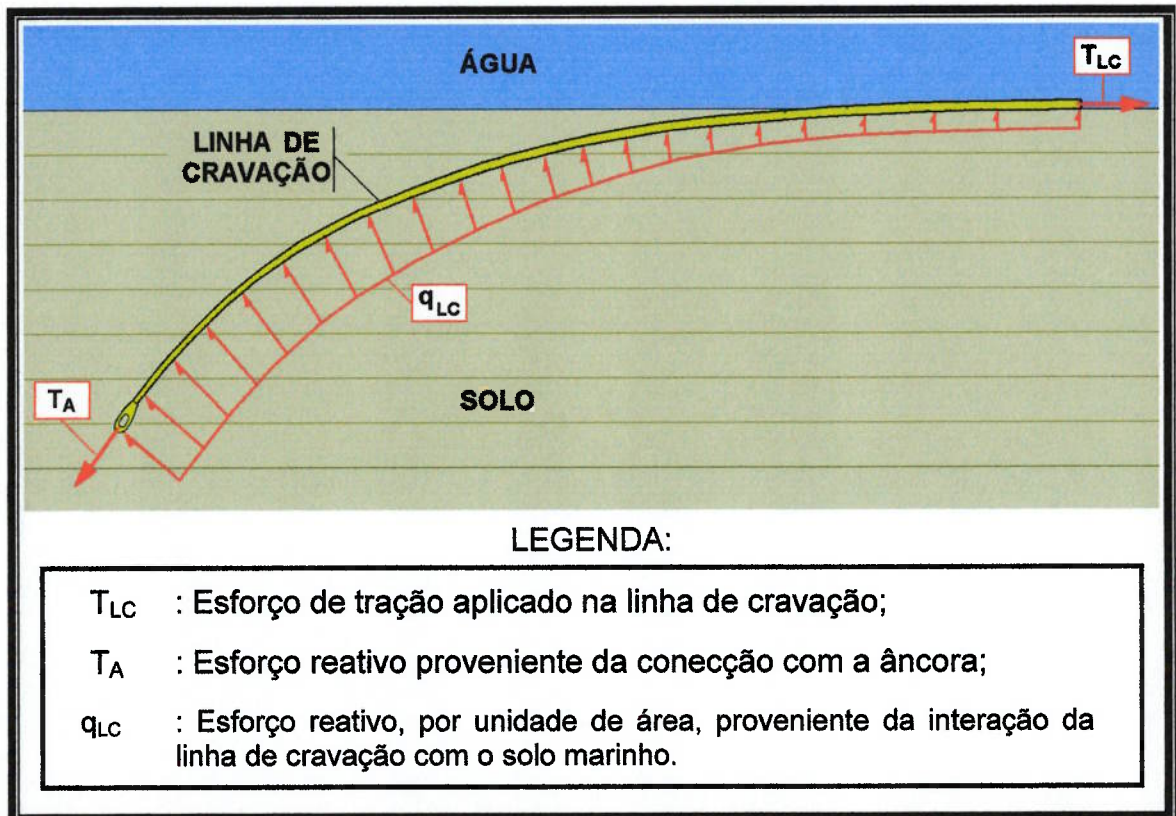


FIGURA 2.2 - Diagrama dos esforços atuantes no fore-runner da linha de cravação.

É importante lembrar que, como condição fundamental do êxito na instalação de uma VLA e necessidade a ser satisfeita no procedimento de cravação, o ângulo que a linha de cravação forma ao tocar a superfície do leito marinho tem valor nulo durante a maior parte da cravação, podendo atingir ao término desta, um valor não superior a 8 graus. Devido a esta razão, o esforço de tração presente na linha de cravação sobre o leito marinho, representado

por “ $T_{LC}$ ” na FIGURA 2.2, é paralelo à superfície, durante a quase totalidade do tempo da operação de cravação.

Para o trecho de linha de cravação que desliza sobre o leito marinho, composto geralmente por parte do fore-runner e parte pela linha de peso, na interface entre o solo e a água, a perda de tensão para um comprimento de linha “ $\Delta L$ ” é dada, segundo a referência [13], pela seguinte relação:

$$\Delta T_{LC} = \mu_{SOLO} \cdot W \cdot \Delta L \quad (5)$$

Onde:  $\mu_{SOLO}$  : coeficiente de atrito do solo;

$W$  : Peso submerso da linha por unidade de comprimento;

$\Delta L$  : comprimento da linha de cravação sobre o leito marinho.

O trecho do fore-runner dentro do solo apresenta uma geometria em forma de catenária invertida. Conforme a linha de cravação corta o solo, este oferece uma resistência à sua penetração. Essa resistência aumenta progressivamente com a profundidade, e está representada na figura por “ $q_{LC}$ ”. Este aumento progressivo está intimamente ligado ao fenômeno de adensamento ao qual estão sujeitos os solos argilosos marinhos, (item 2.3.2 deste trabalho), além da ocorrência de fenômenos de superfície, representados pela variação do fator de capacidade de contato com a profundidade. O cálculo de “ $q_{LC}$ ” é dado, segundo a referência [13], pela seguinte relação:

$$q_{LC}[z] = N_c[z] \cdot Su[z] \quad (6)$$

Onde:  $z$  : profundidade;

$N_c$  : fator de capacidade de contato;

$Su$  : resistência ao cisalhamento não drenada.

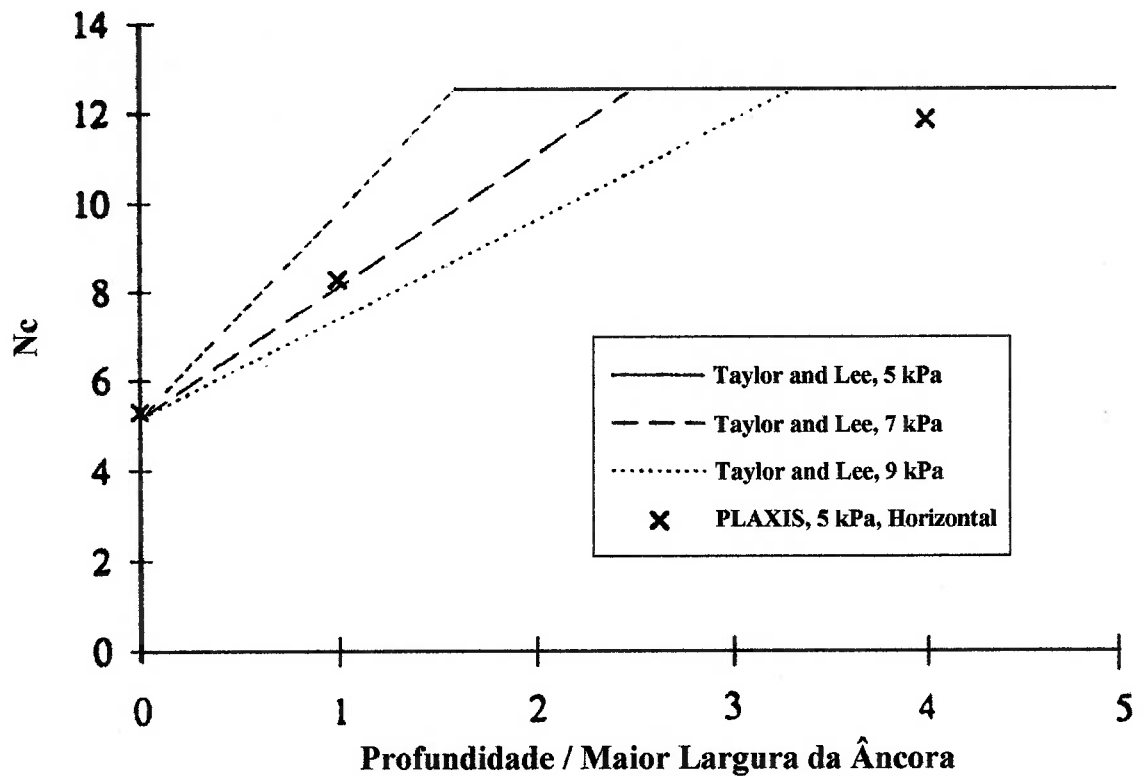


FIGURA 2.3 - Influência dos fenômenos de superfície no fator de capacidade de contato ( $N_c$ ).<sup>[13]</sup>

Segundo Taylor e Lee<sup>2</sup>, o fator de capacidade de carga aumenta progressivamente até uma determinada profundidade, profundidade esta, fundamentalmente dependente da maior largura da âncora, conforme mostra a FIGURA 2.3. Nela,  $N_c$  atinge seu valor máximo quando a relação entre a profundidade e a máxima largura da âncora atinge o valor 2,5. Acima deste valor,  $N_c$  permanece constante.

<sup>2</sup> R. J., Taylor e H. J. Lee, "Direct embedment anchor holding capacity", NCEL TN-1245, 1972 citado em: DET NORSKE VERITAS, "Report no. 96-3637", DIGIN ver. 5.3. DNV, Hovik, 1998.

O atrito unitário para o trecho de linha de cravação dentro do solo pode ser calculado, segundo a referência [13], pela relação:

$$F[z] = \alpha_{\text{solo}} \cdot Su[z] \quad (7)$$

Onde:  $\alpha_{\text{solo}}$  : fator de adesão do solo;

A perda de tensão, para um elemento do trecho da linha de cravação dentro do solo, pode ser calculado, segundo a referência [13], pela relação:

$$\frac{\partial T}{\partial s} = -f_{at} \cdot d - w \cdot \text{sen}(\phi) \quad (8)$$

Onde:  $\phi$  : Orientação do elemento da linha de cravação ( $\theta=0$  para um elemento horizontal);

$w$  : peso submerso da linha de cravação por unidade de comprimento;

$f_{at}$  : coeficiente de atrito unitário;

$d$  : superfície de contato efetiva da linha de cravação com o solo;

$\partial s$  : comprimento do elemento da linha de cravação.

Através do conhecimento de  $T_{LC}$  e da relação acima, determina-se  $T_A$ .

O incremento angular, de um elemento de linha de cravação para o elemento consecutivo, é calculado interativamente, segundo a referência [13], pela relação:

$$\frac{\partial \phi}{\partial s} = \frac{-q_{LC} \cdot B - w \cdot \cos(\phi)}{T_{LC}} \quad (9)$$

Onde:  $T_{LC}$  : Esforço de tração aplicado na linha de cravação;

$B$  : área efetiva de contato da linha de ancoragem;

### 2.1.1.3 Âncora

São aqui descritos os esforços atuantes na âncora durante a cravação, conforme esquematizado na FIGURA 2.4, segundo a formulação do programa DIGIN.

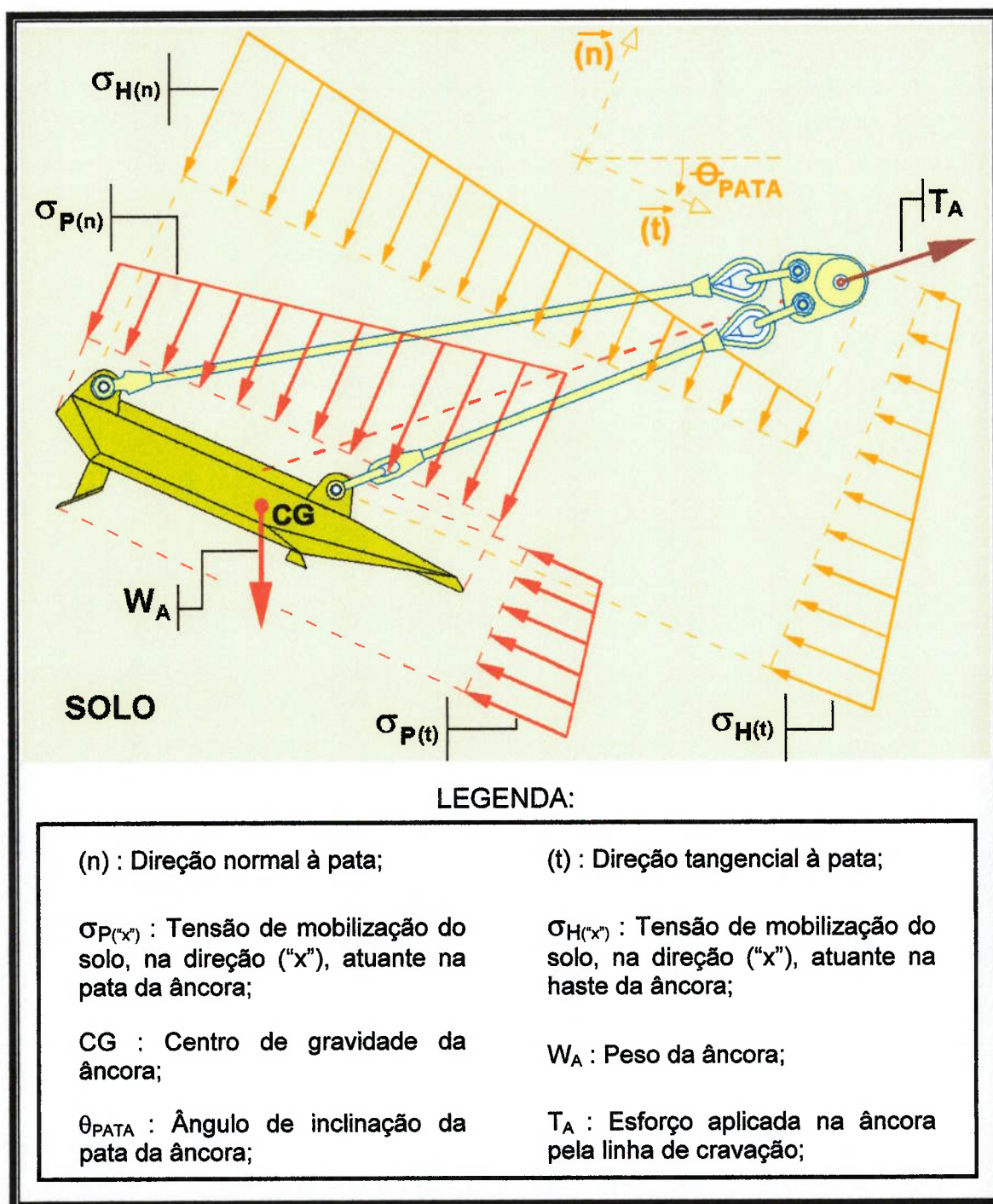


FIGURA 2.4 - Diagrama dos esforços atuantes na âncora

A tensão de mobilização do solo pode ser calculada, segundo a referência [13], pela seguinte expressão:

$$\sigma[z] = f \cdot Nc[z] \cdot Su[z] \quad (10)$$

Onde:  $f$  : Grau de mobilização do solo;

A parcela do esforço resultante “ $\partial R$ ”, aplicado em um elemento de área “ $\partial A$ ” da âncora em contato com o solo, fica definida como:

$$\partial R = \sigma[z] \cdot \partial A \quad (11)$$

Onde:  $\partial A$  : Elemento infinitesimal de área da âncora;

O esforço resultante “ $R$ ” pode então ser calculado então integrando-se a relação (11):

$$R = \int_{\text{ÁREA}} \sigma[z] \cdot \partial A \quad (12)$$

Conforme nos mostra a FIGURA 2.4, os esforços que o solo aplica na âncora podem ser separados em duas classes: os esforços aplicados na pata da âncora, e os esforços aplicados na haste da âncora. Cada um destes esforços, por sua vez, pode ser dividido em duas componentes: uma componente tangencial, e outra componente normal à pata da âncora.

Utilizando-se da formulação apresentada acima, podemos então calcular, para cada uma das direções, os esforços resultantes - FIGURA 2.5 - que o solo aplica na pata e na haste da âncora, da seguinte maneira:

$$R_{P(t)} = \int_{\text{ÁREA}} f \cdot Nc[z] \cdot Su[z] \cdot \partial A_{P(t)} \quad (13)$$

$$R_{H(t)} = \int_{\text{ÁREA}} f \cdot Nc[z] \cdot Su[z] \cdot \partial A_{H(t)} \quad (14)$$

$$R_{P(n)} = \int_{\text{ÁREA}} f \cdot Nc[z] \cdot Su[z] \cdot \partial A_{P(n)} \quad (15)$$

$$R_{H(n)} = \int_{\text{ÁREA}} f \cdot Nc[z] \cdot Su[z] \cdot \partial A_{H(n)} \quad (16)$$

Onde:  $\partial A_{P(t)}$  : Elemento de área, na direção tangencial, da pata da âncora;

$\partial A_{H(t)}$  : Elemento de área, na direção tangencial, da haste da âncora;

$\partial A_{P(n)}$  : Elemento de área, na direção normal, da pata da âncora;

$\partial A_{H(n)}$  : Elemento de área, na direção normal, da haste da âncora;

Estes esforços são aplicados nos centros de pressão da superfície através da qual foram integrados. O centro de pressão é portanto o lugar geométrico no qual os esforços resultantes, frutos das integrais acima, geram momento nulo (obviamente com relação ao próprio centro de pressão).

Na FIGURA 2.5, a estrutura da âncora foi dividida em dois blocos: pata e haste. Em cada uma delas os esforços resultantes, nas direções tangencial e normal, são aplicados em seus respectivos centros de pressão. O centro de gravidade da âncora depende da distribuição da massa da âncora, enquanto que o centro de pressão depende do perfil de resistência ao cisalhamento do solo e da geometria da âncora.

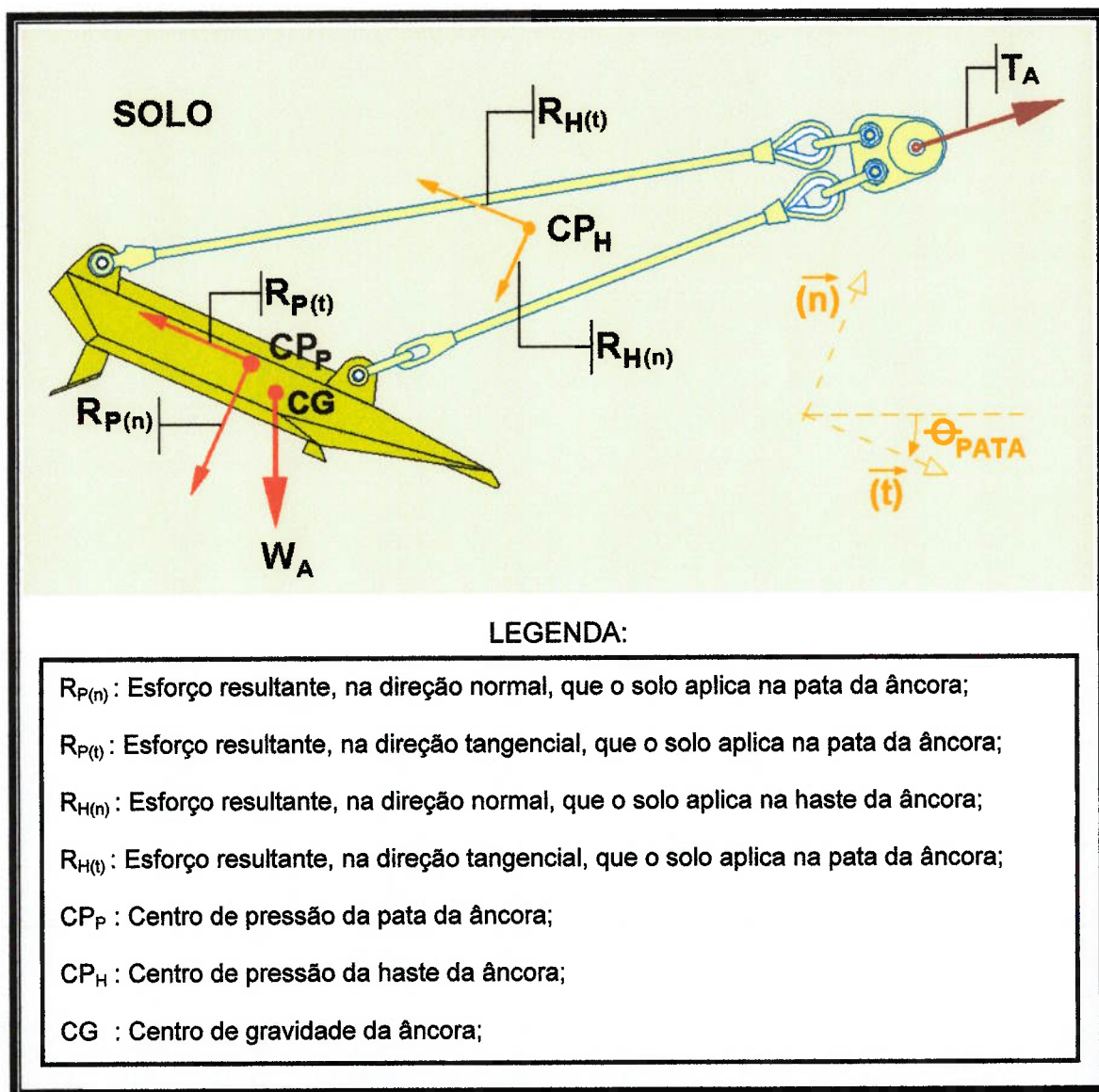


FIGURA 2.5 - Diagrama dos esforços resultantes aplicados na âncora.

### 2.1.2 Metodologia de Cálculo do Programa

O programa DIGIN realiza a penetração da âncora no solo passo a passo, no plano vertical-longitudinal, onde o equilíbrio em cada profundidade de penetração é calculado independentemente da profundidade penetrada no passo anterior. A trajetória bidimensional da âncora é então construída fundamentada na orientação que esta assume a cada passo calculado.



Para isto, o programa calcula, primeiramente, a configuração geométrica da linha de cravação, do rebocador até a âncora, de maneira a determinar a direção e o sentido da força que nela será aplicada.

Encontrada a direção e o valor do esforço que a linha de cravação aplicada na âncora (TA), o programa analisa, através de um laço, uma série de possíveis orientações que a âncora pode assumir na profundidade analisada. Para cada uma destas orientações, é verificado o equilíbrio de forças e momentos no ponto de conexão da âncora com a linha de cravação.

A determinação dos esforços atuantes na âncora é conseguida graças a divisão da âncora em membros, sendo cada membro uma entidade essencialmente plana. Em cada membro (vide definição no item 2.2.1 deste trabalho), as tensões resultantes fruto da interação entre o solo e a estrutura da âncora são integradas na área delimitada pelo membro, resultando em forças. O equilíbrio de forças e momentos, na conexão da âncora com a linha de cravação é então procurado, e quando encontrado, determina a orientação que a âncora irá assumir na profundidade investigada pelo programa.

A somatória de momentos deve ser nula na conexão, uma vez que se trata de uma articulação. Com relação aos esforços, o esforço que linha de cravação aplica na âncora deve ter valor igual ao esforço que a âncora aplica na linha de cravação, porém com sentidos opostos. A formulação matemática para o cálculo dos esforços envolvidos já foi apresentada no item 2.1.1.

Assim, conforme mencionado, caso satisfeita a condição de equilíbrio, o programa assume então como encontrada a orientação da âncora para o profundidade analisada, e passa a análise da profundidade seguinte, repetindo-se o mesmo procedimento.

A análise do equilíbrio interno da âncora pode ser realizada de duas diferentes maneiras. Na primeira maneira, o programa assume que a direção de penetração da âncora é independente da orientação de sua pata (método de penetração da pata no modo com falha - item 2.1.2.1), enquanto que na segunda maneira a direção de penetração da âncora é imposta como sendo a direção de orientação da pata (método de penetração da pata no modo com restrições - item 2.1.2.2). Simulações preliminares realizadas revelaram que, para as âncoras de 10m<sup>2</sup> cravadas em solos com resistências ao cisalhamento entre 5 e 100 kPa, seja a solução calculada de uma ou outra maneira, as trajetórias divergem com erros inferiores a 1%.

Ou seja, a direção de penetração da âncora coincide, de uma maneira ou outra, com a direção de orientação da pata da mesma, fato este já constatado experimentalmente por NEUBECKER & RANDOLPH<sup>[14]</sup>.

#### *2.1.2.1 Método de Penetração da Pata no Modo com Falha*

Caso seja estipulado ao **DIGIN** que o método de penetração da âncora no solo deverá ser dado pelo modo de falha, o programa permite que a direção de penetração da âncora seja diferente do ângulo de orientação de sua pata.

Para este caso, são desconhecidos a direção de penetração da âncora, o ângulo de orientação de sua pata e o esforço que a linha de cravação nela aplica.<sup>[13]</sup>

Para uma determinada profundidade da âncora, é variado o esforço que o rebocador aplica na linha de cravação ( $T_{REBOC}$ ). Após encontrado a configuração geométrica da linha de cravação, determina-se a magnitude e a direção do esforço que a linha de cravação aplica na âncora ( $T_A$ ). Para cada

Valor de  $T_A$ , a âncora é rotacionada em torno de sua conexão com a linha de cravação. Para cada ângulo de orientação da âncora, é resolvido o equilíbrio de forças e momentos - FIGURA 2.6 - em torno da articulação (ponto de conexão com a linha de cravação).

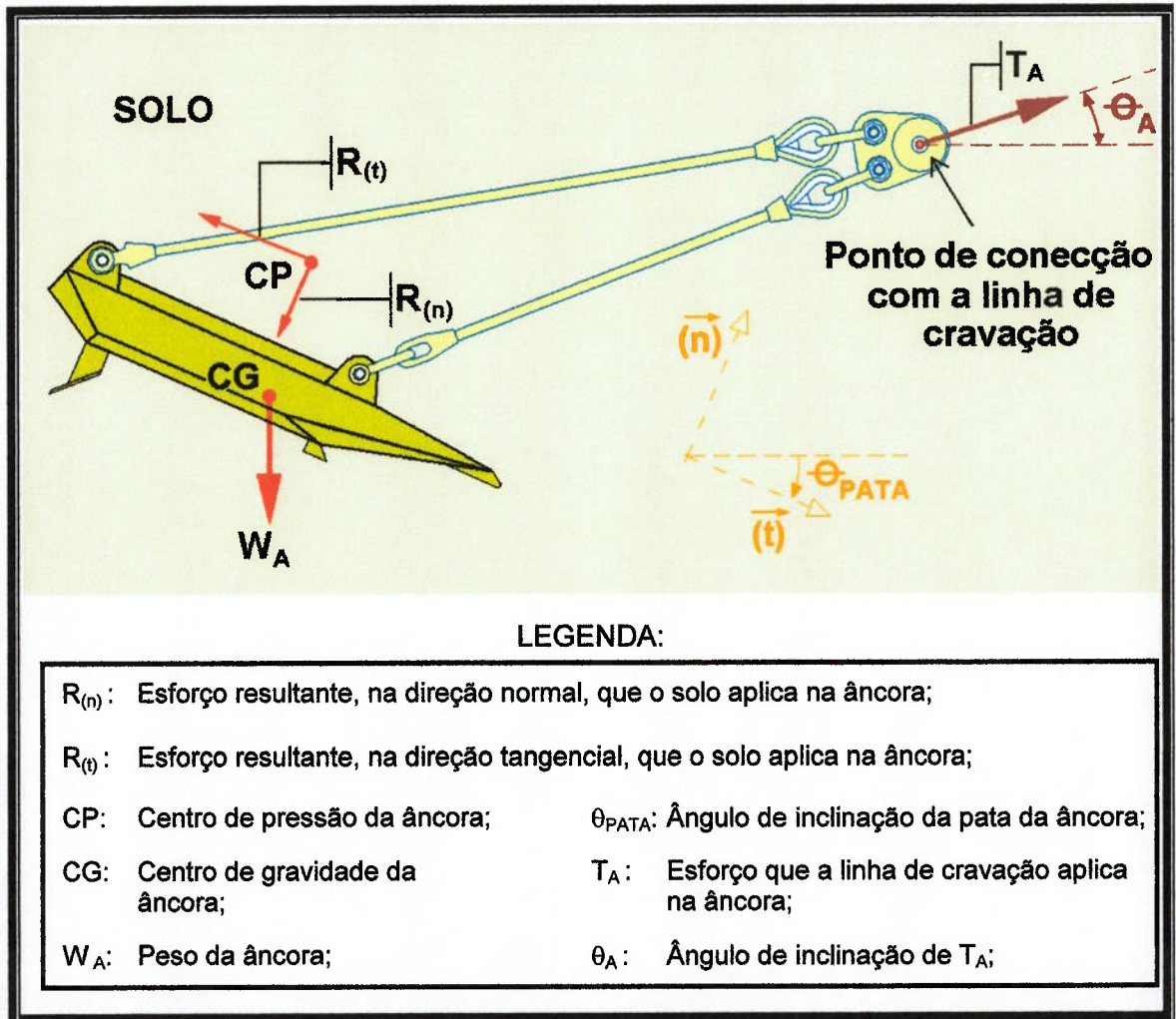


FIGURA 2.6 - Diagrama dos esforços resultantes aplicados na âncora.

Assim, a condição de equilíbrio no ponto de conexão da linha de cravação com a âncora (uma articulação) impõe que:

- A somatória de esforços na direção horizontal deve ser igual a zero:

$$R(n) \cdot \text{sen}(\theta_{PATA}) + R(t) \cdot \text{cos}(\theta_{PATA}) + T_A \cdot \text{cos}(\theta_A) = 0 \quad (17)$$

- A somatória de esforços na direção vertical deve ser igual a zero:

$$R(n) \cdot \cos(\theta_{PATA}) + R(t) \cdot \sin(\theta_{PATA}) + TA \cdot \sin(\theta_A) = 0 \quad (18)$$

- A somatória de momentos deve ser nula:

$$[R(n) + R(t)] \cdot L_{CP} + W_A \cdot L_{WA} = 0 \quad (19)$$

Onde:

$L_{CP}$ : Braço de aplicação do esforço resultante  $[R(n) + R(t)]$  em relação ao ponto de conexão com a linha de cravação;

$L_{WA}$ : Braço de aplicação da força peso  $W_A$  no ponto de conexão com a linha de cravação.

Quando forem satisfeitas as equações 17, 18 e 19, é encontrado uma solução para o problema. Caso nenhuma solução seja encontrada, o programa passa a procurá-la no modo com restrições.

#### 2.1.2.2 Método de Penetração da Pata no Modo com Restrições

Caso seja estipulado ao **DIGIN** que o método de penetração da âncora no solo deverá ser dado pelo modo restrito, o programa impõe que a direção de penetração da âncora é dada pelo ângulo de orientação de sua pata.

Neste caso, para uma determinada profundidade da âncora, é assumido que a âncora poderá penetrar somente na direção definida pela orientação de sua pata. O programa assume que o solo em contato com a âncora está em permanente estado de falha, e as máximas tensões de cisalhamento aí encontradas tem seus valores definidos pela resistência ao cisalhamento amolgada do solo na referida profundidade. Ou seja, pode-se calcular o valor de  $R_{P(t)}$  (vide FIGURA 2.5), conforme a formulação definida na

equação (13). Porém, em vez de se considerar a resistência ao cisalhamento não drenada do solo (conforme definido na fórmula), considera-se, desta vez, a resistência ao cisalhamento amolgada do solo.<sup>[13]</sup>

Fica então desconhecido pelo programa apenas a componente  $R_{P(t)}$  (vide FIGURA 2.5). O programa varia a força aplicada pelo rebocador até que a componente  $R_{P(n)}$  tenha direção normal a pata da âncora (equações 17 e 18). Satisfeita esta condição, o programa verifica então se a somatória de momentos no ponto de conexão com a linha de cravação é nula (equação 19). Satisfeitas estas condições, é encontrado pelo programa uma configuração de equilíbrio. Caso seja encontrada mais de uma configuração, o programa escolhe a que apresenta o menor esforço na linha de cravação.

## **2.2 Definição dos Modelos Computacionais Estudados**

### **2.2.1 Âncoras**

Neste item é apresentada a definição geométrica dos modelos computacionais das âncoras estudadas. Foram analisadas três modelos de âncoras de carregamento vertical (VLAs), todos com área projetada de pata de aproximadamente  $10\text{m}^2$ .

Os modelos de âncoras enfocados são:

- 1) Vryhof **STEV MANTA**;
- 2) Bruce **DENLA MK3**;
- 3) Petrobras **CENO-ROF**.

Os modelos **DENLA MK3** e **STEV MANTA**, por corresponderem a âncoras fabricadas e comercializadas mundialmente, já tinham suas geometrias definidas no banco de dados do programa **DIGIN**. O terceiro

modelo está em fase de desenvolvimento<sup>[12]</sup>, podendo se tornar a primeira VLA de fabricação nacional. Como ainda é um protótipo, sua geometria ainda não constava do banco de dados do programa e teve que ser completamente definida e construída.

A forma de âncora definida para o programa **DIGIN** é espacial e, de uma maneira simplificada, pode ser entendida como um arranjo de uma série de membros planos, cada um com sua respectiva espessura, definidos no espaço tridimensional. Cada membro é definido por um conjunto de nós e cada nó, com três coordenadas no espaço tridimensional, não possui liberdade alguma de movimentação em relação aos demais nós, ou seja, o modelo de âncora é perfeitamente rígido, de maneira que a distância de um nó até outro qualquer se mantém constante ao longo de toda a cravação, embora todo o conjunto de nós se desloque.

A FIGURA 2.7 mostra um membro da âncora definido no espaço tridimensional. Nota-se que todos os nós constituintes do membro, necessariamente plano, estão definidos nas fronteiras da figura. Ou seja, para se criar um membro, basta que sejam definidas as coordenadas em três dimensões, de cada um dos nós pertencentes à fronteira que o define. É importante, porém, lembrar que, apesar de estar definido no espaço tridimensional, os membros são figuras planas e, portanto, requerem que todos os seus nós pertençam ao plano que o define.

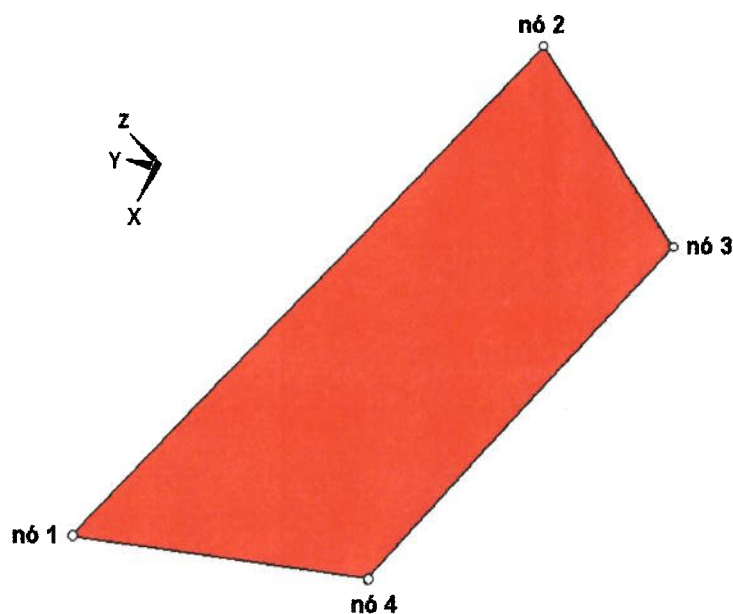


FIGURA 2.7 - Exemplo de um membro da pata da âncora **CENO-ROF**.

A cada membro constituinte da âncora está associado um valor de espessura. A placa delta da âncora **CENO-ROF**, mostrada na FIGURA 2.8, por exemplo, é um membro da âncora, e pode ser aproximada por uma forma triangular plana, de vértices arredondados, forma esta definida através de 12 nós, FIGURA 2.9.

Ressalte-se que o modelo da âncora, apesar de estar definido em três dimensões, não é um modelo volumétrico, já que todos os membros, como já mencionado, são necessariamente planos. Assim, o programa entende a placa delta, bem como cada um dos demais membros da âncora, como uma figura plana associada a uma determinada espessura, apenas para efeitos de cálculo dos esforços frutos, de sua interação com o solo.

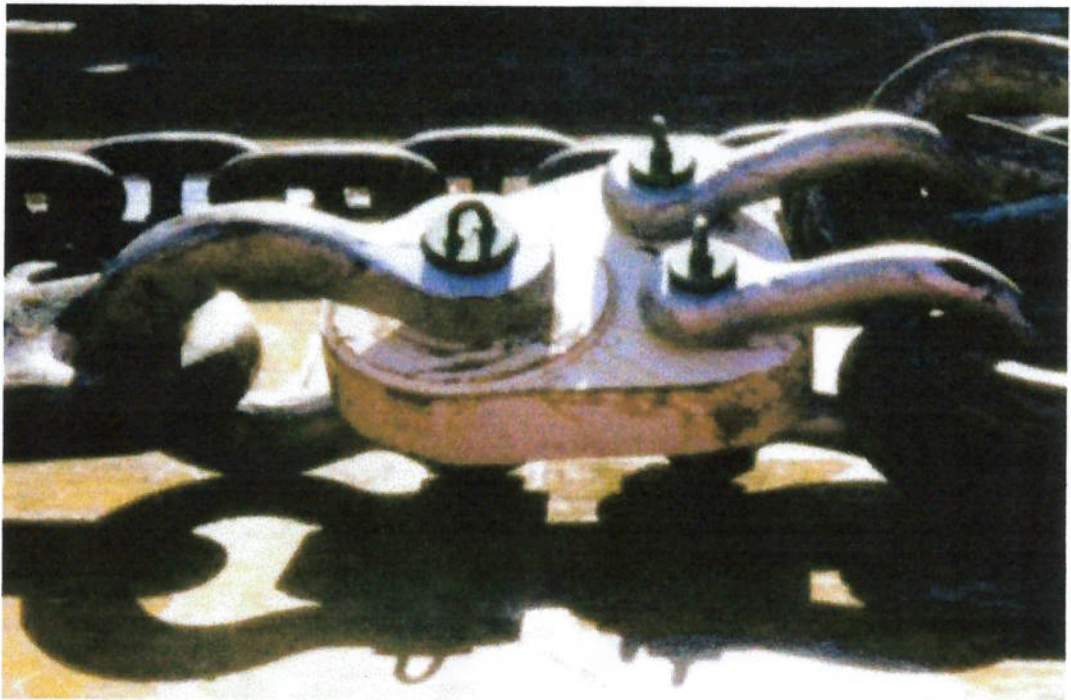


FIGURA 2.8 - Placa delta da âncora CENO-ROF.

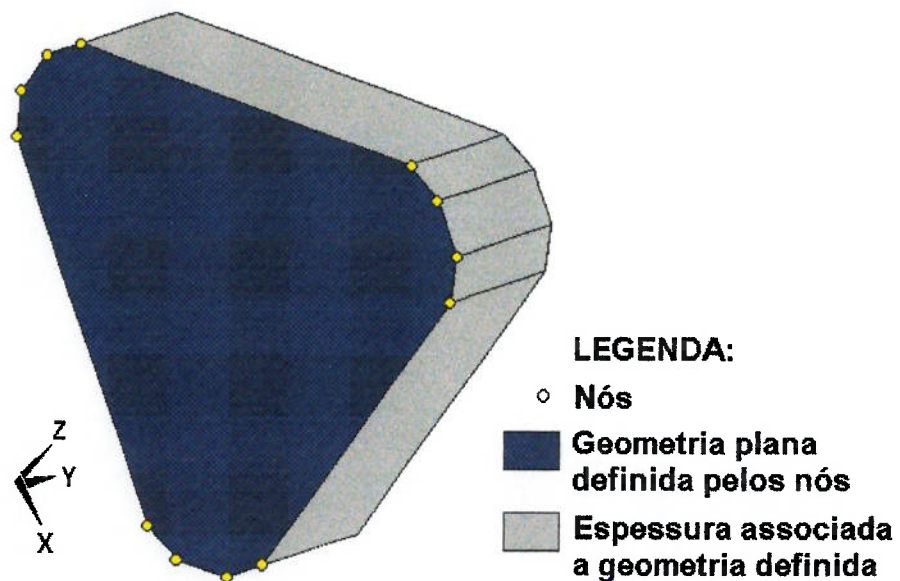


FIGURA 2.9 - Geometria computacional da placa delta da âncora CENO-ROF.

A definição completa da geometria da âncora é obtida, portanto, através da composição de uma série de membros. Assim, um passo importante na criação de um modelo é dividir a âncora em diversas figuras planas, de modo



que sua composição consiga representar, da maneira mais adequada possível, a forma real.

O protótipo da âncora **CENO-ROF** com área projetada de pata de  $10\text{m}^2$ , pode ser visto na FIGURA 2.10. Logo a seguir, representado na FIGURA 2.11, está o modelo tridimensional da pata da mesma âncora, como parametrizado no programa **DIGIN**. Observando-se as duas imagens, pode-se notar como a geometria real foi representada no modelo computacional, através da subdivisão da âncora em vários membros planos. O membro em vermelho da FIGURA 2.11 é o mesmo anteriormente apresentado na FIGURA 2.7.



FIGURA 2.10 - Protótipo da âncora **CENO-ROF** com área projetada de pata de  $10\text{m}^2$ , no convés do rebocador Far Saylor.

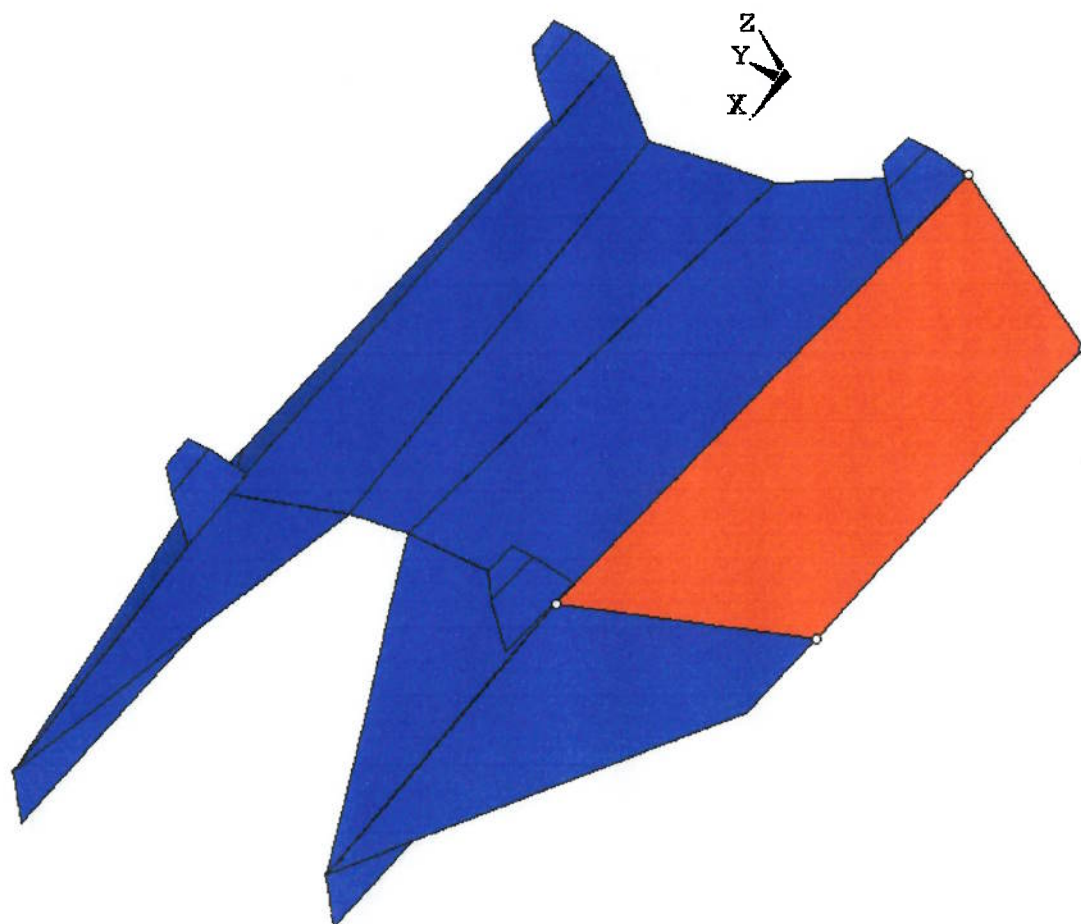


FIGURA 2.11 - Pata do modelo computacional da âncora **CENO-ROF**.

Assim, membro a membro, a geometria completa da âncora é construída, de maneira que a forma completa do modelo computacional da âncora **CENO-ROF**, com apêndices, cabresto e placa delta instalados, pode ser visualizado na FIGURA 2.12.

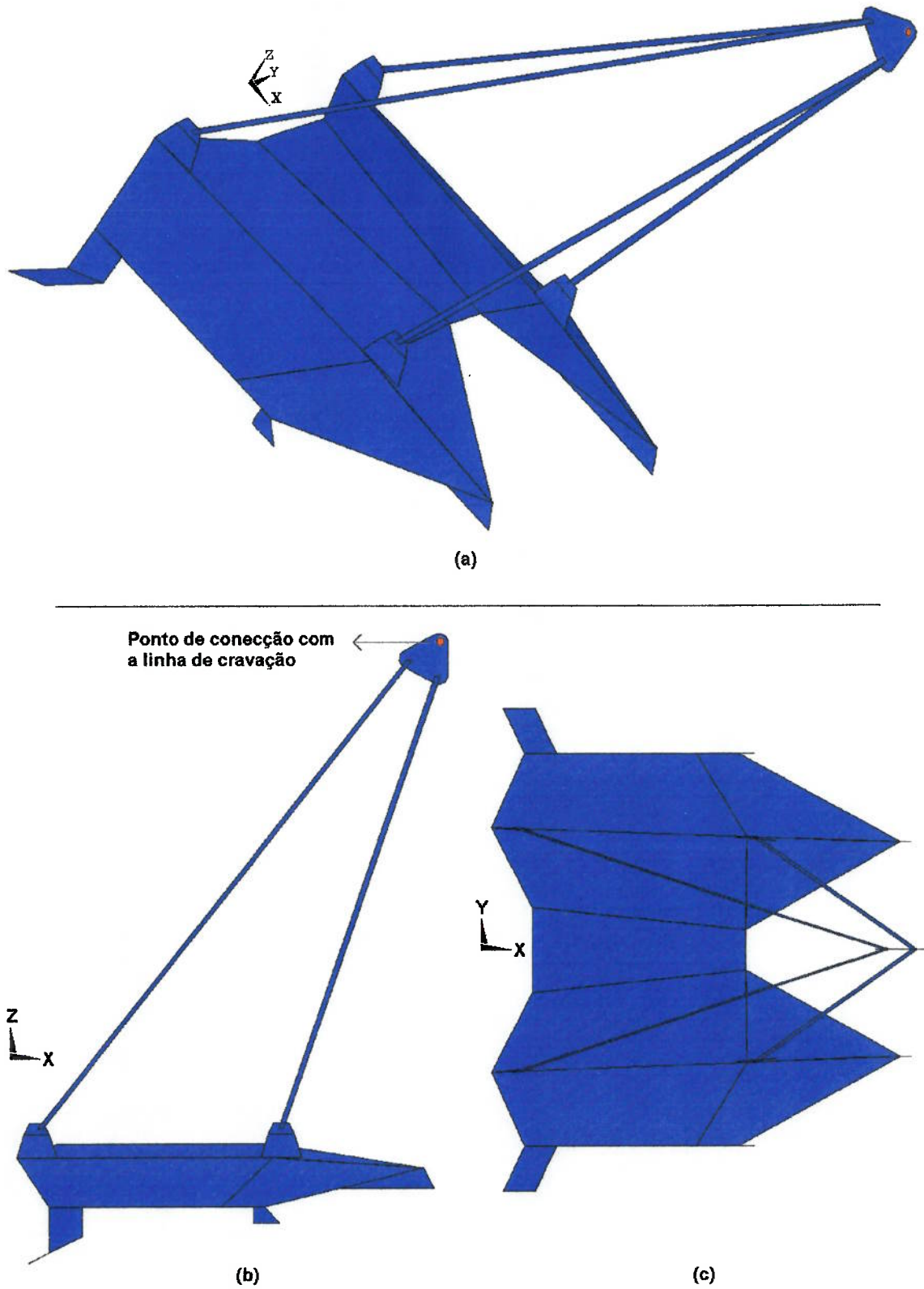


FIGURA 2.12 - Geometria completa do modelo computacional da âncora CENO-ROF: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral; (c) Vista superior.

A âncora **STEV**MANTA já tinha sua geometria parametrizada no banco de dados do programa **DIGIN**. A FIGURA 2.13 mostra a pata de um dos primeiros modelos comerciais desta âncora, com área de pata de  $11\text{m}^2$ . A geometria completa do modelo computacional desta âncora pode ser visualizada na FIGURA 2.14.



FIGURA 2.13 - Pata da âncora **STEV**MANTA de  $11\text{m}^2$ .

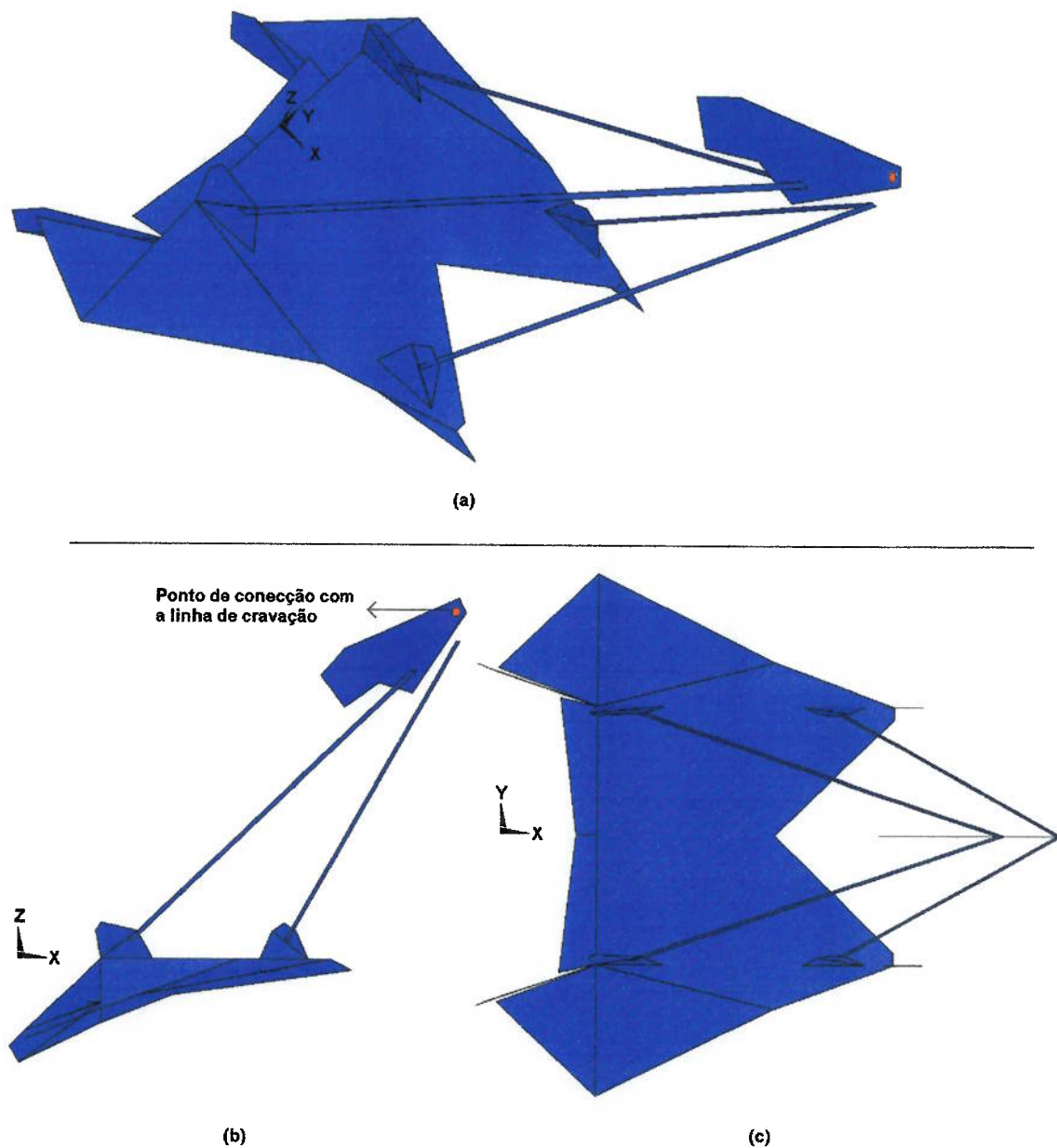


FIGURA 2.14 - Geometria completa do modelo computacional da âncora STEVMANTA: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral; (c) Vista superior.

A âncora DENLA MK3 também já tinha sua geometria definida no banco de dados do programa. A FIGURA 2.15 mostra o protótipo desta âncora com área de pata de  $10\text{m}^2$ . A geometria completa do modelo computacional desta âncora pode ser visualizada na FIGURA 2.16.



(a) Vista frontal



(b) Vista de um trecho superior da pata

FIGURA 2.15 - Âncora DENLA MK3 de 10m<sup>2</sup>.

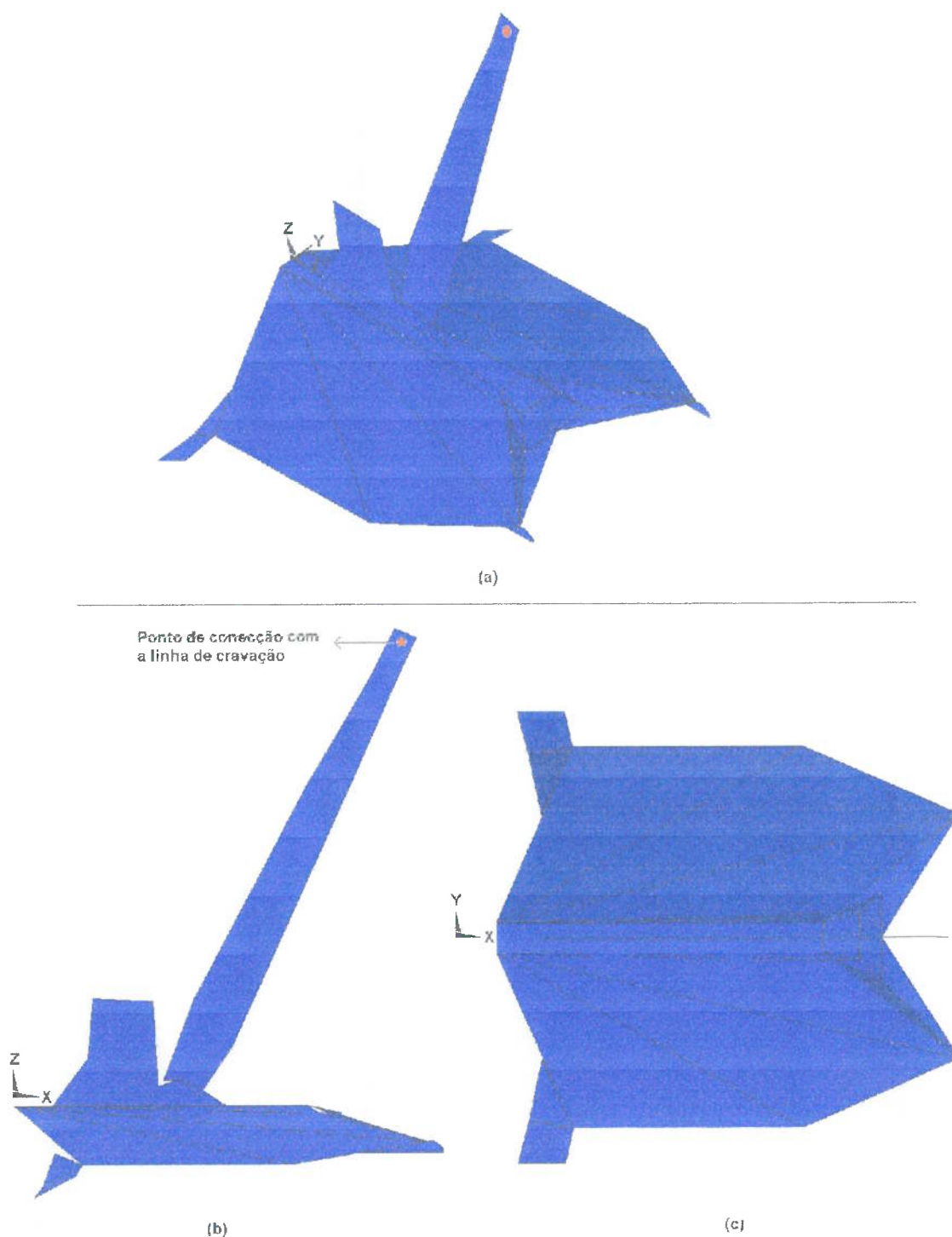


FIGURA 2.16 - Geometria completa do modelo computacional da âncora DENLA MK3: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral; (c) Vista superior.

Além da forma definida através dos membros, outros parâmetros geométricos devem ser informados ao programa. São eles: a posição do centro

de gravidade da pata da âncora, o ponto de conexão com a linha de cravação, o peso da âncora e o centro de rotação da haste.

Para o modelo de âncora **CENO-ROF**, todos estes valores tiveram que ser calculados. O centro de gravidade da pata desta âncora foi tomado como o centro de gravidade de seu chapeamento superior. O valor foi obtido com auxílio do programa AUTOCAD<sup>[15]</sup>, e sua localização é mostrada na FIGURA 2.17. Os valores dos centros de gravidade para as demais âncoras já estavam definidos no banco de dados do **DIGIN**.

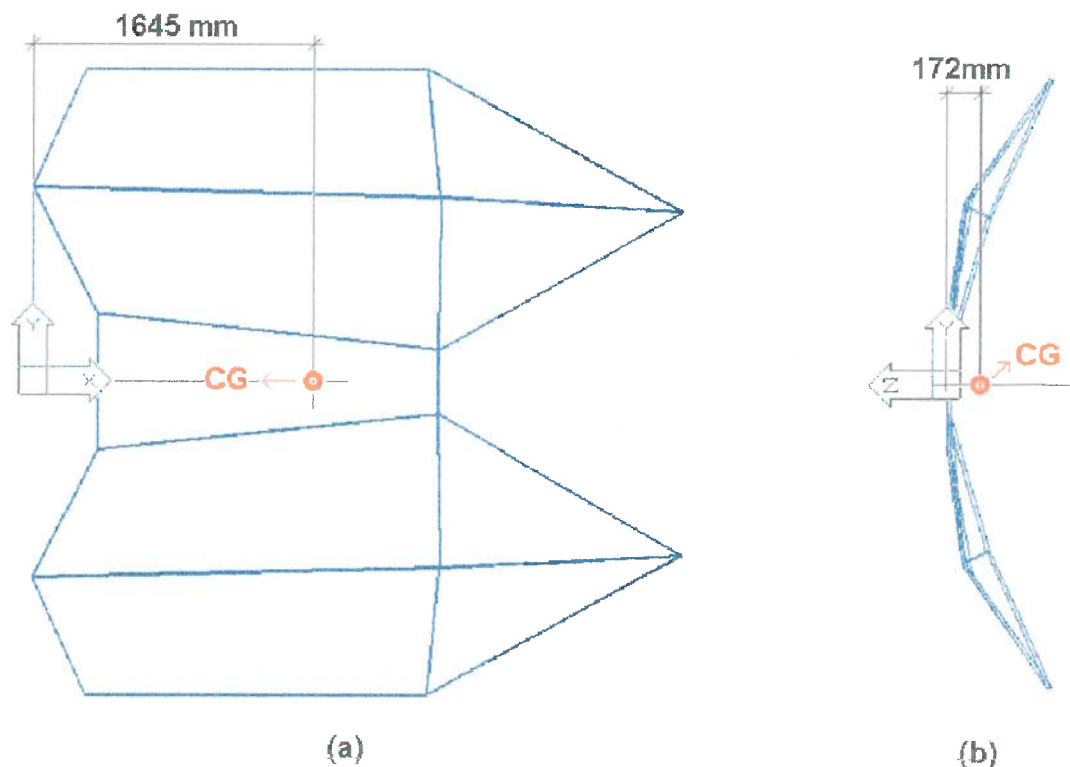


FIGURA 2.17 - Centro de Gravidade da Pata da âncora **CENO-ROF**.

O ponto de conexão com a linha de cravação define exatamente o ângulo de ataque da âncora. Para a âncora **CENO-ROF**, o ponto de conexão tem suas coordenadas definidas na FIGURA 2.18.



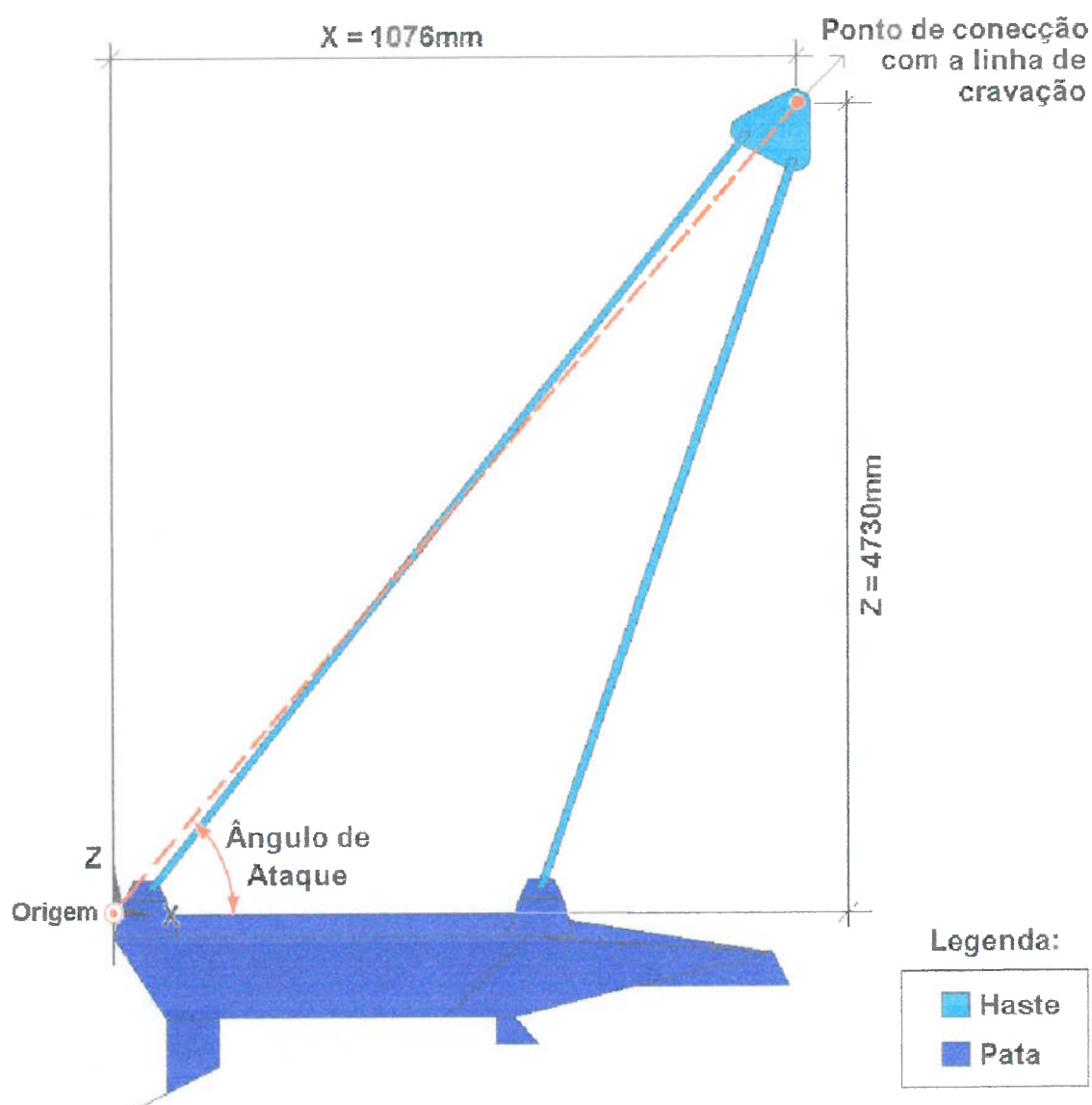


FIGURA 2.18 - Definição do ângulo de ataque da âncora **CENO-ROF** e de seu ponto de conexão com a linha de cravação no **DIGIN**.

O centro de rotação da haste é o ponto ao redor do qual todos os membros pertencentes à haste serão rotacionados de um determinado valor, especificado em graus. Este recurso permite que sejam analisadas diversas configurações de ângulos de ataque, como será visto na apresentação dos resultados referentes às simulações de cravação desta âncora em particular, ainda neste capítulo (série de simulações S1 - item 2.3.1 desta dissertação).

Como o ponto de rotação é somente um ponto de referência para a transição de uma configuração para outra, ele pode ser escolhido a gosto do fabricante de âncora, orientando na prática o processo de alteração do ângulo de ataque. Na âncora **DENLA MK3**, por exemplo, este ponto é definido intuitivamente sobre o próprio pino de conexão da haste com a pata, como ilustrado nas FIGURAS 2.19 e 2.20.



FIGURA 2.19 - Centro de rotação da haste da âncora **DENLA MK3** de 10m<sup>2</sup>.

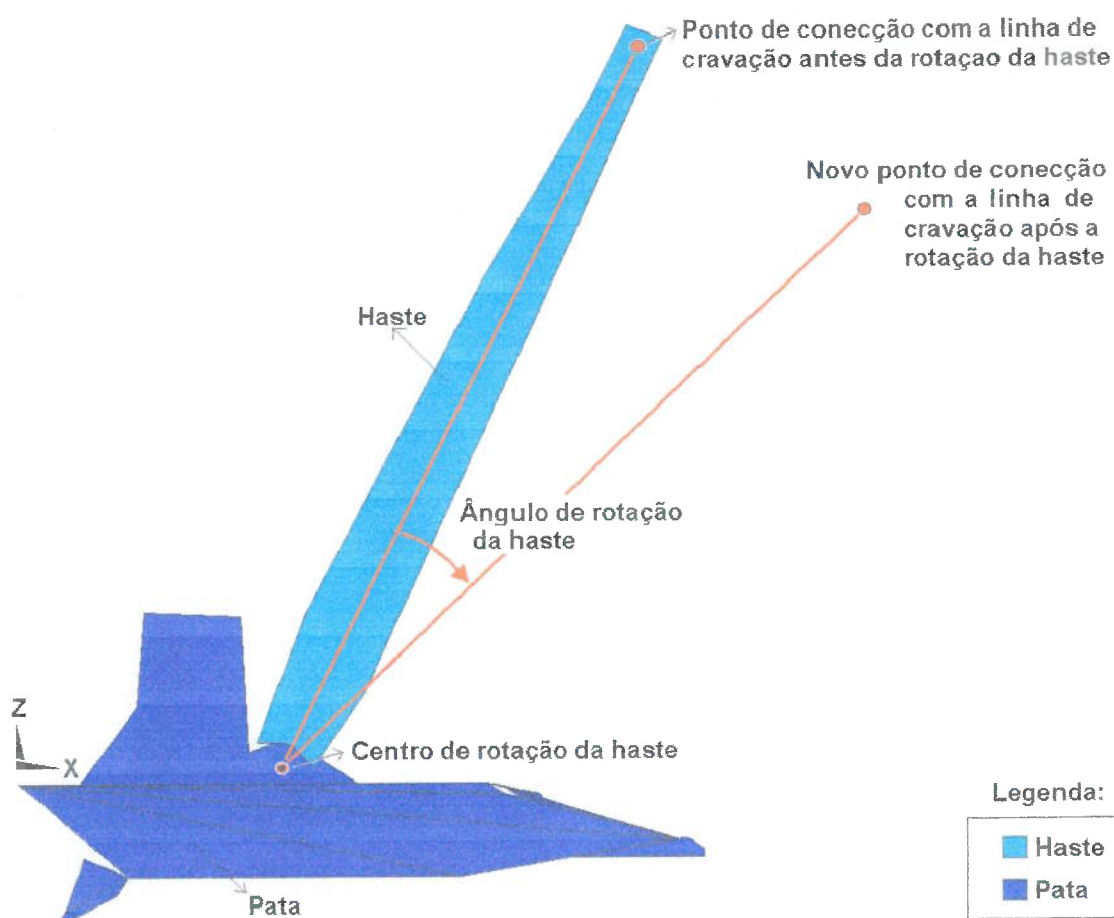


FIGURA 2.20 - Centro de rotação da haste do modelo computacional da âncora DENLA MK3.

Em âncoras com cabresto, a escolha deste ponto não é tão imediata e intuitiva como no caso das âncoras com hastes rígidas, pois não existe na prática um ponto ao redor do qual se dá a rotação do cabresto, simplesmente porque a alteração do ângulo de ataque da âncora não se dá por rotação do cabresto, mas sim pela alteração do comprimento de um dos pares de cabresto, seja de ré ou vante. Na âncora **CENO-ROF**, este ponto foi escolhido como o próprio centro de gravidade. A FIGURA 2.21 mostra dois diferentes ângulos de ataque, um deles obtido pela rotação da haste, de um valor de 20 graus, em torno de seu ponto de rotação. É importante lembrar que apesar da rotação dos membros constituintes da haste se processar ao redor do ponto de

rotação, o ângulo de ataque da âncora, no programa **DIGIN**, é definido em relação à origem do sistema de coordenadas - conforme já especificado na FIGURA 2.18 - e não em relação a este centro de rotação.

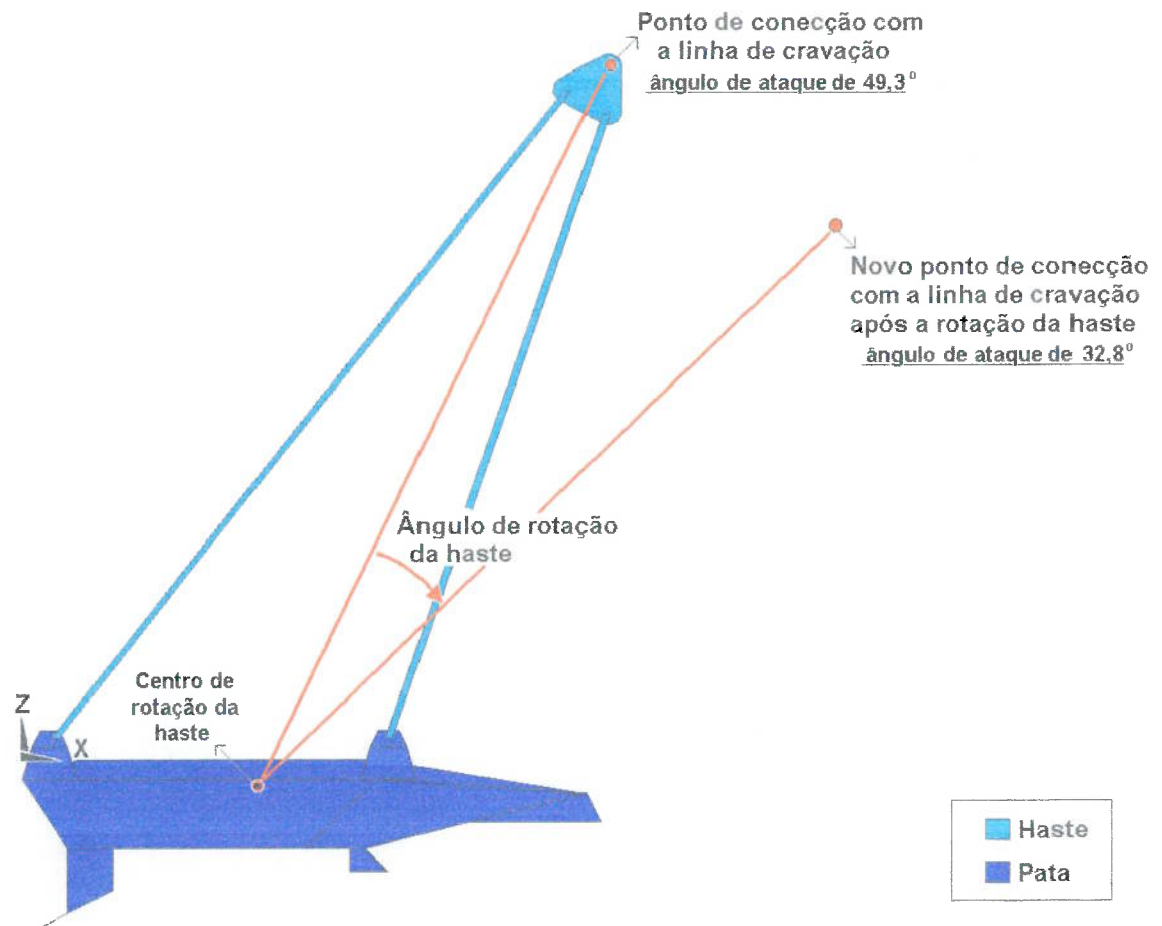


FIGURA 2.21 - Centro de rotação da haste do modelo computacional da âncora **CENO-ROF**.

O peso da âncora **CENO-ROF** foi estimado em 64 kN. O peso das demais âncoras já estava definido no banco de dados do programa **DIGIN**.

A definição numérica completa dos modelos computacionais das três âncoras acima apresentadas, em formato numérico, pode ser encontrada no APÊNDICE 4.

### 2.2.2 Solo

O solo é parametrizado através da definição de algumas de suas propriedades, que variam com a profundidade como função da compactação da lama. As propriedades de resistência ao cisalhamento não drenada, resistência ao cisalhamento amolgada e peso específico devem ser quantificadas para cada valor de profundidade especificado. Estes parâmetros podem estar definidos para até 10 valores de profundidade. Para valores de profundidades intermediários entre duas profundidades especificadas, o programa faz interpolação linear para cada um dos parâmetros definidos. Para valores de profundidades maiores do que o último valor especificado, os valores das propriedades são extrapolados linearmente conforme a variação linear definida nas últimas duas profundidades especificadas.

A TABELA 2.1 ilustra como devem ser especificadas as propriedades para um tipo de solo com resistência ao cisalhamento não drenada de valor 5 *kPa* na superfície, e crescente linearmente com o aumento da profundidade, aumentando 2 *kPa* para cada metro de profundidade acrescido. Ou seja, um solo com perfil de resistência ao cisalhamento não drenada dado pela relação: " $S_u(z)=5+2z$ ", onde " $z$ " é a profundidade. A resistência ao cisalhamento amolgada fica definida como sendo 80% da resistência ao cisalhamento não drenada, para a profundidade em questão. O peso específico do solo é considerado constante para a faixa de 0 a 20 metros, sendo seu valor de 17  $kN/m^3$ .

TABELA 2.1 - Exemplo de parametrização do solo no DIGIN.

| $z$<br>[m] | $S_u(z)=5+2z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $S_r(z)=0.8S_u(z)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| 0.00       | 5.00                                  | 4.00                                       | 17.00                          |
| 10.00      | 25.00                                 | 20.00                                      | 17.00                          |
| 20.00      | 45.00                                 | 36.00                                      | 17.00                          |

Onde:  $z$  :Profundidade;  
 $S_u$  :Resistência ao cisalhamento não drenada do solo;  
 $S_r$  :Resistência ao cisalhamento amolgada solo;  
 $\rho$  :Peso específico do solo.

### 2.2.3 Linha de Cravação

A configuração da linha de cravação é fundamental na compreensão do processo de cravação, uma vez que dela depende a intensidade e a orientação do esforço que chega a âncora, conforme já observado no item 2.1.1.2.

Todas as simulações aqui desenvolvidas, salvo especificação em contrário, foram realizadas com uma linha de cravação composta por dois segmentos, conforme ilustrado na FIGURA 2.22. O primeiro trecho da linha de cravação é composto por cabo de aço. Este é o trecho que está conectado à âncora, e é popularmente conhecido como fore-runner, conforme já definido no capítulo 1 - item 1.4.2 -. O segundo trecho é composto por amarras (linha de peso), estando uma de suas extremidades conectada ao rebocador. Cada trecho deve ter seu comprimento e diâmetro nominal especificado.

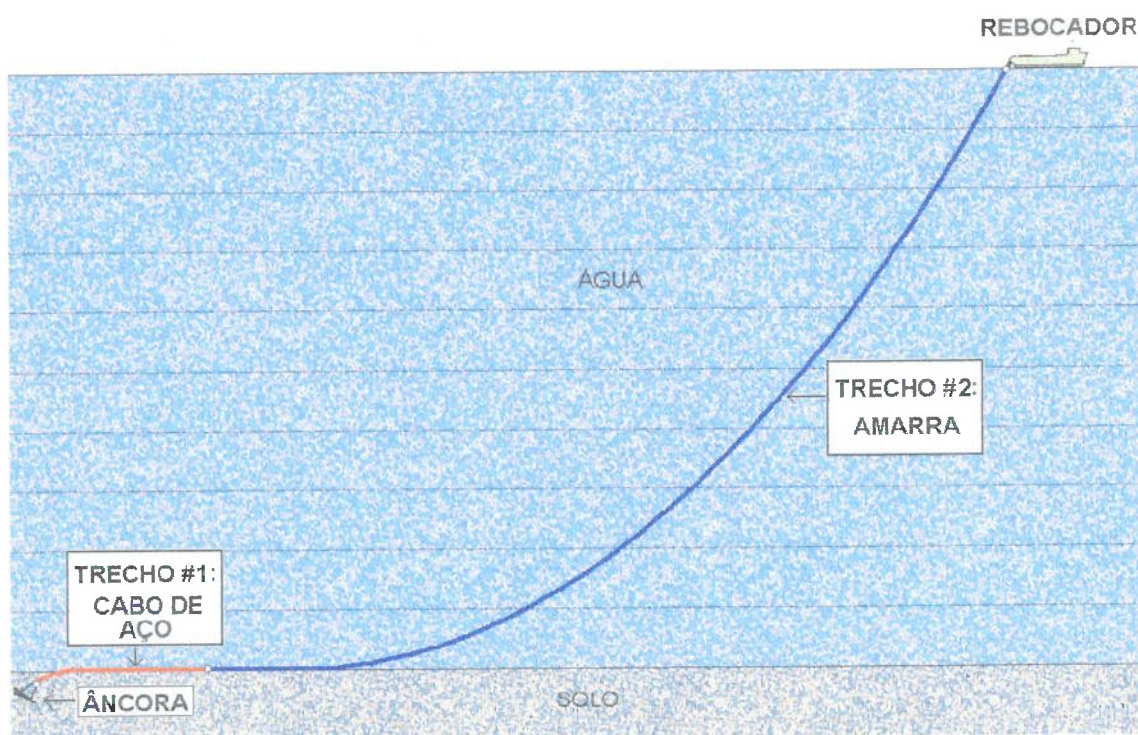


FIGURA 2.22 - Configuração da linha de cravação adotada nas simulações.

A TABELA 2.2 mostra os parâmetros que devem ser fornecidos ao programa para a definição completa da linha de cravação. As demais propriedades dos cabos, tal como o peso específico dentro d'água, são obtidas pelo programa **DIGIN** através da consulta a seu próprio banco de dados, através da relação do diâmetro nominal informado com os diâmetros nominais cadastrados no programa.

TABELA 2.2 - Exemplo de parametrização da linha de cravação no **DIGIN**.

| Trecho | Tipo do trecho | Comprimento [m] | Diâmetro nominal [m] |
|--------|----------------|-----------------|----------------------|
| #1     | Cabo de aço    | 300             | 0.086                |
| #2     | Amarra         | 1500            | 0.076                |

A lâmina d'água e a distância horizontal inicial do rebocador até a âncora deve também ser informadas. Para todas as simulações realizadas, salvo especificação em contrário, a lâmina d'água foi de 500 metros, e a distância horizontal do rebocador até a âncora foi de 1000 metros.

Quanto ao modo de cravação, deve ser informado ao programa de que maneira o último trecho da linha de cravação (trecho conectado ao rebocador) deve ser tracionado. São dois os possíveis modos:

- 1) Recolhimento da linha de cravação;
- 2) Movimentação do rebocador.

Caso escolhido o primeiro modo, a cravação se processa pelo recolhimento do trecho da linha conectado ao rebocador, mantendo este último posição fixa ao longo de toda a cravação. O comprimento total da linha de cravação, neste caso, vai gradualmente diminuindo ao longo da cravação.

Caso escolhido o segundo modo, o comprimento total da linha de cravação se mantém constante, e a cravação é dada pela movimentação do rebocador.

### **2.3 Especificações das Simulações**

Para cada simulação realizada no programa DIGIN, devem estar muito bem definidos a geometria da âncora, as propriedades do solo e a configuração da linha da cravação. Em cada uma das séries de simulações descritas a seguir, um único parâmetro relacionado a um destes três itens acima levantados foi sistematicamente variado, de modo a revelar sua influência no comportamento da âncora.



O programa dá como saída uma série de variáveis, todas elas em função da profundidade, discretizada aqui de 1 em 1 metro para a faixa de profundidade de 0 a 25 metros.

As séries de simulações de S1, S2, S3 e S4 foram desenvolvidas com a âncora **CENO-ROF**. Para as séries S1 e S2 são variados parâmetros associados à âncora. Para a série S3 são variados parâmetros associados à linha de cravação. A série S4 investiga o comportamento da âncora em diferentes tipos de solo, sendo portanto este o objeto de variação e estudo.

A série de simulações S5 foi desenvolvida com as âncoras **DENLA MK3** e **STEVANTA**, visando retratar no ambiente do computador os testes realizados em mar pela PETROBRAS<sup>[1]</sup> com estas mesmas âncoras.

As variáveis de saída arrasto e profundidade no programa **DIGIN** se referem ao ponto de conexão da linha de cravação com a âncora. Assim, é importante ter-se em mente que todas as trajetórias apresentadas neste trabalho, salvo menção em contrário, se referem ao ponto supracitado. É possível, através de relações geométricas e manipulação das variáveis de saída, conhecer-se a trajetória de outro ponto qualquer da âncora. Esta abordagem será adotada, por exemplo, nas séries de simulações S4 e S5. Em particular, para a série S5, como será explicado mais adiante na descrição dos testes em mar, o ponto monitorado pelo sensor instalado nas âncoras é um ponto pertencente à pata. Ou seja, de modo a compatibilizar as trajetórias obtidas nas simulações com as trajetórias medidas no mar, os pontos monitorados devem ser os mesmos, exigindo a alteração do ponto monitorado apresentado nas simulações computacionais.

### 2.3.1 S1: Influência do Ângulo de Ataque

Na série de simulações S1, o ângulo de ataque da âncora CENO-ROF foi sistematicamente alterado, conforme mostrado na FIGURA 2.23, de modo a revelar a influência deste parâmetro na cravação desta VLA. A parametrização do solo e da linha de cravação para esta série pode ser visualizada nas tabelas 2.3 e 2.4, respectivamente.

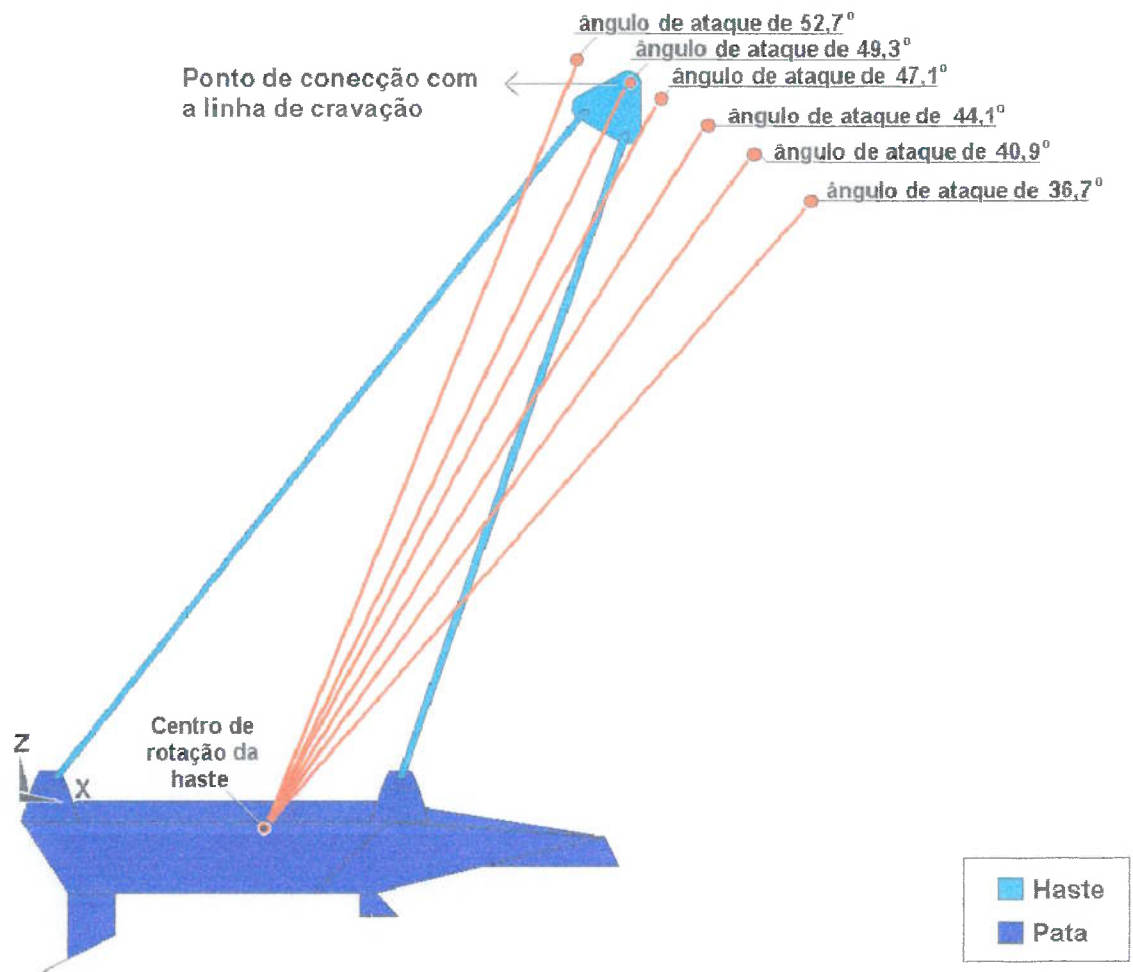


FIGURA 2.23 - Ângulos de ataque investigados para o modelo de âncora CENO-ROF.

TABELA 2.3 - Parametrização do solo para S1.

| $z$<br>[m] | $S_u(z)=5+2z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $S_r(z)=0.8S_u(z)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| 0.00       | 5.00                                  | 5.00                                       | 17.00                          |
| 25.00      | 55.00                                 | 55.00                                      | 17.00                          |

TABELA 2.4 - Parametrização da linha de cravação para S1.

| Trecho | Tipo do trecho | Comprimento<br>[m] | Diâmetro nominal [m] |
|--------|----------------|--------------------|----------------------|
| #1     | Cabo aço       | 300                | 0.086                |
| #2*    | Amarra         | 1500               | 0.076                |

\* Modo de tracionamento: movimentação do rebocador.

Os resultados destas simulações, apresentados no item 2.4.1, estão organizados na forma de 9 gráficos. Cada gráfico apresenta 6 curvas, sendo cada curva referente a um determinado ângulo de ataque do modelo computacional da âncora aqui estudada.

Adicionalmente, para a configuração de âncora com ângulo de ataque de 49,3 graus, é apresentada a configuração passo-a-passo da linha de cravação, tanto para o trecho suspenso como para o trecho em contato com o solo, em função da profundidade da âncora.

### 2.3.2 S2: Influência do Apêndice de Ré

Na série de simulações S2, são realizadas cravações para a âncora CENO-ROF, para as seguintes variações de seus apêndices de ré: pata com apêndice de ré AP03, pata com apêndice de ré AP04, pata com apêndice de ré AP05, e pata sem apêndice de ré, conforme mostra a FIGURA 2.24. A

definição da geometria completa dos apêndices de ré AP03, AP04 e AP05 pode ser encontrada no APÊNDICE 1 desta dissertação. A parametrização do solo e da linha de cravação para esta série é mostrada nas TABELAS 2.5 e 2.6, respectivamente.

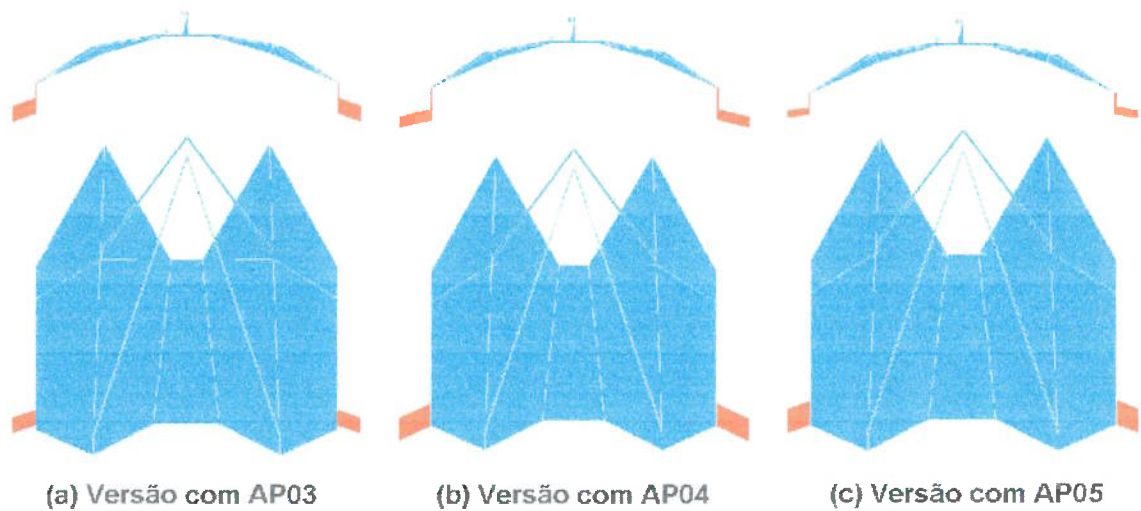


FIGURA 2.24 - Configuração de Pata com os apêndices simulados.

TABELA 2.5 - Parametrização do solo para S2.

| $z$<br>[m] | $S_u(z)=5+2z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $S_r(z)=0.8S_u(z)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| 0.00       | 5.00                                  | 5.00                                       | 17.00                          |
| 25.00      | 55.00                                 | 55.00                                      | 17.00                          |

TABELA 2.6 - Parametrização da linha de cravação para S2.

| Trecho | Trecho    | Tipo do trecho | Comprimento [m] | Diâmetro nominal [m] |
|--------|-----------|----------------|-----------------|----------------------|
| #1     | Âncora    | Cabo de aço    | 300             | 0.086                |
| #2*    | Rebocador | Amarra         | 1500            | 0.076                |

\* Modo de tracionamento: movimentação do rebocador.

Os resultados destas simulações, apresentados no item 2.4.2, estão organizados na forma de 7 gráficos. Cada gráfico apresenta 4 curvas, sendo cada curva referente a uma determinada configuração entre a pata da âncora e os apêndices de ré aqui estudados.

### 2.3.3 S3: Influência da Linha de Cravação

Na série de simulações S3, são realizadas cravações para a âncora **CENO-ROF**. Para as simulações desenvolvidas, são alteradas alguns parâmetros da linha de cravação, conforme especificado nos itens 2.3.3.1 e 2.3.3.2. A parametrização do solo - mostrada na TABELA 2.7 - é a mesma para todas as simulações desenvolvidas neste item.

TABELA 2.7 - Parametrização do solo para S3.

| z<br>[m] | $S_u(z)=5+2z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $S_r(z)=0.8S_u(z)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|----------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| 0.00     | 5.00                                  | 5.00                                       | 17.00                          |
| 25.00    | 55.00                                 | 55.00                                      | 17.00                          |

#### 2.3.3.1 S3.1: Influência do Fore-Runner

Na série de simulações S3.1, são realizadas cravações para dois diferentes tipos de fore-runner: um composto por amarras e outro composto por cabo de aço, conforme especificado na TABELA 2.8 e ilustrado na FIGURA 2.25.

TABELA 2.8 - Parametrização da linha de cravação para S3.1.

| Denominação da Configuração | Trecho | Tipo do trecho | Comprimento [m] | Diâmetro nominal [m] |
|-----------------------------|--------|----------------|-----------------|----------------------|
| Fore-runner:<br>cabo de aço | #1     | Cabo de aço    | 300             | 0.086                |
|                             | #2*    | Amarra         | 2500            | 0.076                |
| Fore-runner:<br>amarra      | #1     | Amarra         | 300             | 0.084                |
|                             | #2*    | Amarra         | 2500            | 0.076                |

\* Modo de tracionamento: movimentação do rebocador.



FIGURA 2.25 - Tipos de fore-runner adotados para S3.1

Os resultados destas simulações, apresentados no item 2.4.3.1, estão organizados na forma de 6 gráficos. Cada gráfico apresenta 2 curvas, sendo cada curva referente a uma determinada variação da linha de cravação, conforme especificado na tabela acima.

### 2.3.3.2 S3.2: *Influência da Inclinação da Linha de Cravação Sobre o Leito Marinho*

Na série de simulações S3.2, são realizadas cravações visando estudar a influência do ângulo que a linha de cravação forma ao tocar o leito marinho,

durante o andamento da cravação. De modo a atingir este objetivo, serão realizadas alterações de comprimento no segundo trecho da linha de cravação (trecho conectado ao rebocador), conforme mostra a TABELA 2.9.

TABELA 2.9 - Parametrização da linha de cravação para S3.2.

| Denominação da Configuração | Conexção do trecho | Tipo do trecho | Comprimento [m] | Diâmetro nominal [m] |
|-----------------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------|
| LC 1300m                    | #1                 | Cabo de aço    | 300             | 0.086                |
|                             | #2*                | Amarra         | 1000            | 0.076                |
| LC 1550m                    | #1                 | Cabo de aço    | 300             | 0.084                |
|                             | #2*                | Amarra         | 1250            | 0.076                |
| LC 1800m                    | #1                 | Cabo de aço    | 300             | 0.084                |
|                             | #2*                | Amarra         | 1500            | 0.076                |
| LC 2300m                    | #1                 | Cabo de aço    | 300             | 0.084                |
|                             | #2*                | Amarra         | 2000            | 0.076                |
| LC 2800m                    | #1                 | Cabo de aço    | 300             | 0.084                |
|                             | #2*                | Amarra         | 2500            | 0.076                |

\* Modo de tracionamento: recolhimento da linha de cravação.

Os resultados destas simulações, apresentados no item 2.4.3.2, estão organizados na forma de 5 gráficos. Cada gráfico apresenta 5 curvas, sendo cada curva referente a um determinada variação da linha de cravação, conforme especificado na tabela acima.

#### **2.3.4 S4: Influência do Solo**

Na série de simulações S4, são realizadas cravações para a âncora CENO-ROF, para os tipos de solo descritos na TABELA 2.10. A parametrização da linha de cravação pode ser visualizada na TABELA 2.11.

TABELA 2.10 - Parametrização do solo para S4.

| Equação característica do solo [kPa] | z [m] | Su(z) [kN/m <sup>2</sup> ] | Sr(z) [kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$ [kN/m <sup>3</sup> ] |
|--------------------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 5 + 1,3 z                            | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 37,00                      | 30,00                      | 17,00                       |
| 5 + 2 z                              | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 55,00                      | 44,00                      | 17,00                       |
| 5 + 3 z                              | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 80,00                      | 64,00                      | 17,00                       |
| 5 + 4 z                              | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 105,00                     | 84,00                      | 17,00                       |
| 5 + 6 z                              | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 155,00                     | 124,00                     | 17,00                       |
| 5                                    | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                       |
| 10                                   | 0,00  | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                       |
| 40                                   | 0,00  | 40,00                      | 32,00                      | 17,00                       |
|                                      | 25,00 | 40,00                      | 32,00                      | 17,00                       |



TABELA 2.10 - Parametrização do solo para S4 (continuação).

| Equação característica do solo [kPa]   | z [m] | Su(z) [kN/m <sup>2</sup> ] | Sr(z) [kN/m <sup>2</sup> ] | ρ [kN/m <sup>3</sup> ] |
|--|-------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 5 (0-12m)<br>10 (13-25m)               | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                  |
|  | 12,00 | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                  |
|  | 13,00 | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                  |
|  | 25,00 | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                  |
| 10 (0-12m)<br>55 (25m)                 | 0,00  | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                  |
|  | 12,00 | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                  |
|  | 25,00 | 55,00                      | 44,00                      | 17,00                  |
| 10 (0-12m)<br>5 (13-25m)               | 0,00  | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                  |
|  | 12,00 | 10,00                      | 8,00                       | 17,00                  |
|  | 13,00 | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                  |
|  | 25,00 | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                  |
| -5 + 2,22 EXP(0,14 z)<br>(Exponencial) | 0,00  | 5,01                       | 4,01                       | 17,00                  |
|  | 5,00  | 5,25                       | 4,20                       | 17,00                  |
|  | 10,00 | 6,09                       | 4,87                       | 17,00                  |
|  | 14,00 | 8,11                       | 6,49                       | 17,00                  |
|  | 17,00 | 11,69                      | 9,35                       | 17,00                  |
|  | 19,00 | 16,09                      | 12,87                      | 17,00                  |
|  | 20,00 | 19,26                      | 15,41                      | 17,00                  |
|  | 21,00 | 23,34                      | 18,67                      | 17,00                  |
|  | 23,00 | 35,29                      | 28,23                      | 17,00                  |
| 25,00                                  | 55,00 | 44,00                      | 17,00                      |                        |

TABELA 2.10 - Parametrização do solo para S4 (continuação).

| Equação característica do solo [kPa]           | z [m] | Su(z) [kN/m <sup>2</sup> ] | Sr(z) [kN/m <sup>2</sup> ] | ρ [kN/m <sup>3</sup> ] |
|--|-------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 5 + 0,08 z <sup>2</sup><br>(Quadrático)        | 0,00  | 5,00                       | 4,00                       | 17,00                  |
|  | 2,00  | 5,32                       | 4,26                       | 17,00                  |
|  | 4,00  | 6,28                       | 5,02                       | 17,00                  |
|  | 6,00  | 7,88                       | 6,30                       | 17,00                  |
|  | 8,00  | 10,12                      | 8,10                       | 17,00                  |
|  | 10,00 | 13,00                      | 10,40                      | 17,00                  |
|  | 13,00 | 18,52                      | 14,82                      | 17,00                  |
|  | 17,00 | 28,12                      | 22,50                      | 17,00                  |
|  | 21,00 | 40,28                      | 32,22                      | 17,00                  |
|  | 25,00 | 55,00                      | 44,00                      | 17,00                  |
| 5 + 15,348 LN(z + 1)<br>(Logarítimo Neperiano) | 0.00  | 5.00                       | 4.00                       | 17.00                  |
|  | 1.00  | 15.64                      | 12.51                      | 17.00                  |
|  | 2.00  | 21.86                      | 17.49                      | 17.00                  |
|  | 4.00  | 29.70                      | 23.76                      | 17.00                  |
|  | 6.00  | 34.87                      | 27.89                      | 17.00                  |
|  | 8.00  | 38.72                      | 30.98                      | 17.00                  |
|  | 11.00 | 43.14                      | 34.51                      | 17.00                  |
|  | 15.00 | 47.55                      | 38.04                      | 17.00                  |
|  | 20.00 | 51.73                      | 41.38                      | 17.00                  |
|  | 25.00 | 55.01                      | 44.00                      | 17.00                  |

\* Sr(z) = 0,8 Su(z)

TABELA 2.11 - Parametrização da linha de cravação para S4.

| Trecho | Tipo do trecho | Comprimento [m] | Diâmetro nominal [m] |
|--------|----------------|-----------------|----------------------|
| #1     | Cabo de aço    | 300             | 0,086                |
| #2*    | Amarra         | 1500            | 0,076                |

\* Modo de tracionamento: recolhimento da linha de cravação.

Os resultados destas simulações, apresentados no item 2.4.4, estão organizados na forma de 9 gráficos. Cada curva presente num destes 9 gráficos se refere a um determinado tipo de solo estudado.

### 2.3.5 S5: Simulações com Âncoras Comerciais

A título de comparação com os ensaios desenvolvidos em mar<sup>[1]</sup> com as âncoras **DENLA MK3** e **STEVANTA** pela PETROBRAS (capítulo 4 desta dissertação), serão desenvolvidos, para a série de simulações S5, cravações que retratam as mesmas condições dos testes em mar.

Os testes em mar foram realizados em duas diferentes locações. A locação da plataforma P27 se encontra no campo petrolífero de Voador, onde o solo apresenta um perfil de resistência ao cisalhamento dado pela equação " $Su(z)=5+2z$ ". O modelo computacional deste solo está parametrizado na TABELA 2.12. Já a locação da plataforma P36 se encontra no campo petrolífero de Roncador, onde o solo é mais macio e apresenta um perfil de resistência ao cisalhamento dado pela equação " $Su(z)=3.58+1.63z$ ". O modelo computacional deste solo está parametrizado na TABELA 2.13. A parametrização da linha de cravação é apresentada na TABELA 2.14.

TABELA 2.12 - Parametrização do solo de Voador para S5.

| $z$<br>[m] | $S_u(z)=5+2z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $S_r(z)=0.8S_u(z)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| 0.00       | 5.00                                  | 5.00                                       | 17.00                          |
| 25.00      | 55.00                                 | 55.00                                      | 17.00                          |

TABELA 2.13 - Parametrização do solo de Roncador para S5.

| $z$<br>[m] | $S_u(z)=3.58+1.63z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $S_r(z)=0.8S_u(z)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\rho$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------------|---|--|--------------------------------|
| 0.00       | 3.58  | 3.58                                       | 17.00                          |
| 25.00      | 44.33                                       | 44.33                                      | 17.00                          |

TABELA 2.14 - Configuração da linha de cravação para S5.

| Trecho | Tipo do trecho | Comprimento<br>[m] | Diâmetro<br>nominal |
|--------|----------------|--------------------|---------------------|
| #1     | Cabo de aço    | 220                | 3 3/4"              |
| #2     | Amarra         | 490                | 84 mm               |
| #3*    | Cabo de aço    | 1500               | 3 3/8"              |

\* Modo de tracionamento: movimentação do rebocador.

Os resultados destas simulações, apresentados no item 2.4.5, estão organizados na forma de 2 gráficos. Cada gráfico apresenta as trajetórias descritas por cada uma das âncoras simuladas. Para a âncora **DENLA MK3** de 10m<sup>2</sup> de área projetada, foram analisadas três diferentes configurações de ângulo de ataque (38, 44 e 50 graus), além de uma configuração de fore-runner com amarras. Já as simulações desenvolvidas com a âncora **STEV MANTA**, com área projetada de 11m<sup>2</sup>, adotaram uma única configuração de ângulo de ataque, bem como uma única configuração de linha de cravação.

## 2.4 Resultados das Simulações

Neste ítem são apresentados os resultados das simulações realizadas conforme as especificações definidas no ítem 2.3.

### 2.4.1 S1: Influência do Ângulo de Ataque

Para a série de simulações S1, são apresentadas, em função da profundidade do ponto de conexão da linha de cravação com a âncora **CENOROF**, a evolução das seguintes variáveis:

- O arrasto da âncora;
- A força aplicada na linha de cravação, na interface solo-água (*também apresentada em função do arrasto*);
- O ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora (*também apresentado em função do arrasto*);
- O ângulo de orientação da pata da âncora (*também apresentado em função do arrasto*);
- O comprimento da linha de cravação dentro do solo marinho;
- O ângulo de orientação da linha de cravação ao tocar o leito marinho.
- A configuração geométrica da linha de cravação, tanto para o trecho suspenso como para o trecho em contato com o solo, em função da profundidade da âncora, para o ângulo de ataque de 49,3 graus.

Observando-se a FIGURA 2.26, pode-se constatar que, pelo menos qualitativamente, para um mesmo arrasto, quanto maior for o ângulo de ataque da âncora, tanto maior será sua profundidade atingida, admitindo que todos os ângulos em questão levem a âncora até o referido arrasto.

Neste contexto, podemos observar, através da FIGURA 2.27 (a), que para uma mesma profundidade atingida, maiores ângulos de ataque acarretam

maiores esforços na linha de cravação. Ou seja, quanto menor for o ângulo de ataque, tanto menor será o esforço de cravação. A FIGURA 2.27 (b) mostra que os esforços na linha de cravação se estabilizam ao redor de um determinado valor para alguns ângulos de ataque, a partir de um determinado arrasto. Esta estabilização está intimamente ligada ao fenômeno de horizontalização da trajetória, a ser analisado mais adiante.

Muito cuidado, porém, deve ser tomado na interpretação deste último parágrafo. A observação inadvertida da FIGURA 2.27 (a) pode levar à seguinte falsa conclusão: menores ângulos de cravação, por reduzirem os esforços na linha de cravação, podem maximizar a profundidade atingida pela âncora, uma vez que, para uma mesma profundidade, a quantidade exigida de força a ser aplicada pelo rebocador seria menor, restando o sobressalente para cravar a âncora ainda mais fundo. Seguindo esta linha de raciocínio, temos que, para um mesmo esforço na linha de cravação, atingiriam maiores profundidades as âncoras que apresentassem menores ângulos de ataque, o que é uma falsa afirmação. Isto só seria verdade caso não ocorresse o fenômeno de horizontalização da trajetória.

Observando-se novamente a FIGURA 2.26, podemos notar que para os ângulos de ataque de 37.6, 40.9 e 44.1 graus, a âncora **CENO-ROF** apresenta trajetórias praticamente horizontais ao término destas. Para estas curvas em particular, o crescente aumento do arrasto não significa ganho efetivo de profundidade. Muito pelo contrário. Quando maior o arrasto, tanto menor é o ganho de profundidade apresentado pela âncora. A este fenômeno dá-se o nome de horizontalização da trajetória, já anteriormente constatada nos

estudos desenvolvidos em tanque com gel<sup>[16]</sup>, com este mesmo modelo de âncora, porém em escala 1:50.

A horizontalização da trajetória, porém, não é característica única do modelo **CENO-ROF**, mas sim, um fenômeno ao qual estão sujeitas todas as classes de âncoras, em particular as VLAs, por serem âncoras com alto poder de penetração no solo.

A redução do ângulo de ataque da âncora de fato reduz, para uma mesma profundidade analisada, os esforços na linha de cravação, porém com o efeito adverso de antecipar a profundidade de horizontalização da trajetória, limitando assim a profundidade máxima atingida pela âncora.

Neste contexto, pode-se inferir a seguinte conclusão: todo ângulo de ataque que possibilite a penetração da âncora no solo, certamente levará a âncora a um estágio no qual a mesma terá sua trajetória horizontalizada, caso o esforço fornecido pelo rebocador à linha de cravação não seja um fator limitante. Assim, para cada ângulo de ataque existe uma máxima profundidade que a âncora pode atingir.

Apesar de possível de ser atingida em teoria, na prática dificilmente as âncoras têm suas trajetórias horizontalizadas, seja porque o rebocador não tem potência suficiente para levar a âncora à profundidade na qual ocorrerá a horizontalização, seja porque sua ocorrência é indesejável, uma vez que, se atingida, o sistema entra em regime permanente, e o rebocador passará a arrastar indefinidamente a âncora, sem qualquer ganho de profundidade, tornando-se impraticável atingir, nestas condições, o alvo de instalação.

A justificativa física para a ocorrência do fenômeno de horizontalização passa, antes de tudo, pela linha de cravação. Não fosse a forma em catenária

invertida (vide item 2.1.1.2 desta dissertação) assumida pelo fore-runner da linha de cravação, o fenômeno de horizontalização não se processaria. Isto porque, quanto maior for a profundidade da âncora solo adentro, tanto maior será a inclinação da linha de cravação na conexão com a âncora, conforme mostra a FIGURA 2.28 (a), para qualquer ângulo de ataque. Assim, conforme a âncora vai ganhando profundidade, a direção do esforço nela aplicado vai se tornando cada vez mais vertical. Mas, cada nova orientação deste esforço significa uma nova re-orientação da âncora, de modo que o sistema composto pela linha de cravação e a âncora entre novamente em equilíbrio. Ou seja, a pata da âncora vai continuamente mudando sua orientação - FIGURA 2.29 (a) - , conforme se altera a direção de aplicação do esforço provindo da linha de cravação na âncora.

Cada nova direção de orientação da pata significa uma nova direção de penetração da âncora, não necessariamente na direção da pata. E assim vai sendo construída a trajetória:

- (i) A linha de cravação aplica sobre a âncora um esforço numa determinada direção, tal que este esforço rompa a configuração de equilíbrio na qual se encontrava o sistema (composto pela âncora e linha de cravação);
- (ii) A âncora reage a este esforço, movimentando-se e penetrando solo adentro numa direção que é função da orientação de sua pata, até que se atinja uma nova configuração de equilíbrio. Nesta nova profundidade, o fore-runner da linha de cravação, no ponto de conexão com a âncora, assume uma nova orientação. Neste estado, a direção de orientação da âncora é tal que proporciona o equilíbrio.



Ao ser encontrado o equilíbrio, o sistema assim permanece até que uma nova força, maior do que a anterior, seja transmitida à linha de cravação e aplicada à âncora, repetindo-se novamente os passos (i) e (ii).

Mas até quando se repetirá esta situação?

Conforme nos mostra a FIGURA 2.29 (b), a orientação da pata da âncora diminui gradualmente com a profundidade, até se tornar nula. Na figura, a horizontalização da trajetória ocorre exatamente quando este ângulo atinge o valor zero. Se observarmos em conjunto as FIGURAS 2.26 e 2.29 (b), esta tendência fica mais do que clara. O último ponto de cada uma das curvas de ângulo de ataque iguais a 37.6, 40.9 e 44.1 graus apresenta valor nulo de orientação da pata. E é este exatamente o último ponto apresentado na trajetória da âncora. A partir daí, a trajetória é horizontal, com o arrasto tendendo teoricamente ao infinito para um ganho nulo de profundidade.

Na prática, se uma âncora tiver sua trajetória horizontalizada, dificilmente se manterá nesta configuração por muito tempo, dado que esta condição exige equilíbrio perfeito, condição possível de ser realizada somente em teoria. Qualquer assimetria na geometria da âncora pode levar a instabilização de sua trajetória, fazendo com que a cravação deixe de se processar no plano vertical longitudinal, passando a planos consecutivamente inclinados, que fatalmente levarão a âncora de volta à superfície.

Para os ângulos de ataque de 47.1, 49.3 e 52.7 graus, a FIGURA 2.29(b) mostra que, para estas configurações, o ângulo de inclinação da pata da âncora com a horizontal não chega a atingir o valor nulo. Se observarmos a FIGURA 2.26, iremos notar que, para a faixa de profundidade analisada, estes ângulos de ataque não levam à horizontalização da trajetória da âncora.

Ainda com relação aos resultados numéricos, podemos observar um detalhe curioso com relação à linha de cravação. Na FIGURA 2.30, a medida que a profundidade das diferentes configurações de âncora cresce, também crescem os comprimentos de cabo da linha de cravação dentro do solo. Porém, a partir de 11 metros de profundidade, algumas das configurações de ângulos de ataque apresentam uma súbita mudança de comportamento, de modo que o comprimento da linha de cravação dentro do solo passa a ser praticamente constante, mesmo com o crescente ganho de profundidade da âncora.

Mas por que isto acontece?

A explicação vem da FIGURA 2.31. Nela, podemos notar que, a partir da mesma profundidade de 11 metros, o ângulo que a linha de cravação forma com o solo deixa de ser nulo, e passa a ser crescente com ganho de profundidade da âncora, para as mesmas configurações de ângulo de ataque da figura anterior. Esta nova condição modifica a forma geométrica em catenária invertida da linha de cravação dentro do solo marinho.

Ou seja, conforme este ângulo aumenta, o comprimento de cabo dentro do solo - FIGURA 2.30 - passa não somente a depender do aumento de profundidade da âncora, mas também do ângulo de inclinação que a linha de cravação forma com a superfície do leito marinho. Assim, a partir de 11 metros de profundidade, o ganho de comprimento devido ao aumento da profundidade da âncora é reduzido pela alteração da forma geométrica da catenária invertida solo adentro, mantendo então, quase que constante o comprimento do trecho do fore-runner dentro do solo marinho ao longo do restante da cravação.

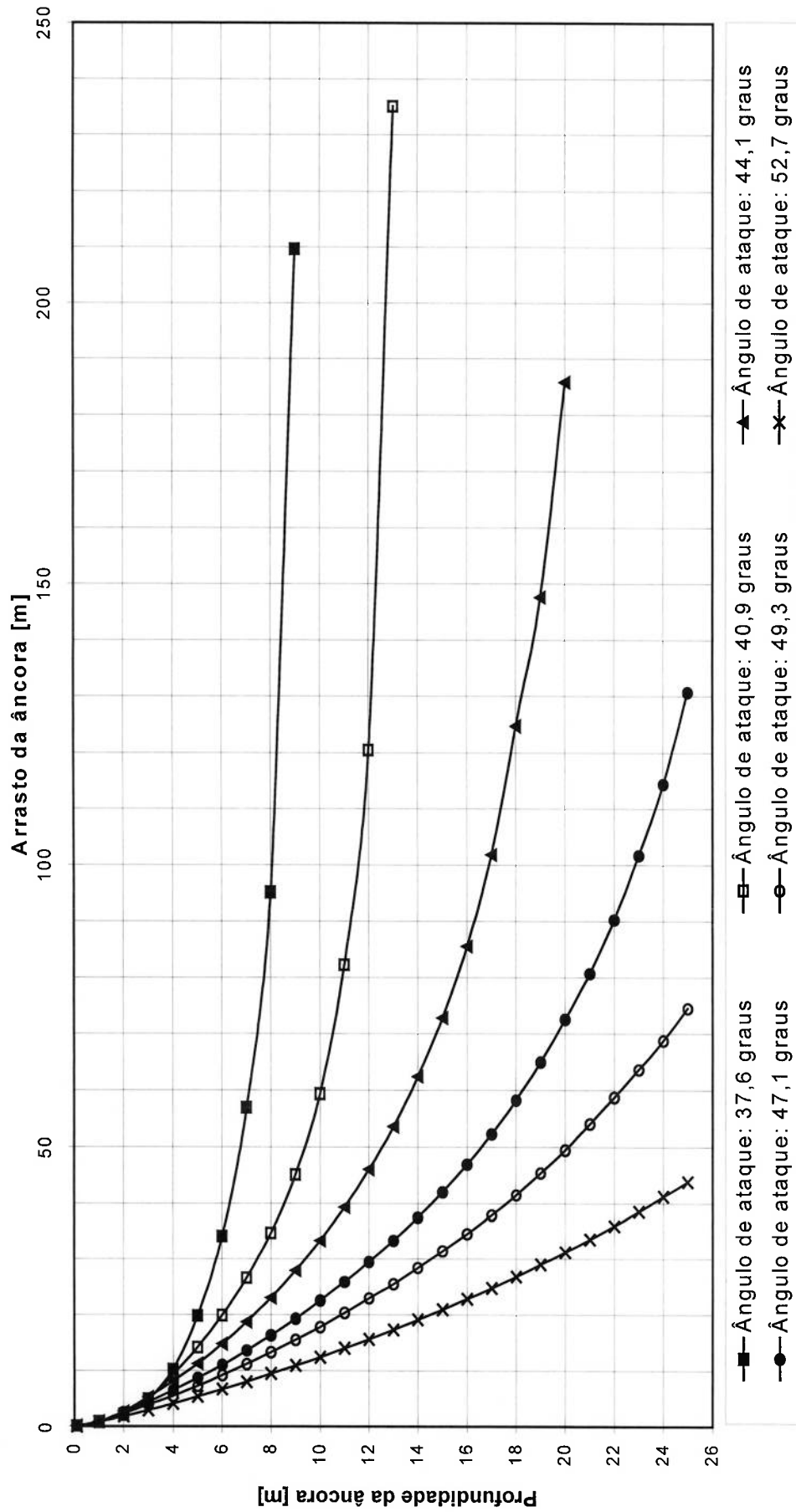


FIGURA 2.26 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Profundidade x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.

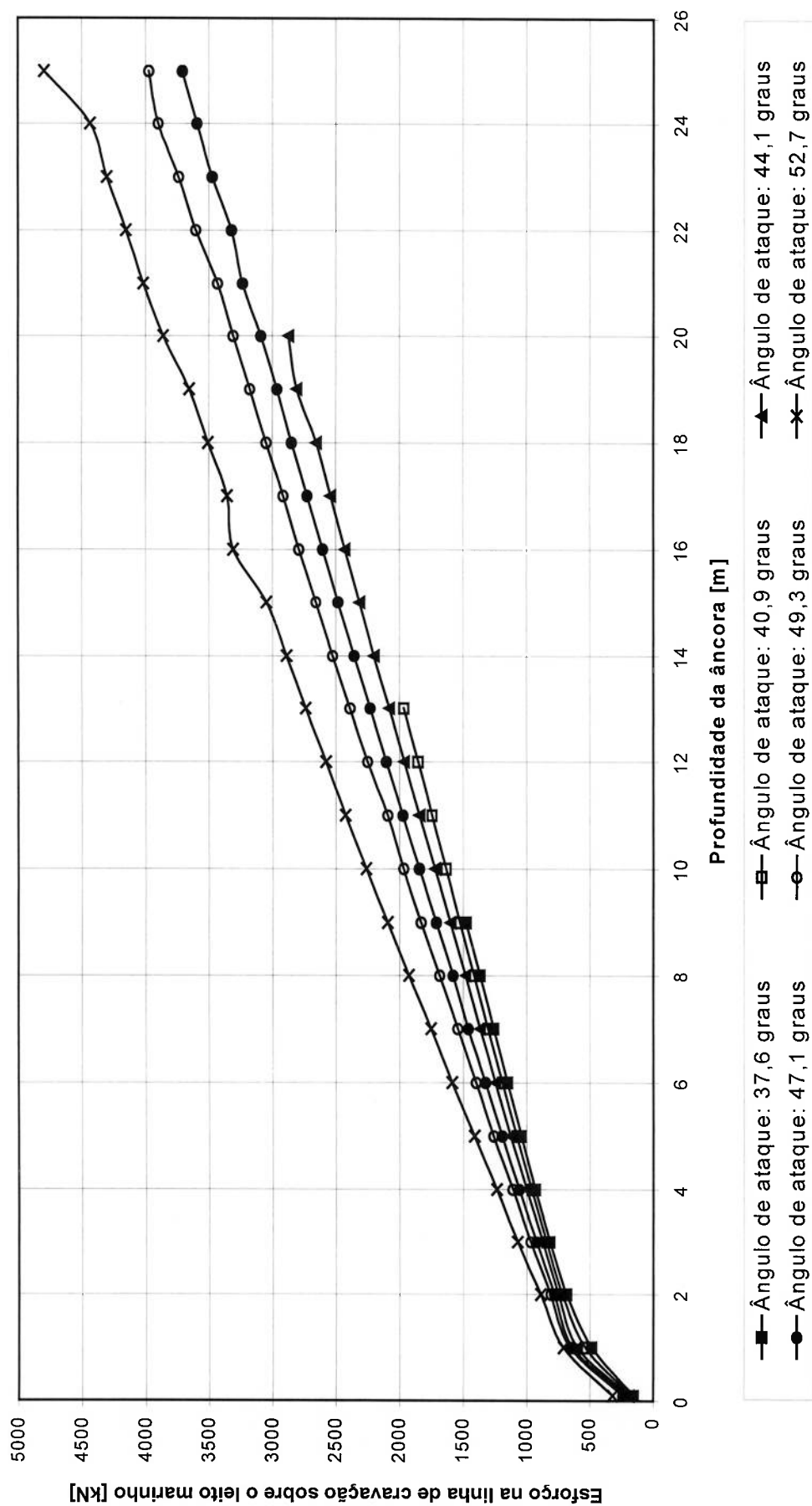


FIGURA 2.27(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.

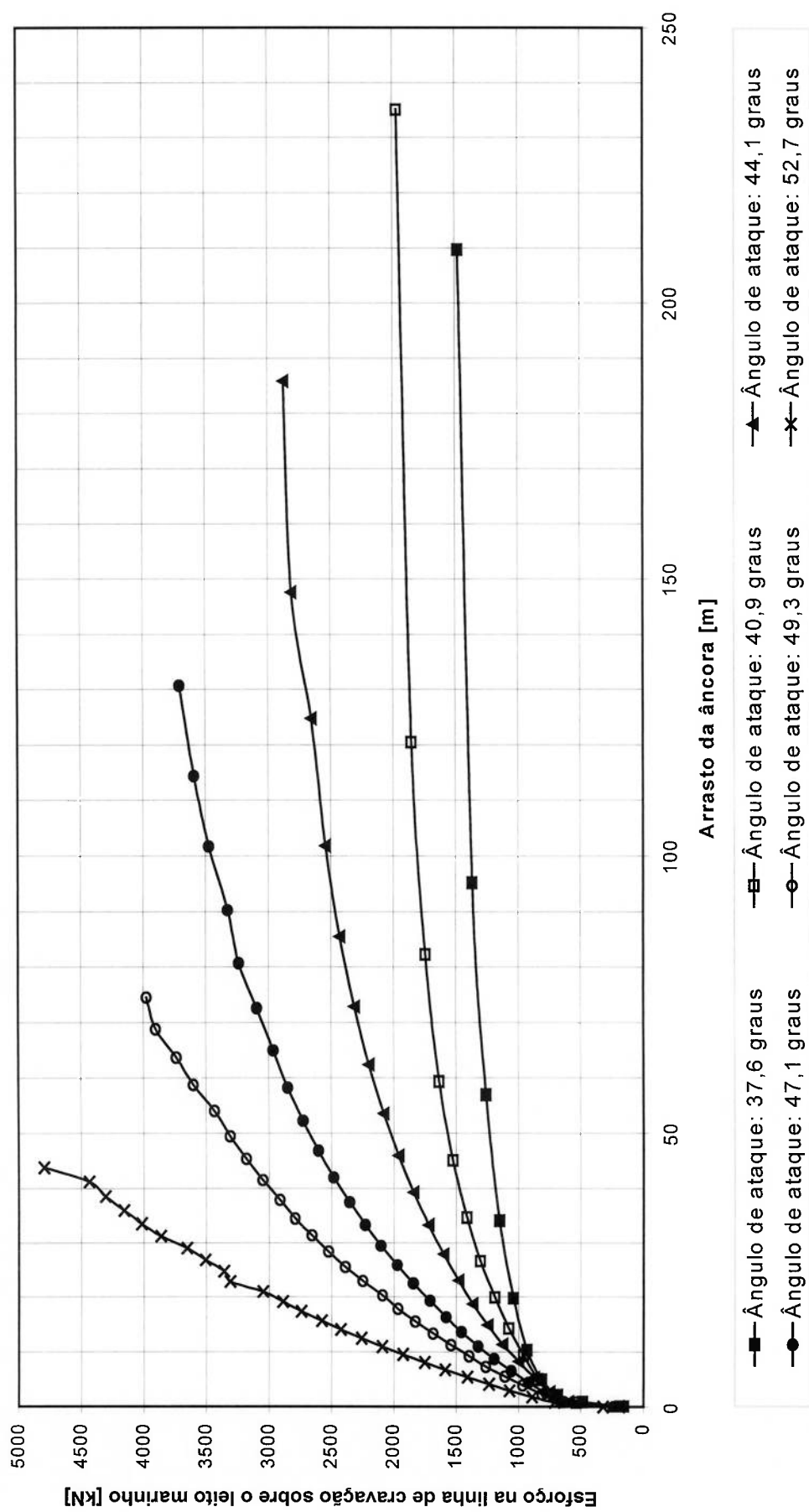


FIGURA 2.27(b) - Modelo computacional da âncora **CENO-ROF** de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.

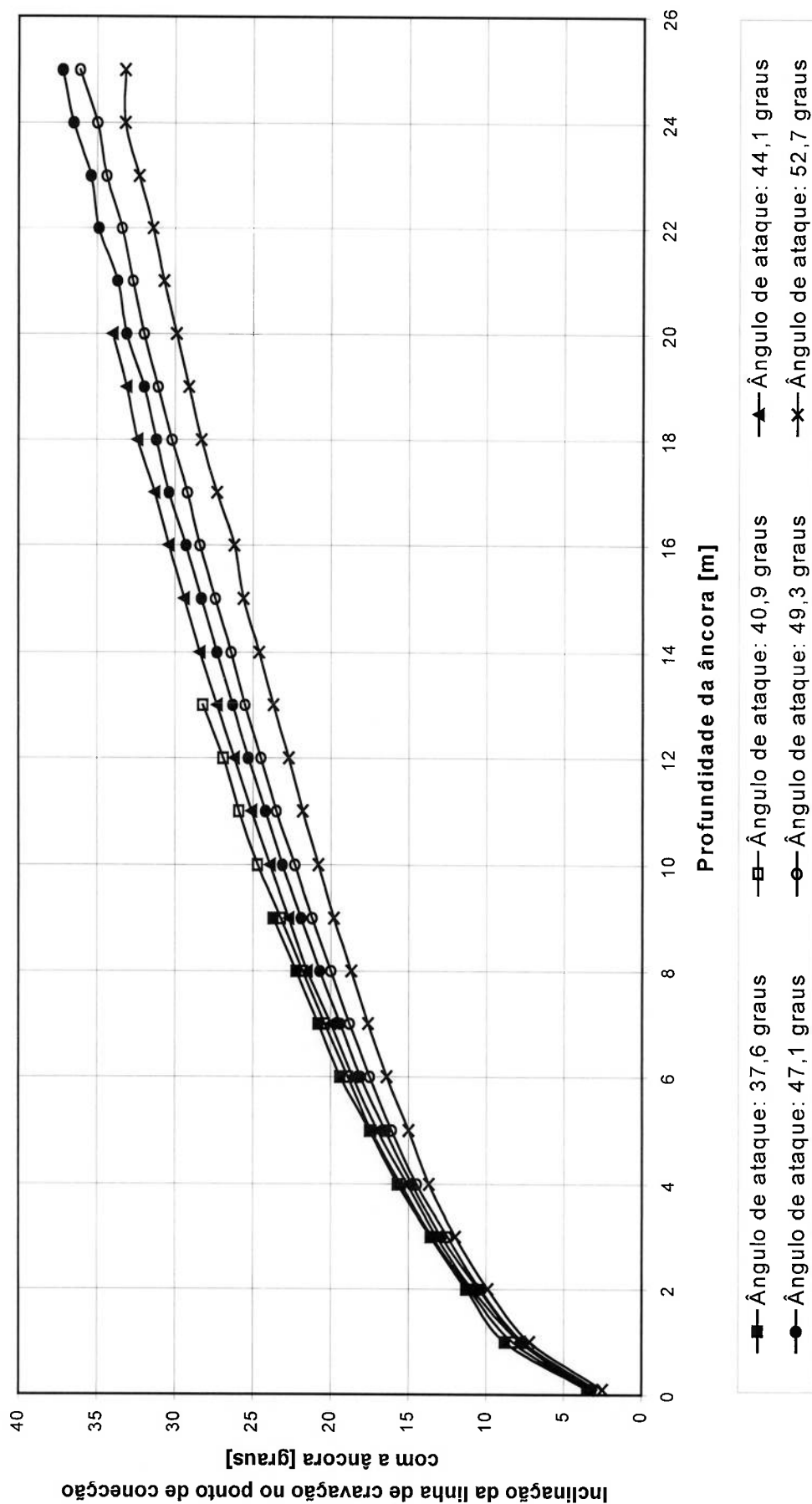


FIGURA 2.28(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.

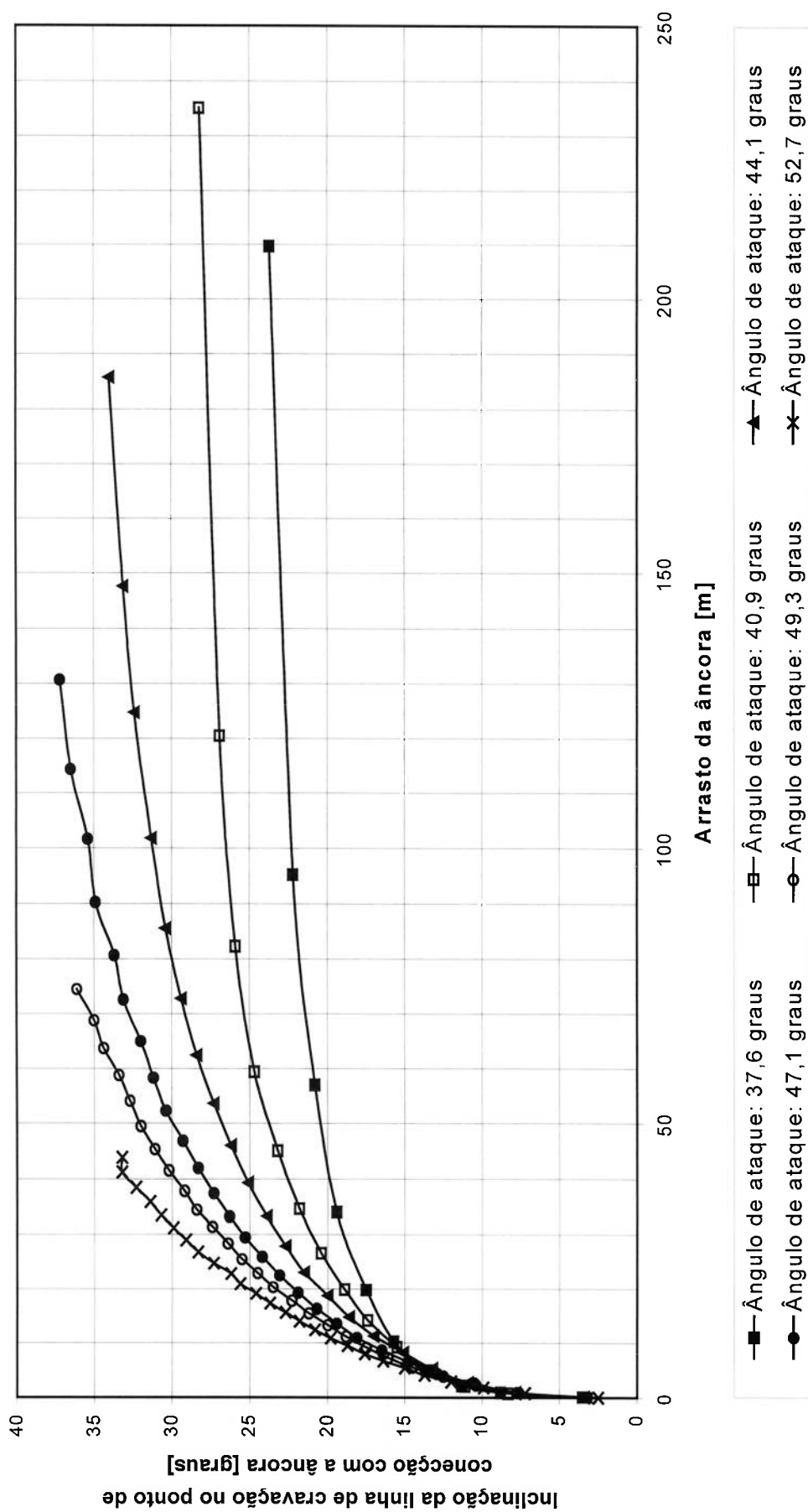


FIGURA 2.28(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.

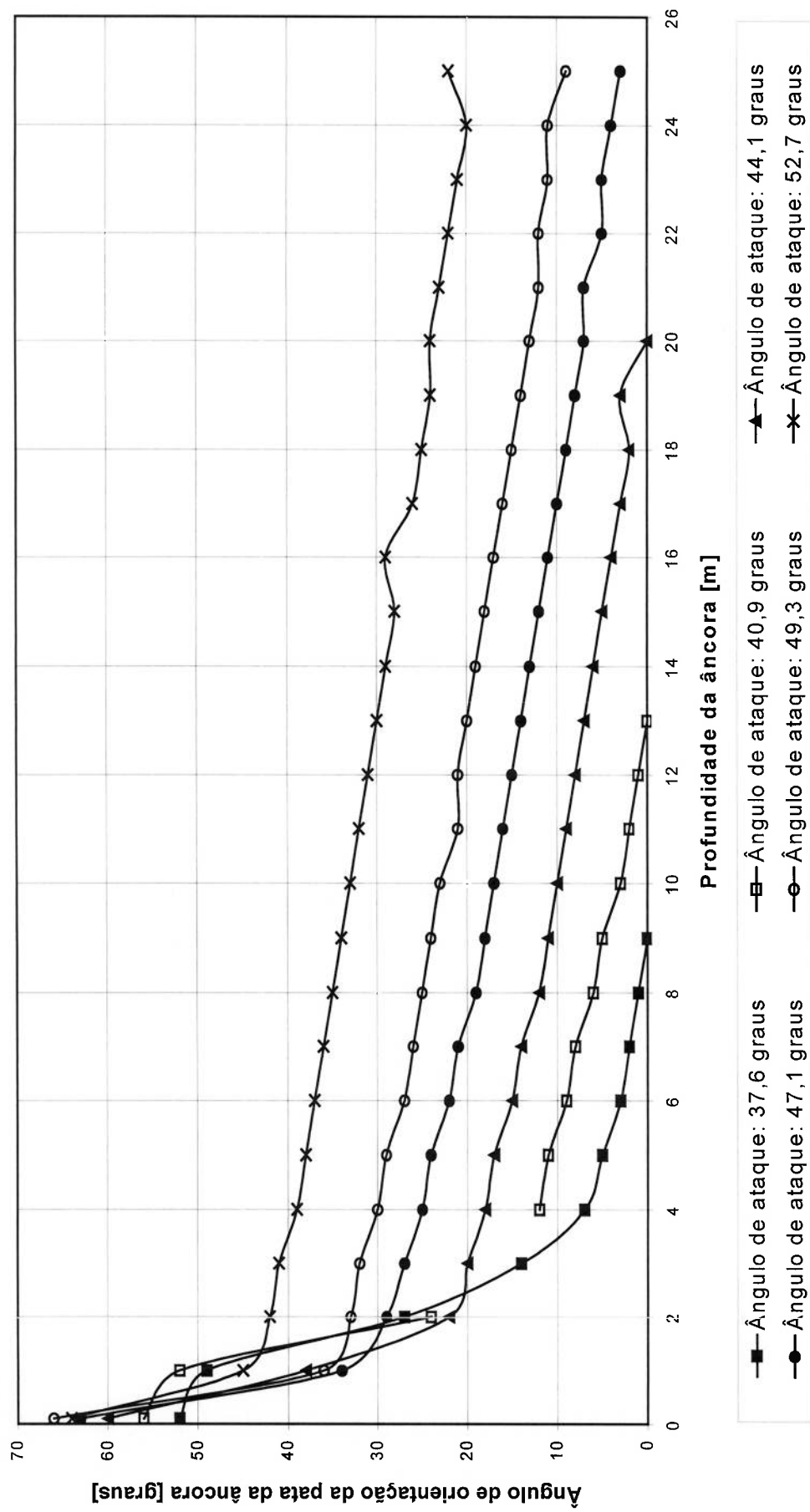


FIGURA 2.29(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.



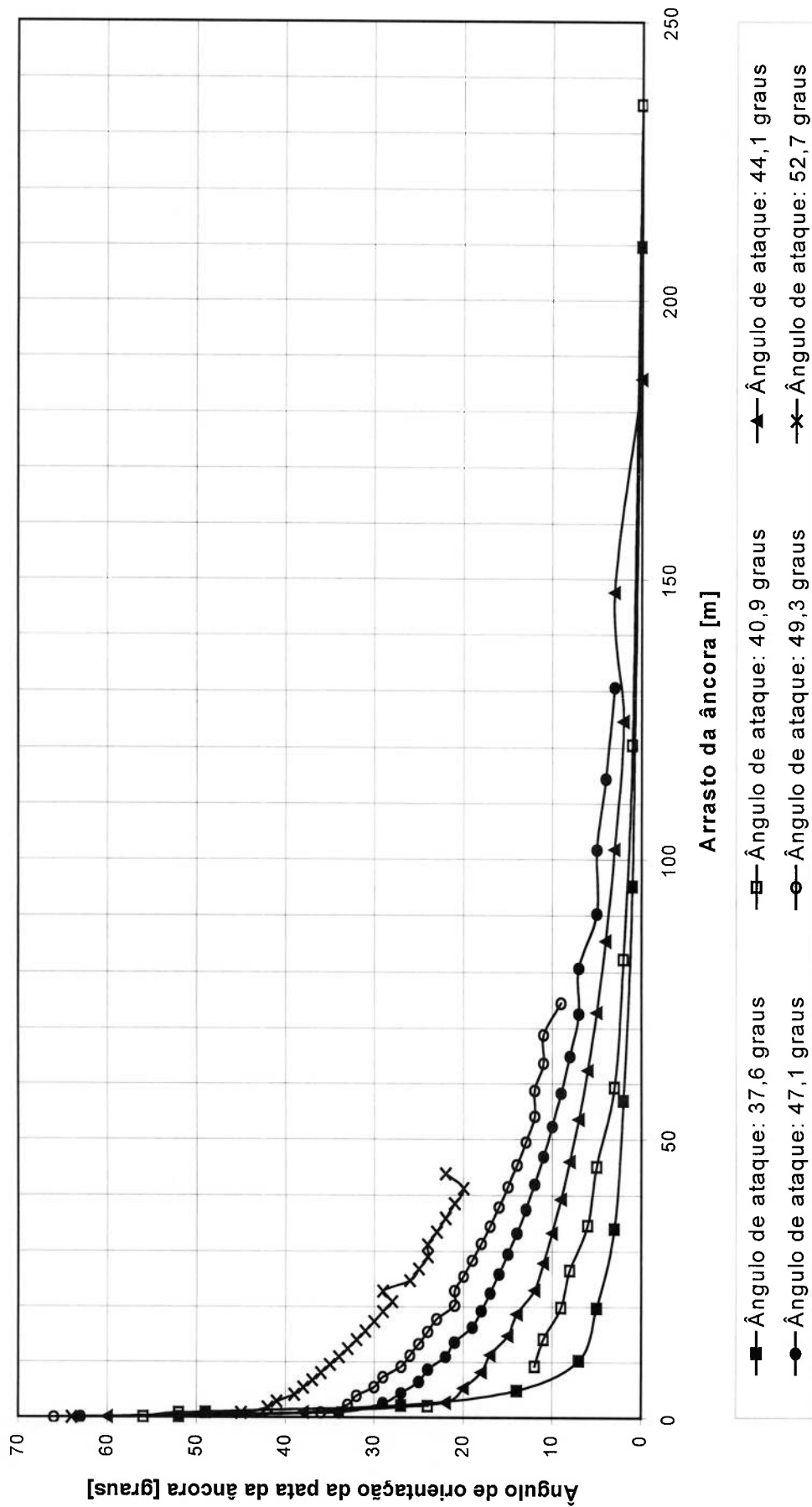


FIGURA 2.29(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S1.

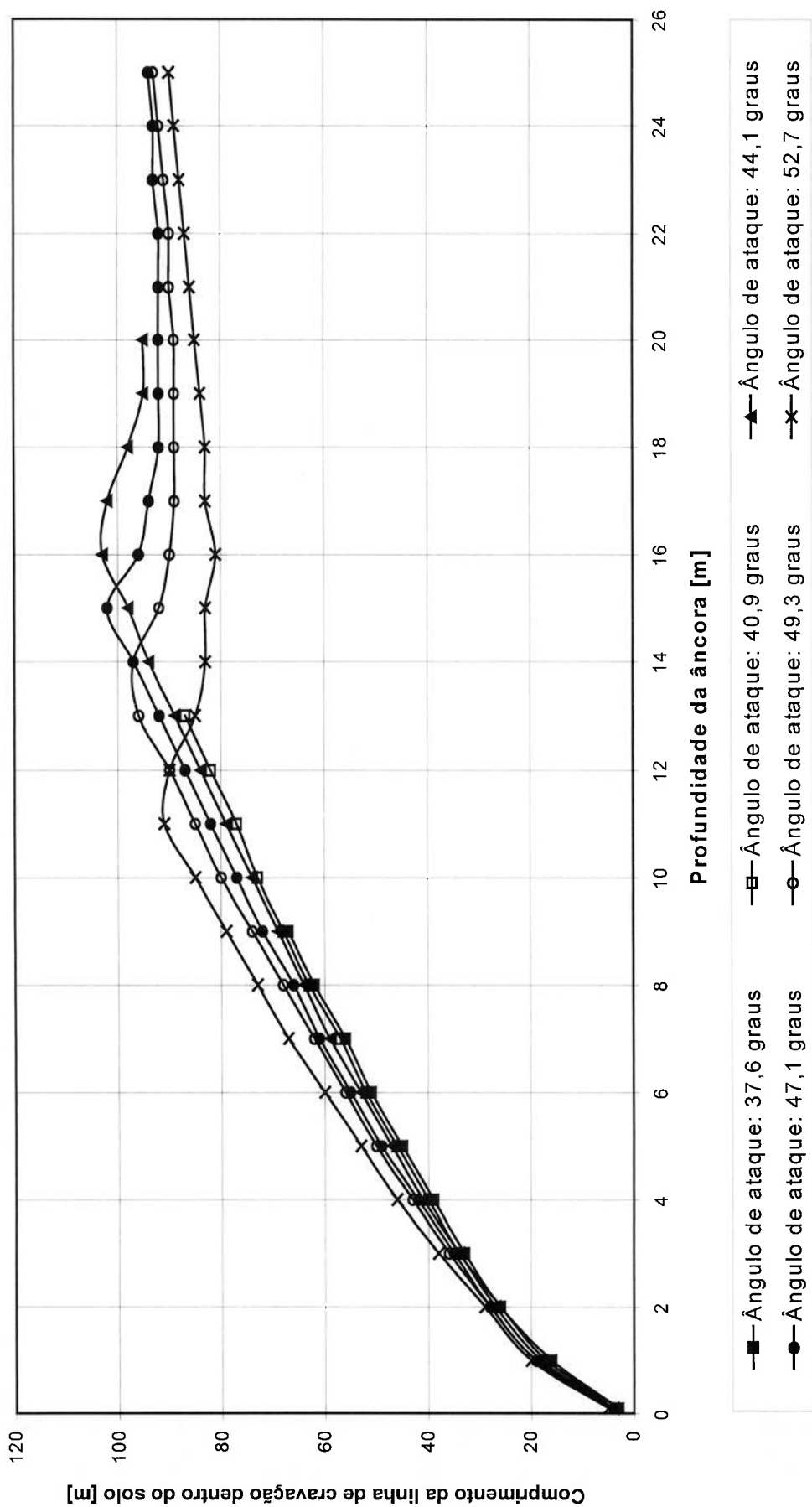


FIGURA 2.30 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Comprimento da linha de cravação dentro do solo x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.

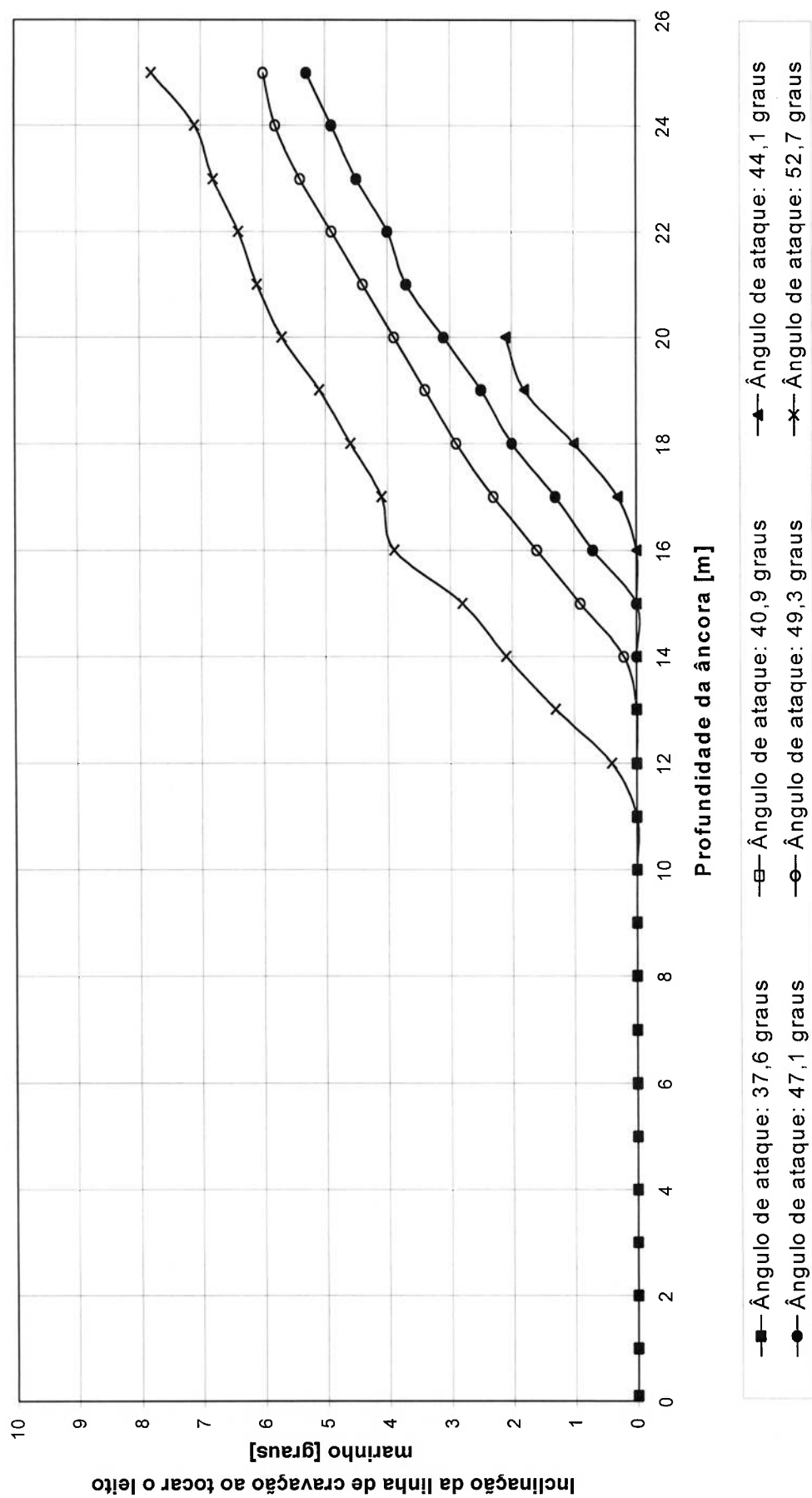


FIGURA 2.31 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação ao tocar o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S1.

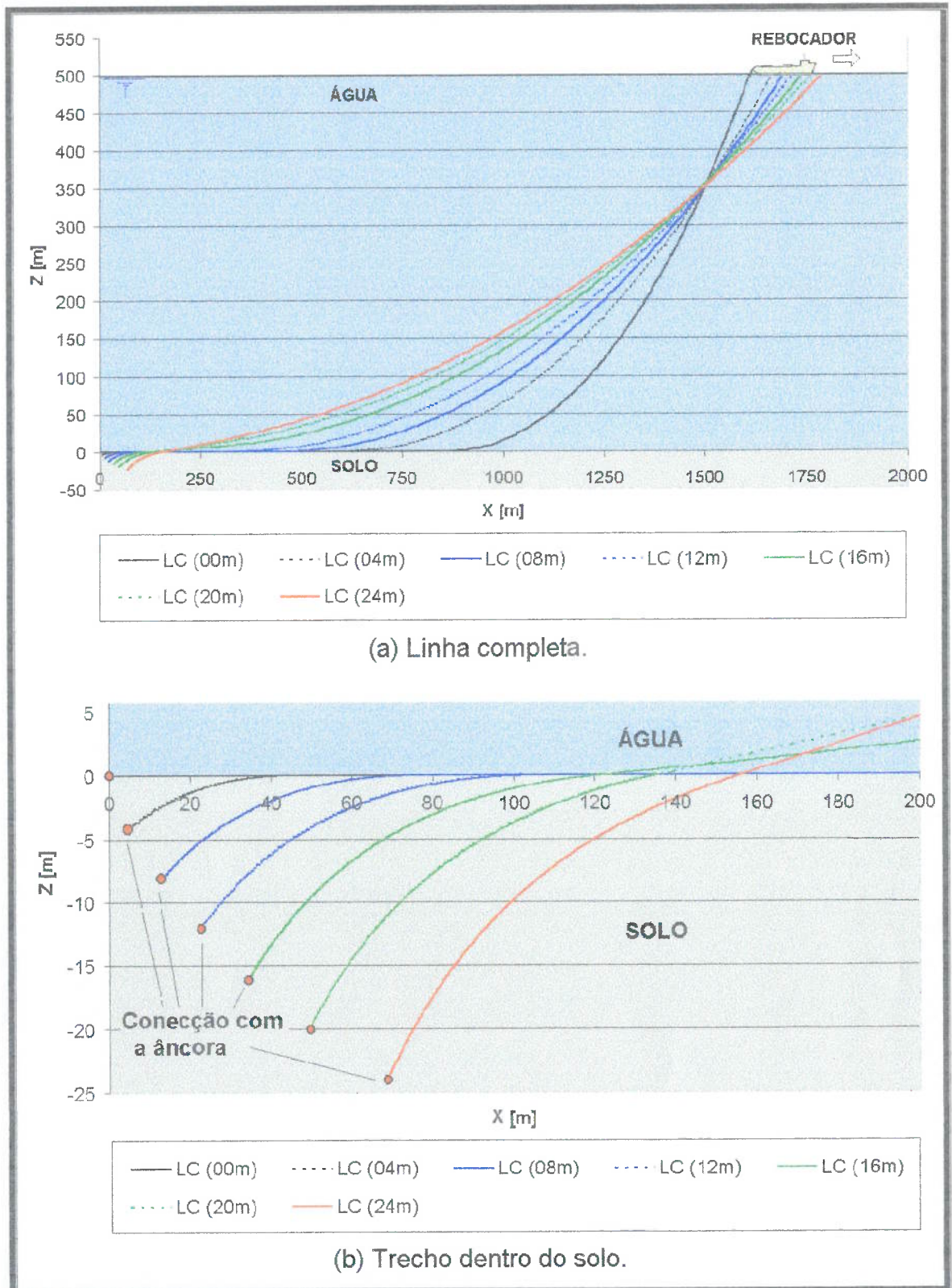


FIGURA 2.32 - Modelo Computacional da âncora CENO-ROF de  $10\text{m}^2$ : Configuração geométrica da linha de cravação para o ângulo de ataque de  $49,3$  graus, em função da profundidade da âncora.

#### **2.4.2 S2: Influência do Apêndice de Ré**

Para a série de simulações S2, são apresentadas, em função da profundidade do ponto de conexão da linha de cravação com a âncora CENOROF, a evolução das seguintes variáveis:

- O arrasto da âncora;
- A força aplicada na linha de cravação, na interface solo-água (*também apresentada em função do arrasto*);
- O ângulo de orientação da linha de cravação na conexão com a âncora (*também apresentado em função do arrasto*).
- O ângulo de orientação da pata da âncora (*também apresentado em função do arrasto*);

Observando-se a FIGURA 2.33, podemos notar que as trajetórias descritas pelas VLAs são altamente dependentes do tipo de apêndice presente em suas patas. Estes resultados mostram que o apêndice AP04 foi o que, para um mesmo arrasto, maximizou a profundidade de penetração da âncora. Em contrapartida, ao se observar as FIGURAS 2.34 (a) e (b), este mesmo apêndice maximizou os esforços presentes na linha de cravação, para uma mesma profundidade ou arrasto atingida pela âncora.

A tendência do crescimento do ângulo de inclinação da linha de cravação (já observada nos resultados do item anterior), em seu ponto de conexão com a âncora, conforme se aumenta sua profundidade, é novamente confirmada ao se observar a FIGURA 2.35 (a). Já a FIGURA 2.35 (b) mostra, de maneira ainda mais evidente, que o referido ângulo tende a se estabilizar ao redor de um valor (45 graus na figura), conforme se aumenta o arrasto,

confirmando as mesmas tendências observadas nas simulações analisadas anteriormente (série S1 de simulações).

A FIGURA 2.36 (a) mostra que a presença dos apêndices aumentam o ângulo de inclinação da pata da âncora, para uma mesma profundidade atingida pela mesma. Isto, naturalmente, tem sua lógica: a presença dos apêndices gera esforços adicionais, frutos da resistência do solo à sua penetração. Estes esforços geram momentos com relação ao ponto de conexão da linha de cravação com a âncora. Ora, sendo este ponto uma articulação, o momento nele gerado força a pata da âncora a adotar uma orientação ainda mais inclinada em relação a horizontal, conforme se processa sua movimentação solo adentro.

Este maior ângulo de orientação com relação à horizontal, talvez possa justificar os maiores esforços apresentados na linha de cravação - FIGURA 2.34 - para as configurações com apêndices. O mesmo comportamento também pode ser observado na série S1, analisada anteriormente: quanto maior o ângulo de ataque da âncora, tanto maiores eram as inclinações apresentadas, pela pata, para uma mesma profundidade de penetração - FIGURA 2.29 (a), e tanto maiores eram os esforços gerados na linha de cravação - FIGURA 2.27 (a).

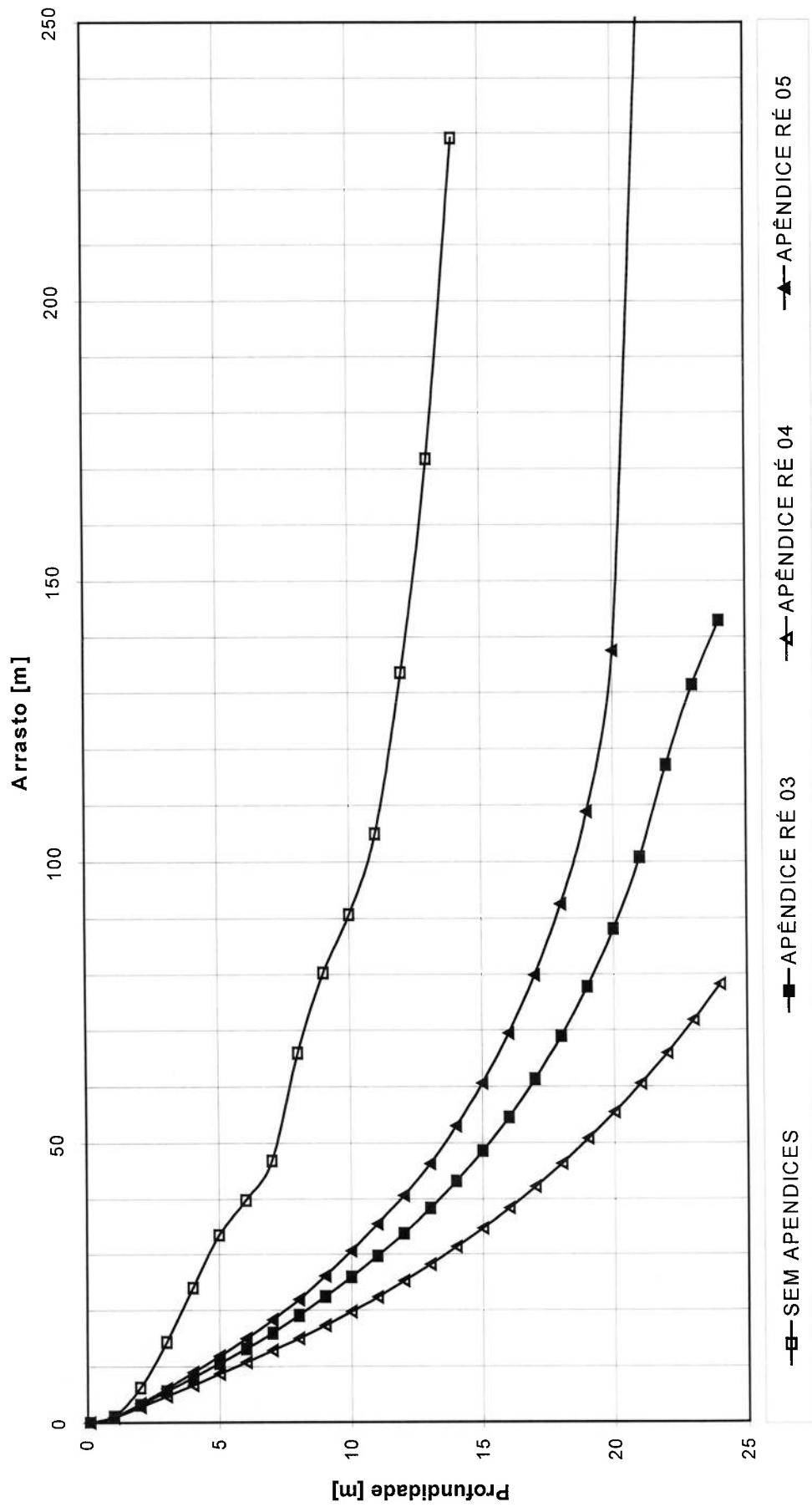


FIGURA 2.33 - Modelo computacional da âncora **CENO-ROF** de 10m<sup>2</sup>: Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.

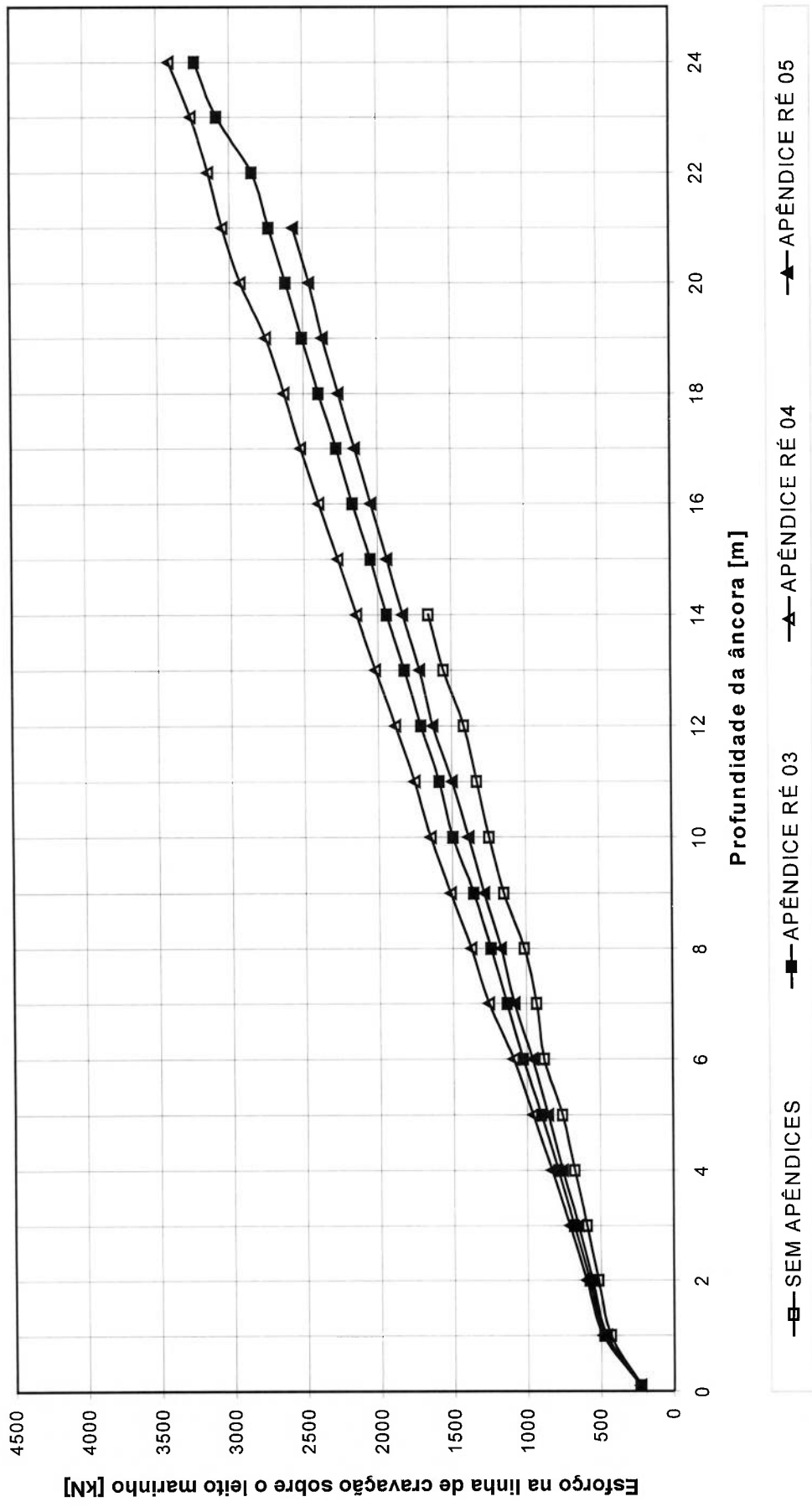


FIGURA 2.34(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S2.



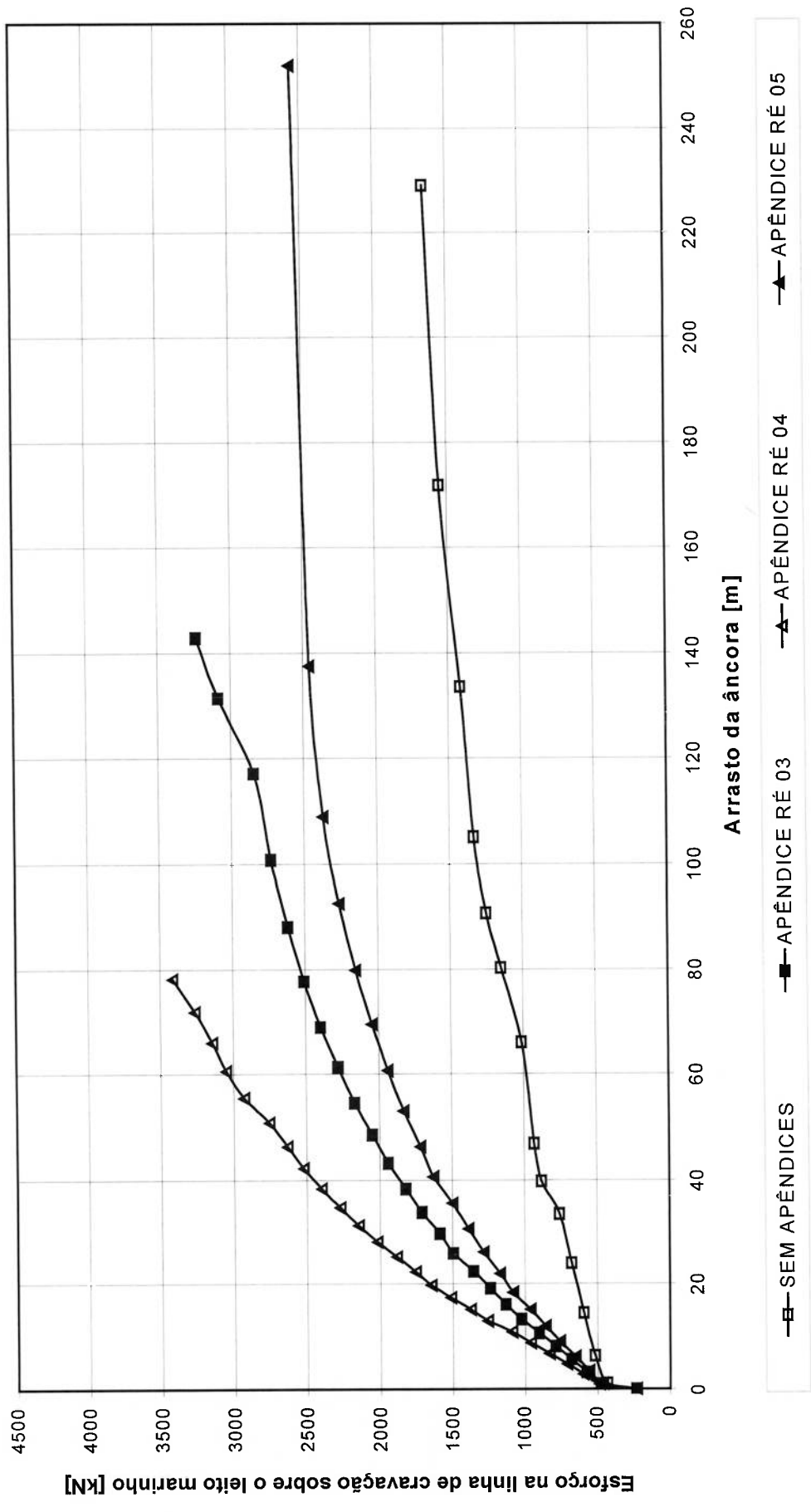


FIGURA 2.34(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.

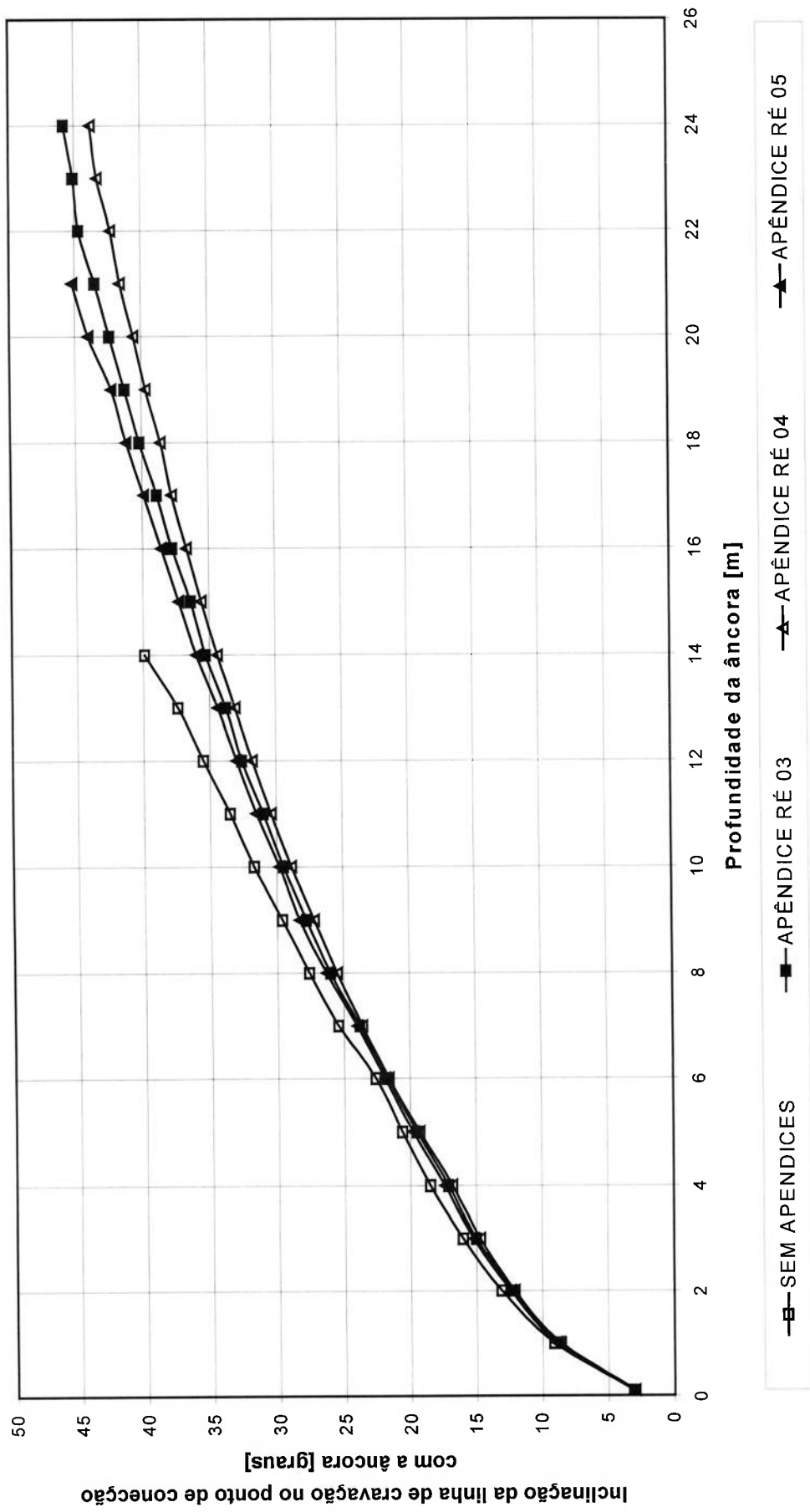


FIGURA 2.35(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S2.

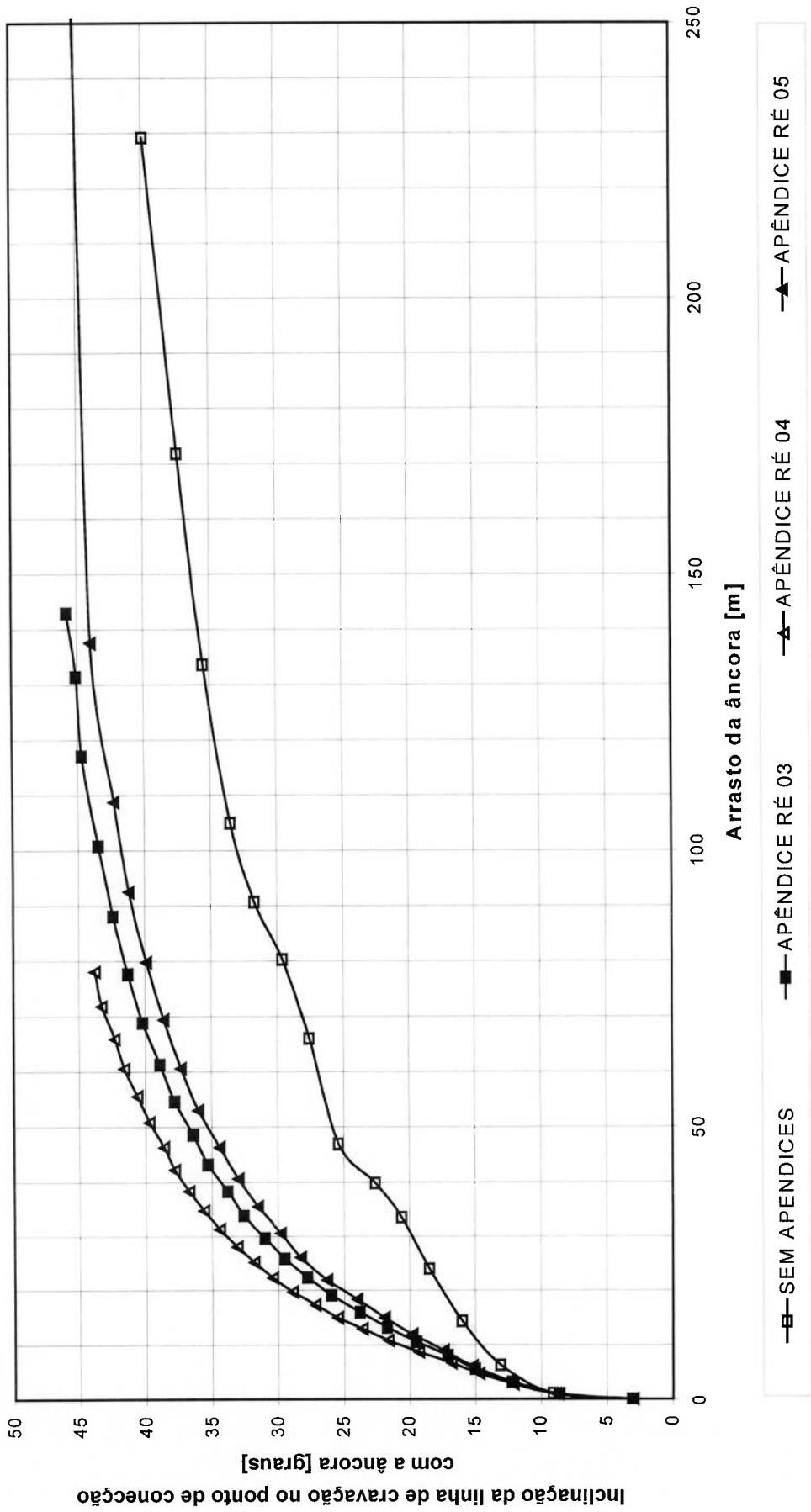


FIGURA 2.35(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.

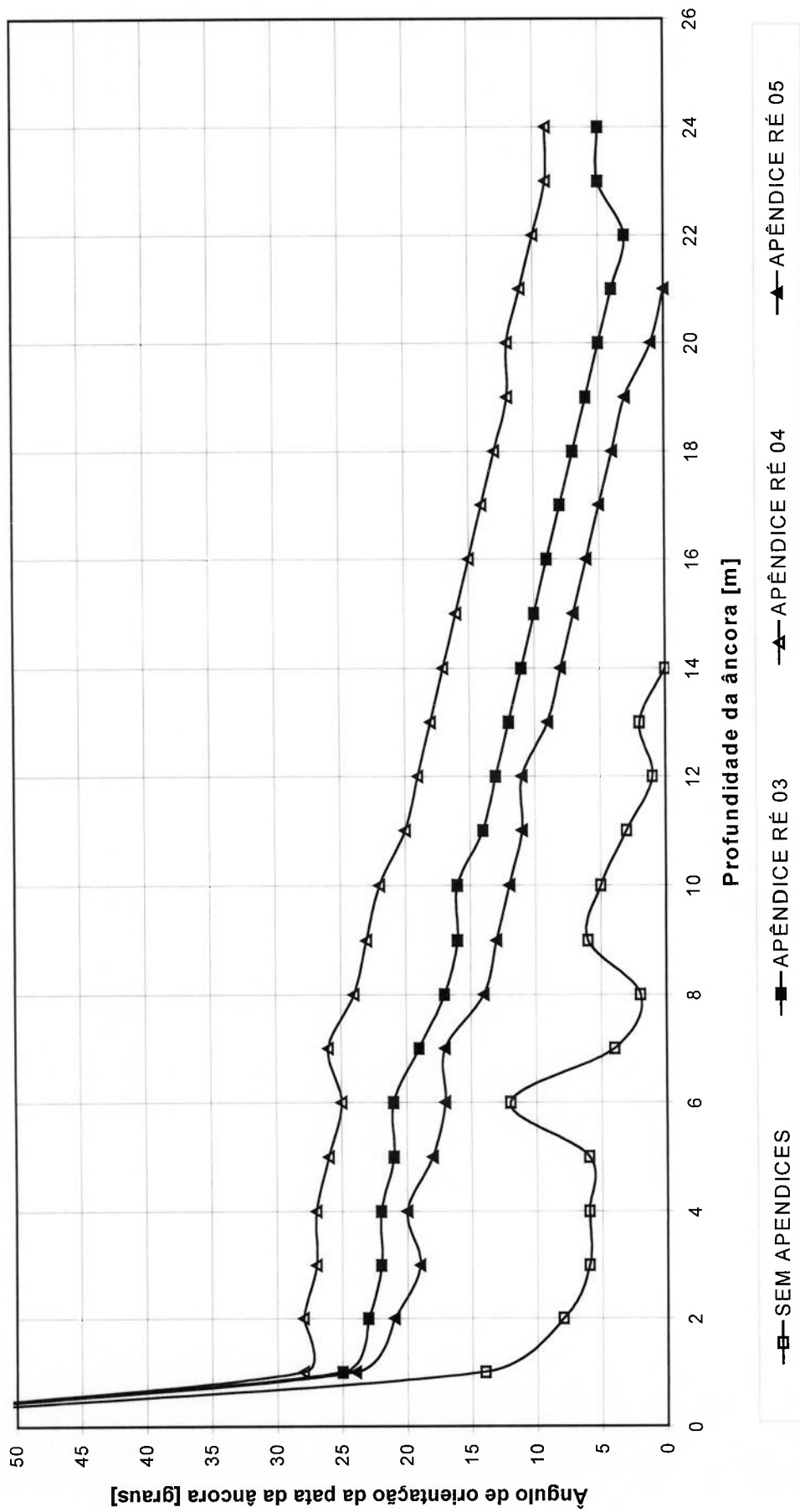


FIGURA 2.36(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S2.

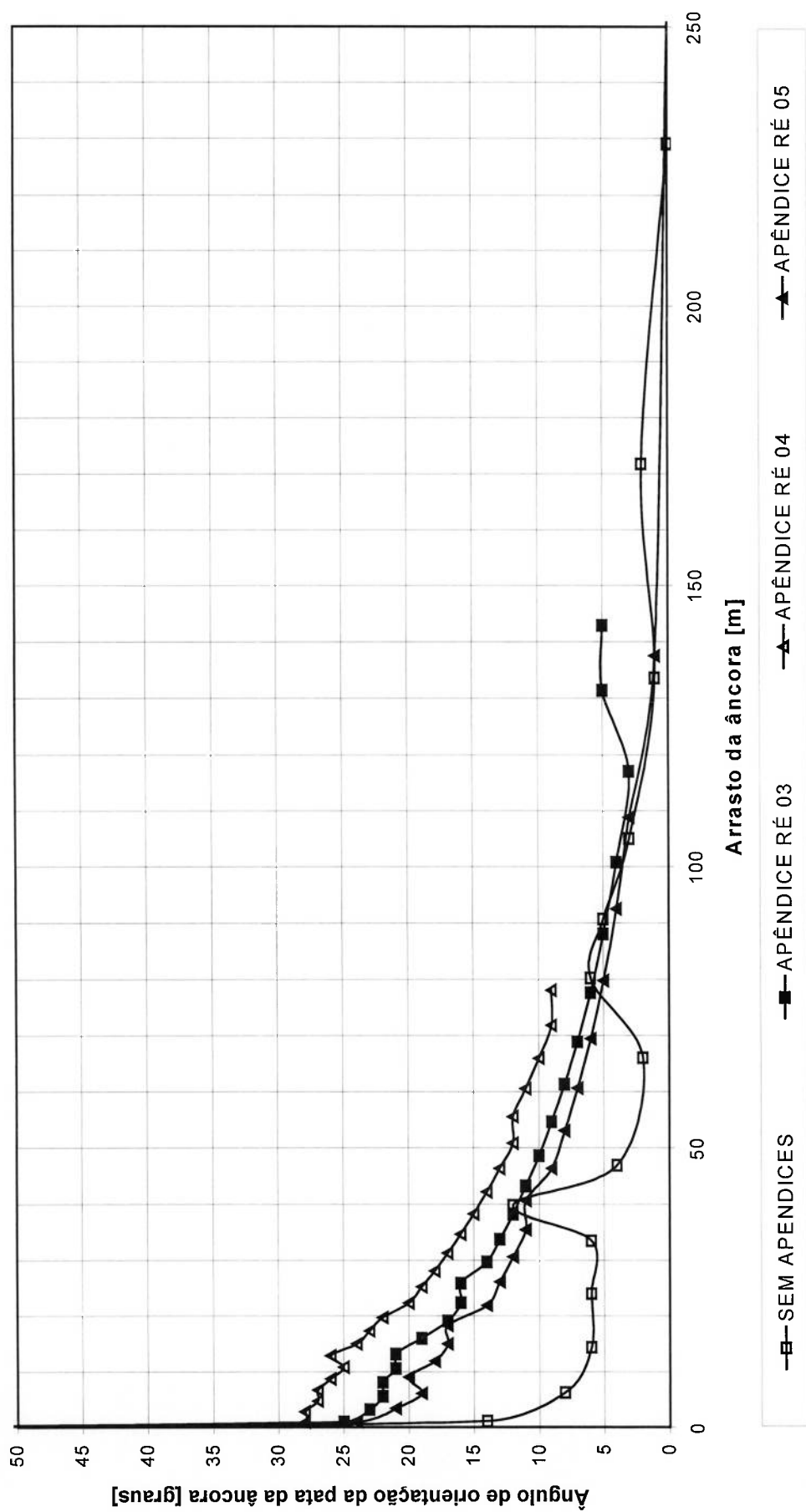


FIGURA 2.36(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S2.

### **2.4.3 S3: Influência da Linha de Cravação**

#### *2.4.3.1 S3.1: Influência do Fore-Runner*

Para a série de simulações S3.1, são apresentadas, em função da profundidade do ponto de conexão da linha de cravação com a âncora **CENO-ROF** em escala real, a evolução das seguintes variáveis:

- O arrasto da âncora;
- A força aplicada na linha de cravação, na interface solo-água;
- O ângulo de orientação da linha de cravação na conexão com a âncora;
- O ângulo de orientação da pata da âncora (*também apresentado em função do arrasto*);
- O ângulo de orientação da linha de cravação ao tocar o leito marinho.

Os resultados das simulações desenvolvidas revelam que, para um mesmo arrasto considerado da âncora **CENO-ROF**, o fore-runner composto por cabo de aço maximiza a profundidade de penetração da âncora, conforme mostra a FIGURA 2.37. Esta tendência já foi observada nos testes em mar, e nas simulações desenvolvidas com a âncora **DENLA MK3** (a ser visto mais adiante no capítulo 5 - FIGURA 5.1). O fore-runner de cabo de aço também minimiza os esforços presentes na linha de cravação, de modo que, para um mesmo esforço, esta configuração maximiza a profundidade de penetração da âncora no solo, conforme mostrado na FIGURA 2.38.

A justificativa do comportamento apresentado pela âncora **CENO-ROF**, cuja configuração foi a mesma para as duas simulações realizadas, reside na

própria linha de cravação. A configuração de fore-runner com amarras oferece uma maior resistência a penetração no solo do que a configuração com cabo de aço. Ou seja, a forma em catenária invertida é mais acentuada para o caso da configuração com amarras, fazendo com que a inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora seja maior, conforme comprova a FIGURA 2.39.

A configuração de fore-runner com amarra, ao aumentar a inclinação da linha de cravação no referido ponto, antecipa a profundidade de horizontalização da âncora, conforme nos mostram as FIGURAS 2.37 e 2.40.

A FIGURA 2.41 tem por objetivo mostrar que o comportamento apresentado pelas duas configurações de fore-runner não foi influenciado por um aumento do ângulo que a linha de cravação forma ao tocar o leito marinho. Muito pelo contrário. Conforme nos mostra a figura, esse ângulo manteve-se nulo durante todo o andamento da cravação. Isto só foi conseguido, graças ao aumento do comprimento da linha de peso, de 1500m, como vinha normalmente sendo empregado para os ensaios anteriores, para 2500m, conforme consta nas especificações destes ensaios - item 2.3.3.1 desta dissertação.

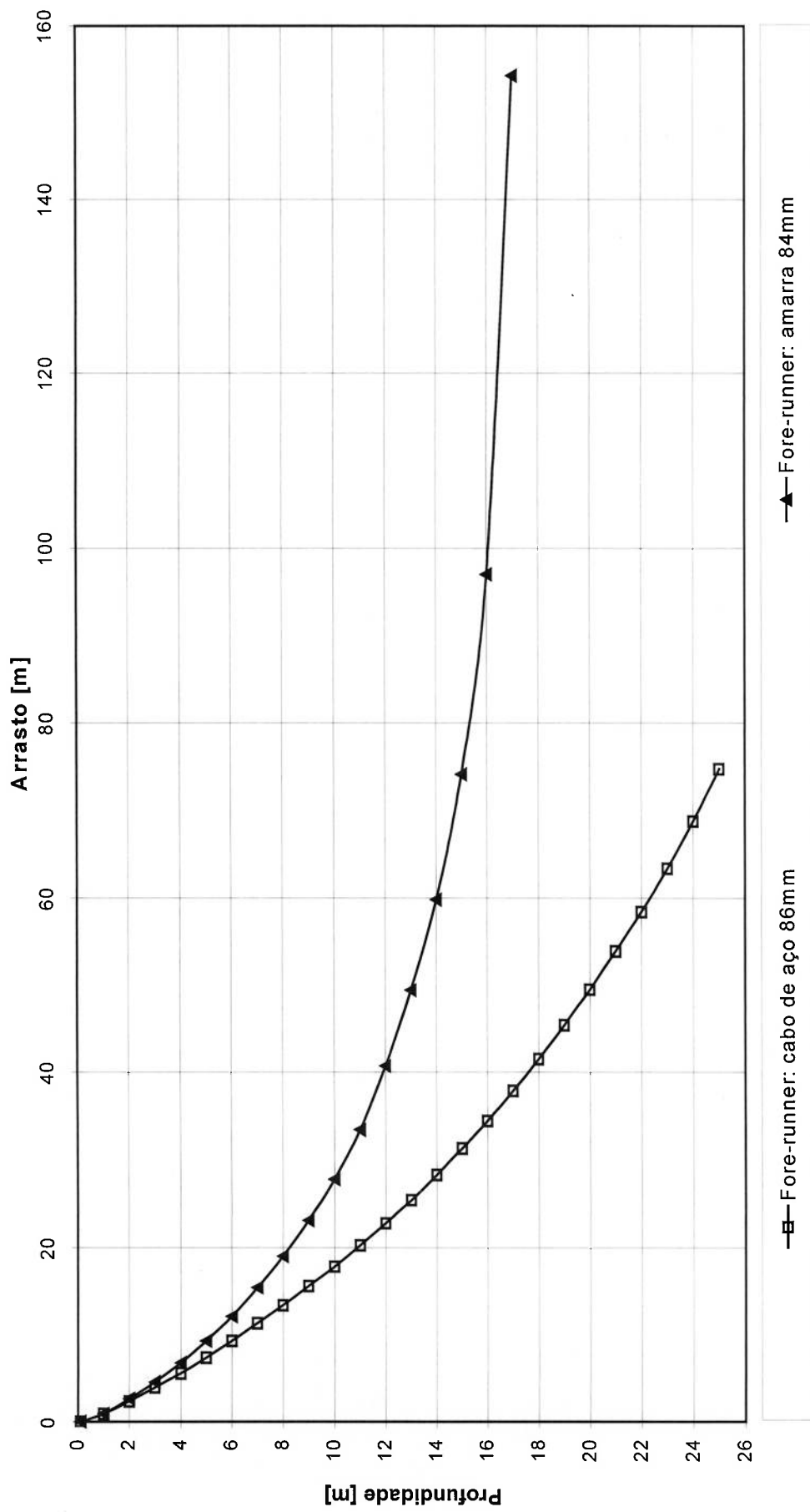


FIGURA 2.37 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.



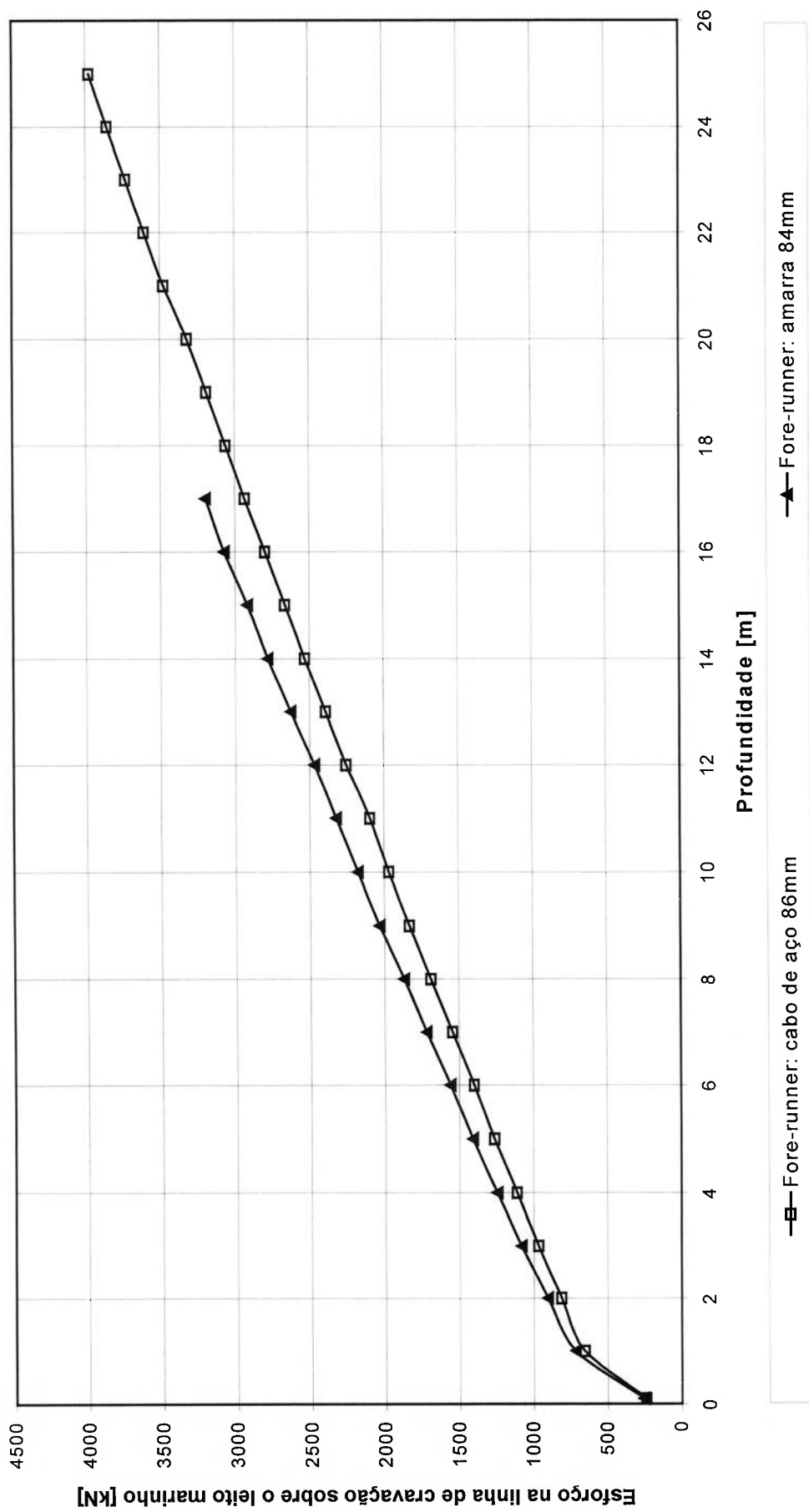


FIGURA 2.38 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.

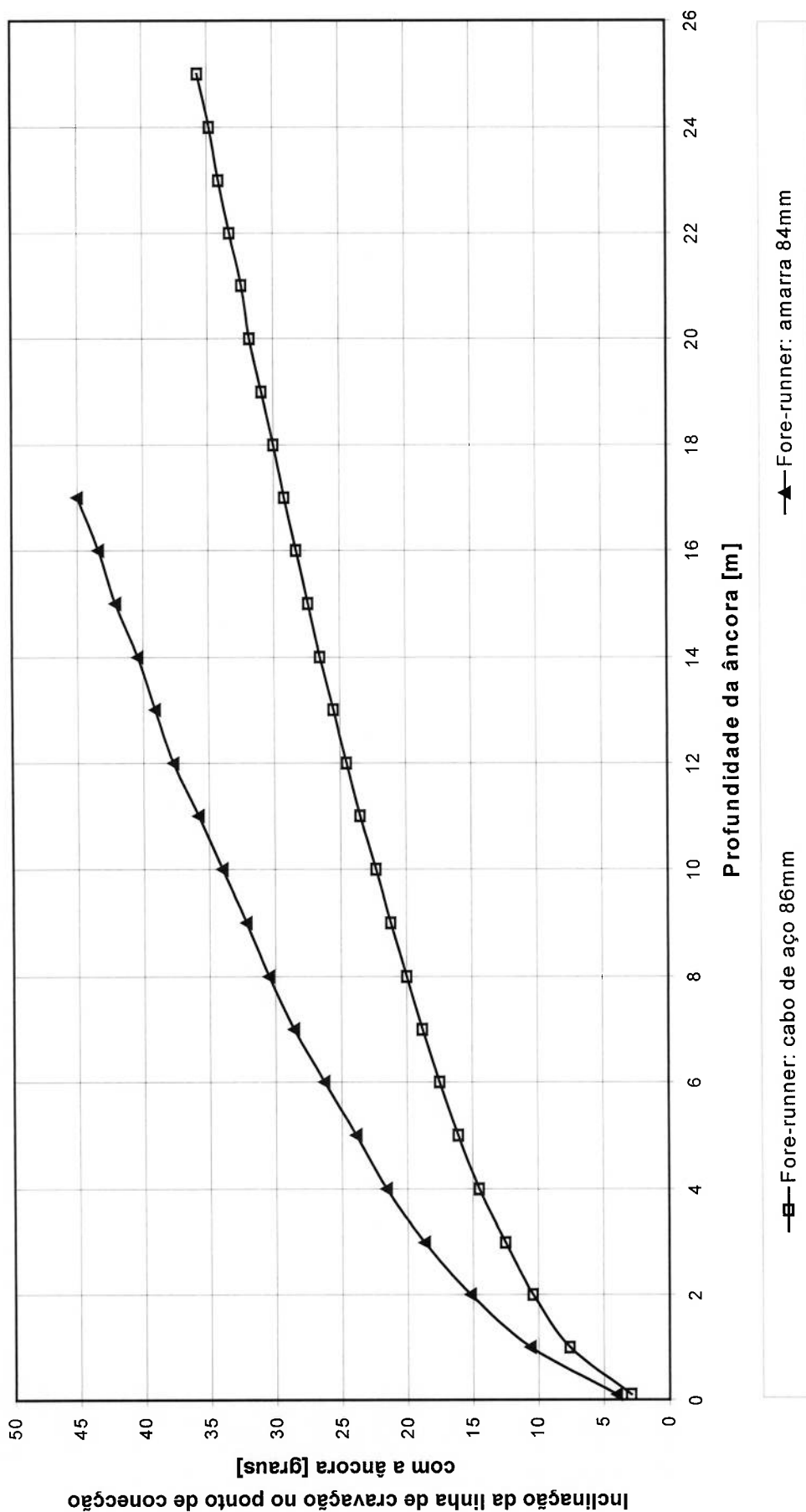


FIGURA 2.39 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.

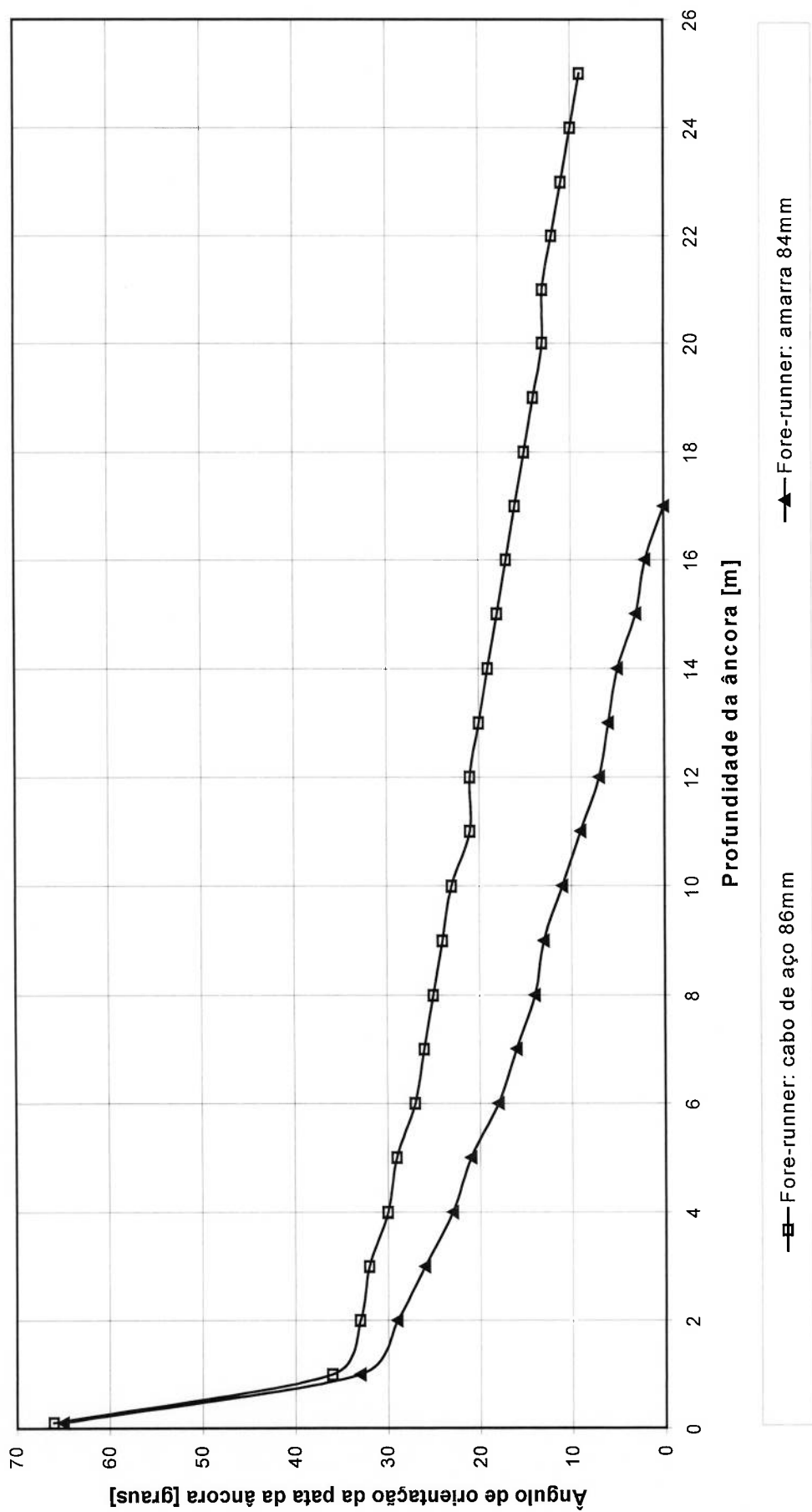


FIGURA 2.40(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.

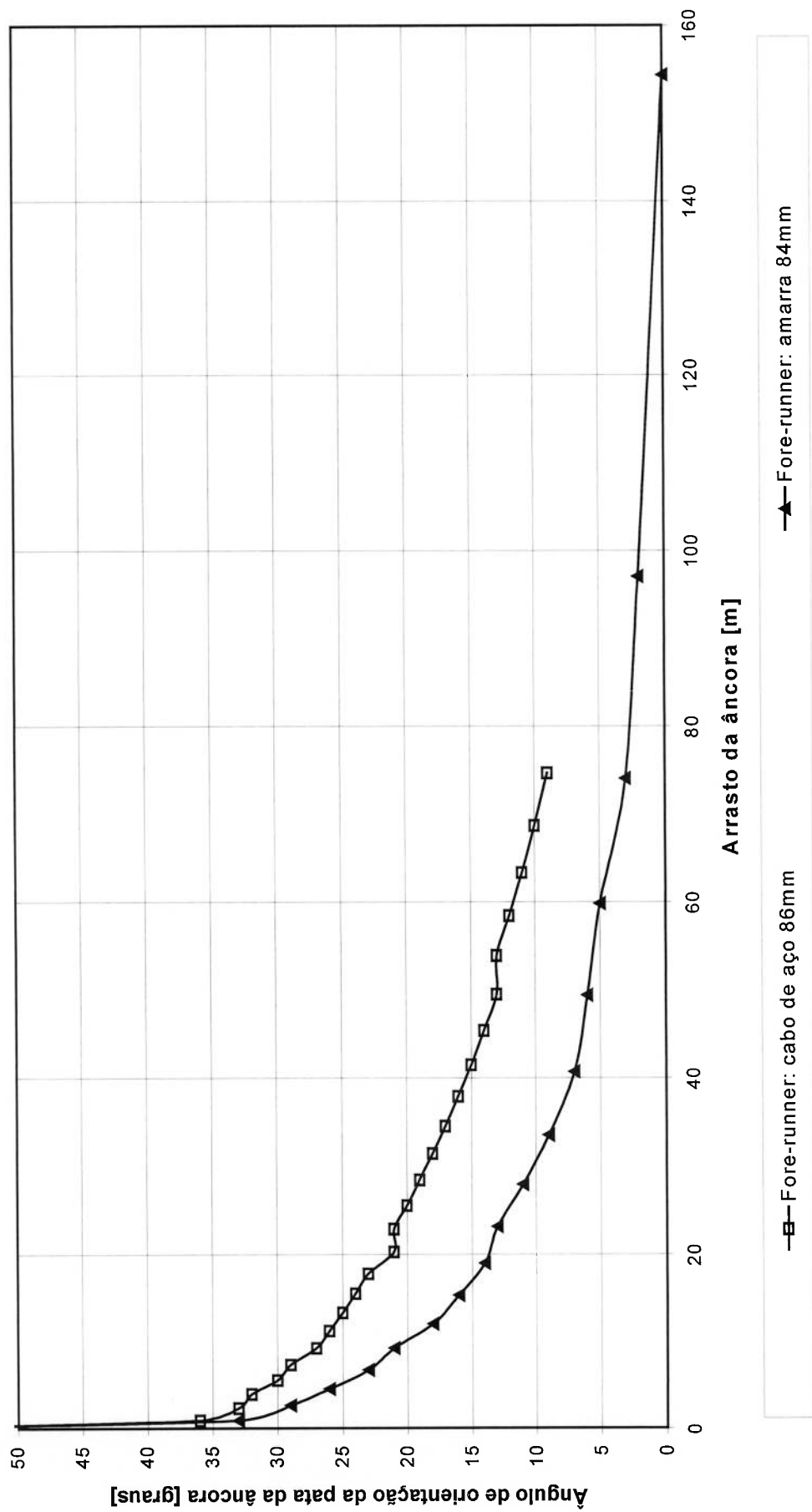


FIGURA 2.40(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.

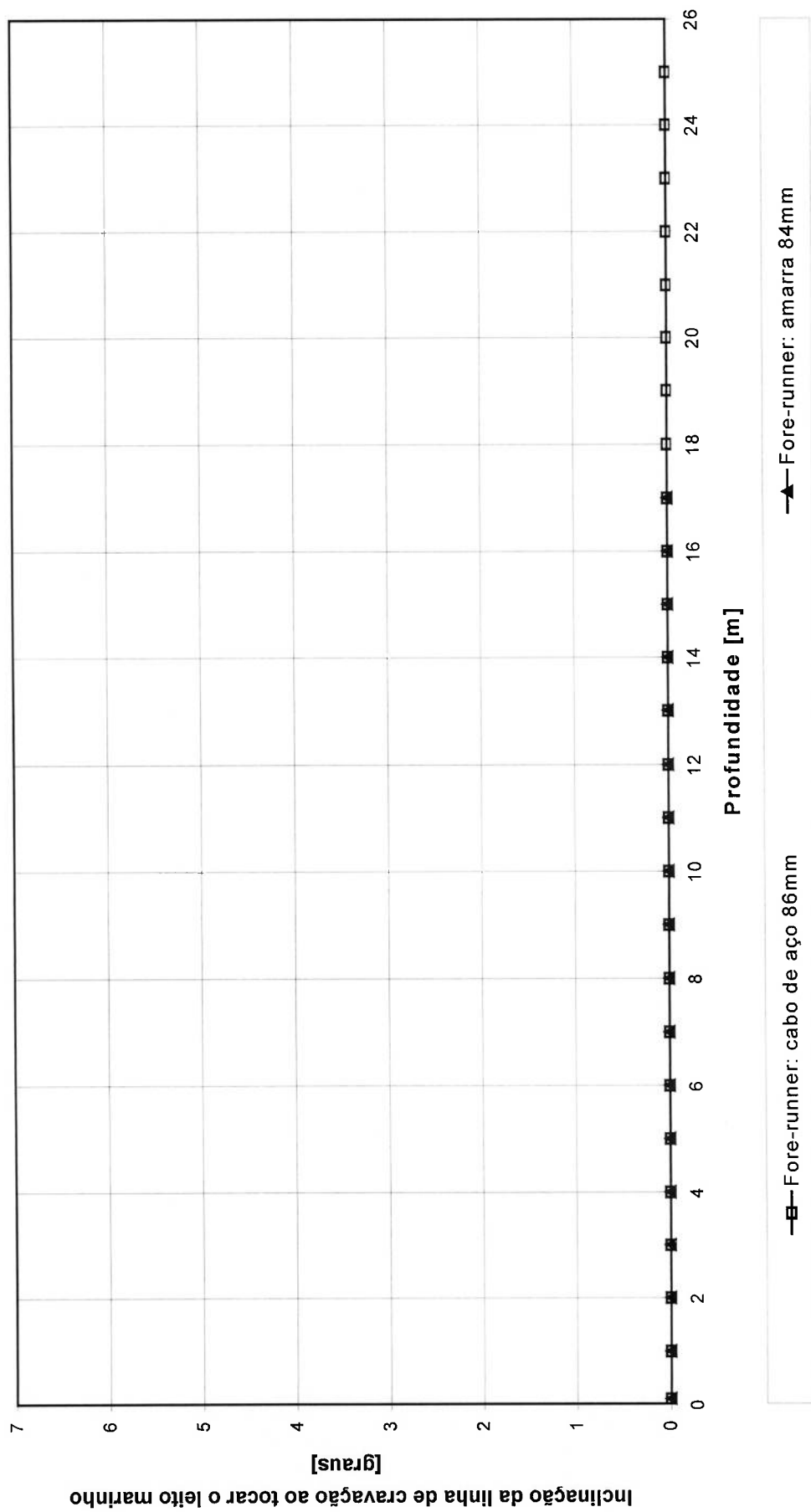


FIGURA 2.41 - Modelo computacional da âncora **CENO-ROF** de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação ao tocar o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.1.

#### 2.4.3.2 S3.2: *Influência da Inclinação da Linha de Cravação Sobre o Leito Marinho*

Para a série de simulações S3.2, são apresentadas, em função da profundidade do ponto de conexão da linha de cravação com a âncora **CENO-ROF** em escala real, a evolução das seguintes variáveis:

- O arrasto da âncora;
- A força aplicada na linha de cravação, na interface solo-água;
- O ângulo de orientação da linha de cravação na conexão com a âncora;
- O comprimento da linha de cravação dentro do solo marinho;
- O ângulo de orientação da linha de cravação ao tocar o leito marinho.

Os resultados das simulações desenvolvidas revelam que, para um mesmo arrasto considerado da âncora **CENO-ROF**, as configurações de linha de cravação com comprimento totais iguais a 2300m e 2800m, maximizam a profundidade de penetração da âncora, conforme mostra a FIGURA 2.42. Apesar disto, o comprimento total da linha de cravação não tem qualquer influência na taxa de crescimento do esforço presente na linha de cravação ao longo da profundidade da âncora, conforme mostra a FIGURA 2.43.

Neste ponto, é bom lembrar que a alteração do comprimento da linha de cravação se deu através da alteração do comprimento da linha de peso (vide definição no capítulo 1 - item 1.4.2), linha esta que não chega a penetrar no solo, ficando, quando muito, deslizando sobre sua superfície. O comprimento do fore-runner, por sua vez, se manteve inalterado para todas as linhas de cravação estudadas. Ou seja, como o trecho que corta o solo não

sofreu qualquer alteração, é natural que os esforços medidos neste trecho evoluam de maneira praticamente idêntica com o ganho de profundidade da âncora, conforme comprovado na FIGURA 2.43.

A diminuição do comprimento da linha de cravação antecipa a ocorrência do fenômeno de horizontalização da trajetória, conforme mostra a FIGURA 2.42. A curva "LC1300" (linha de cravação com 1300 metros de comprimento total), por exemplo, tem sua trajetória horizontalizada a somente 3 metros de profundidade, uma profundidade extremamente baixa no contexto analisado.

Isto pode ser justificado ao observarmos a evolução da inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora, através da FIGURA 2.44. A curva "LC1300" apresenta, para profundidade de 1 metro de penetração da âncora, o valor de 35 graus para o referido ângulo. E, conforme já citado anteriormente em 2.4.1, quanto maior o referido ângulo, tanto mais próximo se encontra a âncora de horizontalizar sua trajetória. E é exatamente o que acontece com todas as configurações analisadas: todas elas horizontalizam suas trajetórias para ângulos de inclinação da linha de cravação, no ponto de conexão com a âncora, entre os valores de 38 graus e 40 graus, conforme mostram as FIGURAS 2.42 e 2.44.

A FIGURA 2.46 mostra o motivo pelo qual o ângulo de inclinação da linha de cravação, no ponto de conexão com a âncora, apresenta crescimentos tão acelerados. Quanto menores são os comprimentos da linha de cravação, em especial da linha de peso (já que o comprimento do fore-runner é igual para todas as configurações de linha de cravação), tanto mais inclinadas ficam as linhas de cravação sobre o leito marinho, conforme a

âncora vai ganhando profundidade. A FIGURA 2.45 mostra que, quando a linha de cravação sobre o leito marinho começa a formar um ângulo diferente de zero com relação à superfície do mesmo, o comprimento da mesma linha, dentro do solo, sofre uma imediata redução, e passa a apresentar uma taxa de crescimento inferior a anterior, a medida que a âncora continua a ganhar profundidade.



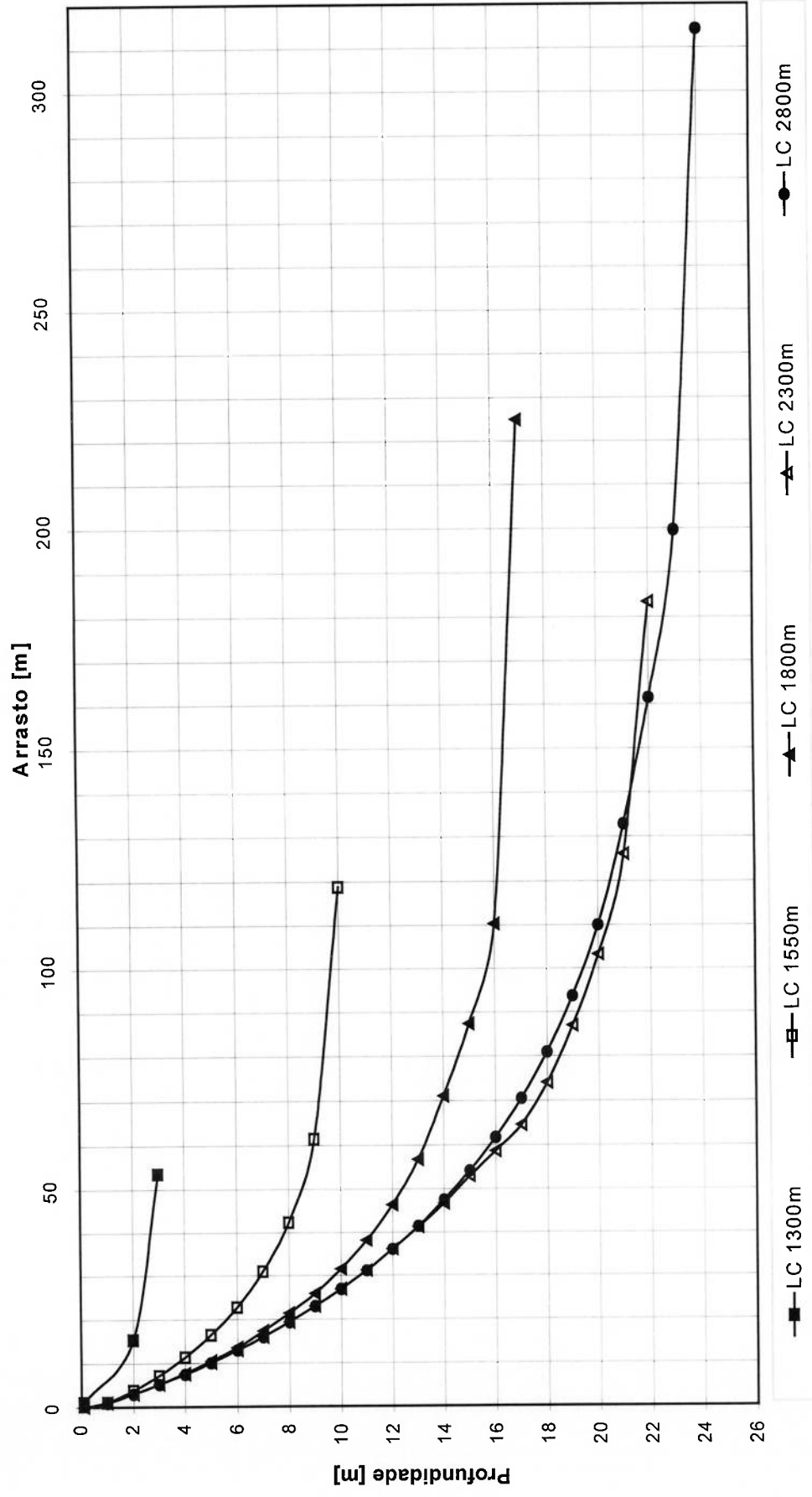


FIGURA 2.42 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.

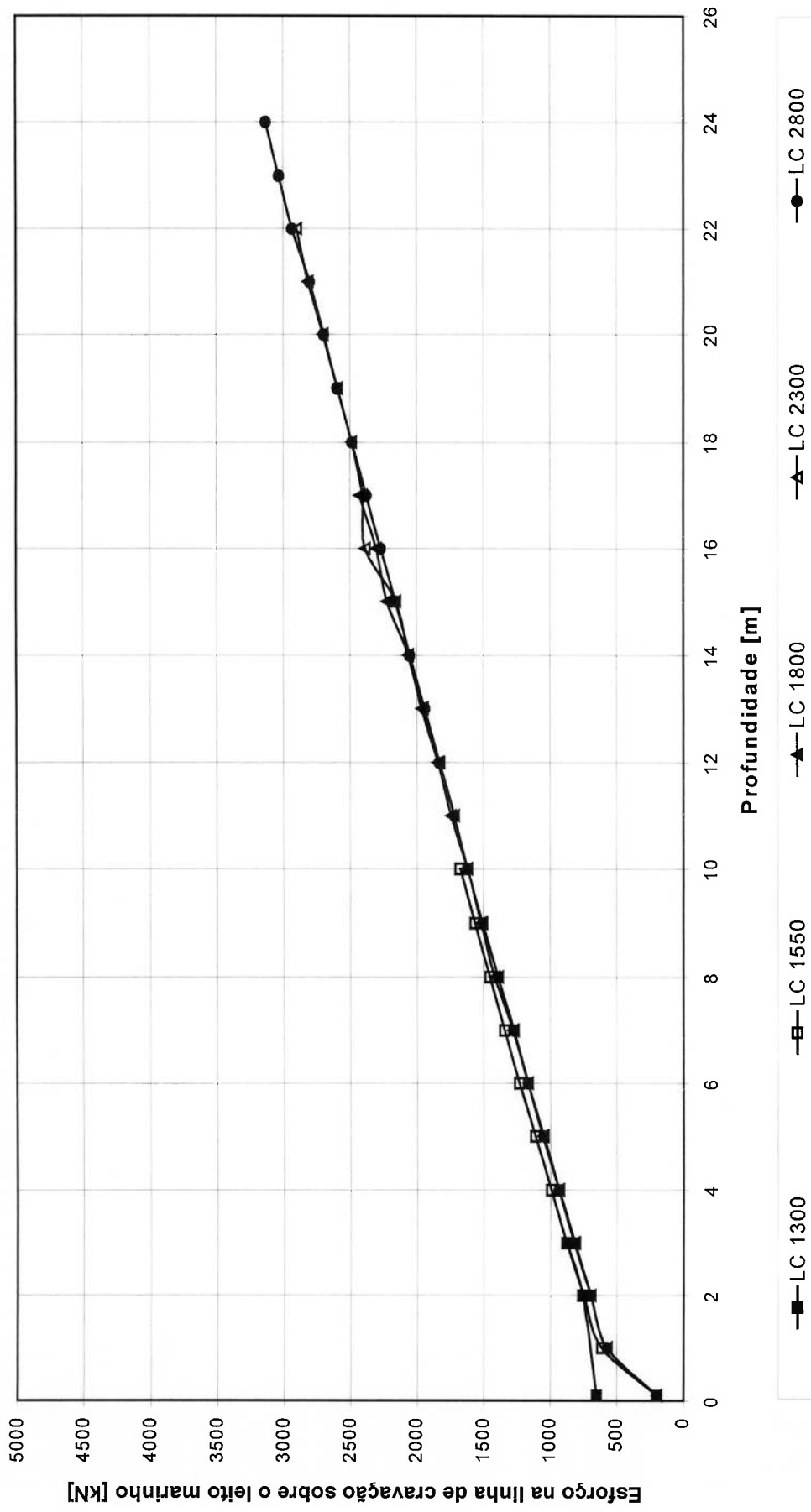


FIGURA 2.43 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m²: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.

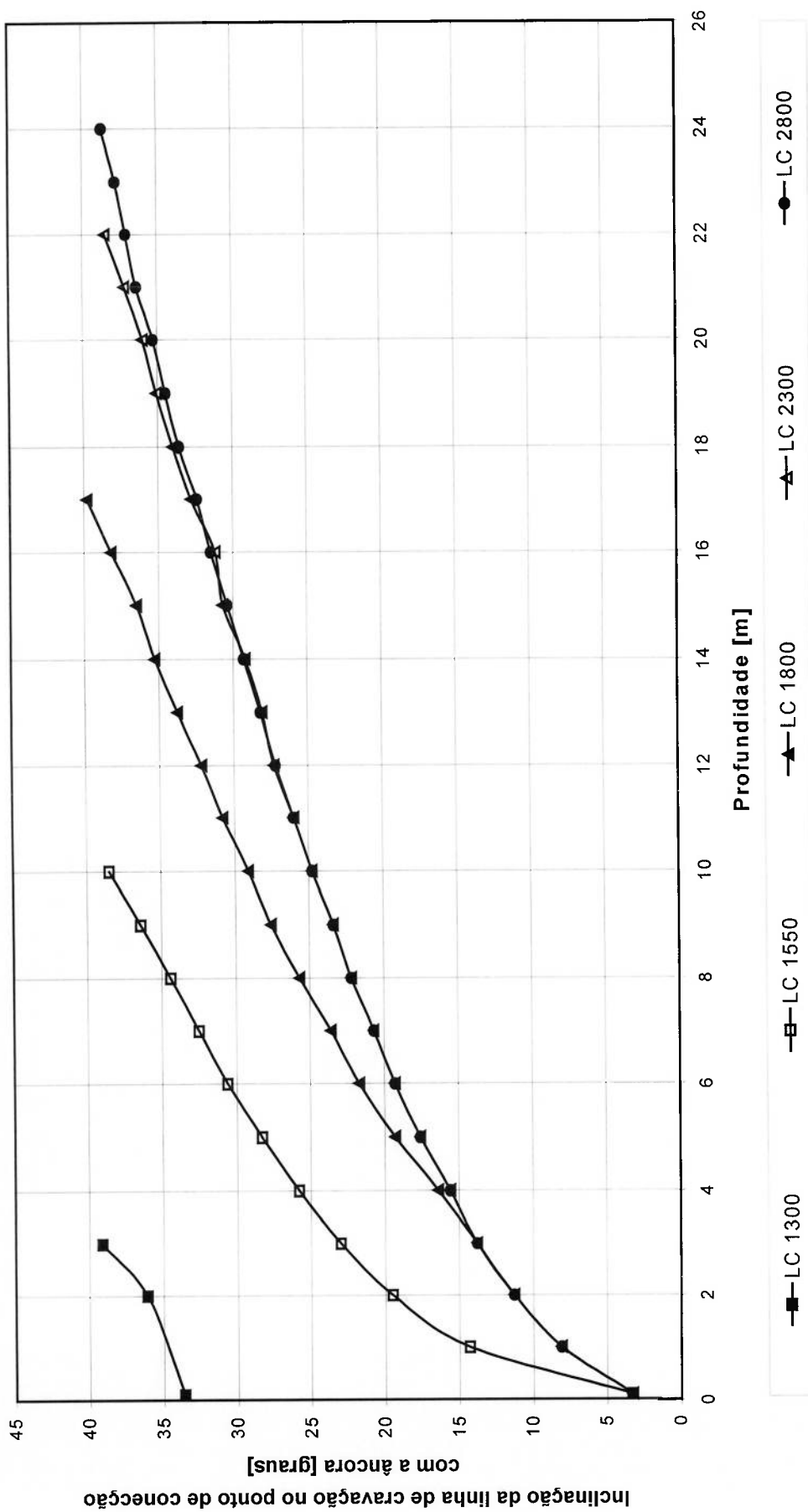


FIGURA 2.44 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.

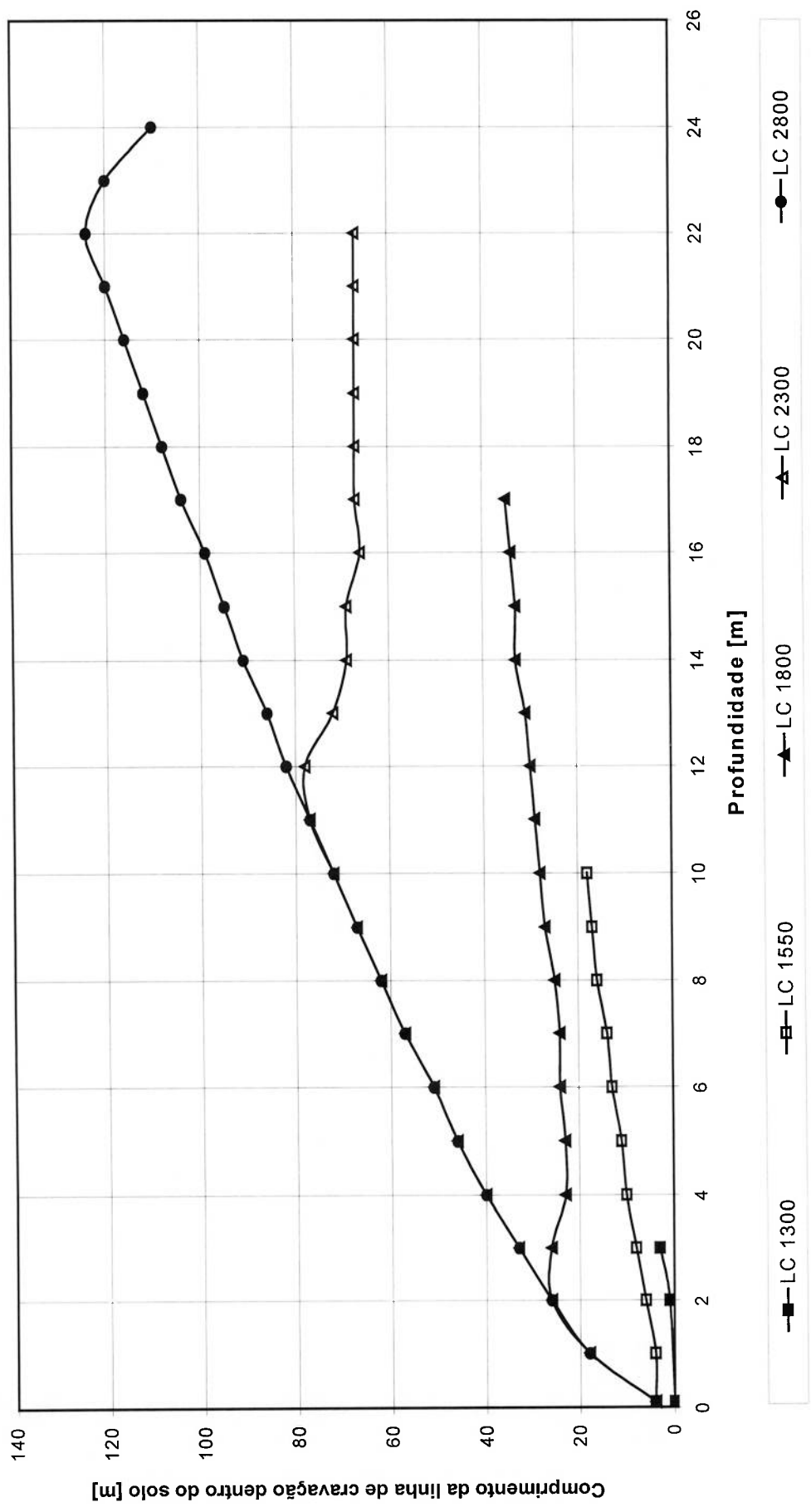


FIGURA 2.45 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Comprimento da linha de cravação dentro do solo x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.

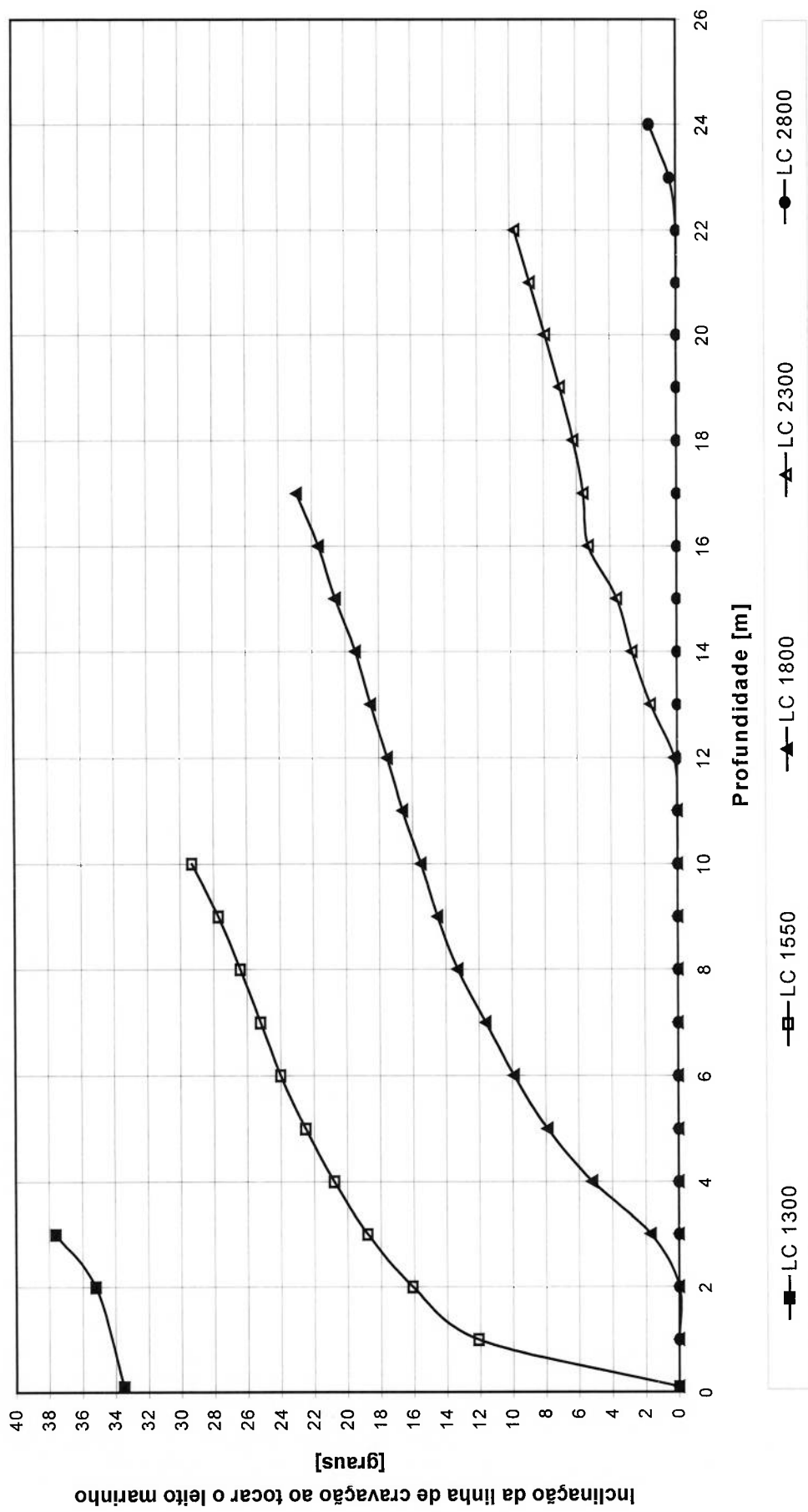


FIGURA 2.46 - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Inclinação da linha de cravação ao tocar o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S3.2.

#### **2.4.4 S4: Influência do Solo**

Devido a enorme quantidade de simulações realizadas nesta série (são 14 diferentes tipos de solos), os resultados foram agrupados em três conjuntos de gráficos, de modo a dar uma maior clareza em suas apresentações. Para cada conjunto, é apresentada, em função da profundidade do centro de gravidade da âncora **CENO-ROF** em escala real, a evolução do arrasto da âncora, da força aplicada na linha de cravação na interface solo-água e do ângulo de orientação da pata da âncora.

O motivo da mudança do ponto de monitoramento, passando da conexão da linha de cravação com a âncora para o centro de gravidade da pata da mesma se deve ao seguinte fato:

Quando a âncora encontra em seu caminho um trecho de solo de constituição diferente daquele na qual se encontrava (no caso das simulações com duas diferentes camadas de solo), é observada uma mudança de comportamento das variáveis acima citadas para a profundidade de transição dos solos. Se as variáveis citadas viessem a ser apresentadas como o vinham sendo nos itens anteriores, em função da profundidade da conexão com a âncora, isto iria acarretar uma certa confusão na interpretação dos dados. Quando a pata da âncora se encontrasse na faixa de transição, o ponto de conexão com a linha de cravação ainda se encontraria uns 4 metros acima deste (dimensão do cabresto). O gráfico estaria mostrando uma mudança de comportamento para uma profundidade defasada em 4 metros. Assim, de modo a não causar esta confusão, as variáveis citadas estão em função do centro de gravidade da pata da âncora.

Os resultados das simulações, em diferentes tipos de solo, permitem concluir, que as trajetórias da VLA estudada dependem essencialmente da variação das tensões de mobilização que o solo aplica sobre a âncora (item 2.1.1.3 desta dissertação), principalmente sobre sua pata. Estas tensões são fundamentalmente dependentes da resistência ao cisalhamento do solo no ponto de contato com a âncora.

A FIGURA 2.49 (a) mostra claramente que todas as cravações efetuadas em solos com tensões de cisalhamento constante apresentaram as mesmas trajetórias. Da mesma forma, todas as cravações efetuadas em solos com variações lineares de sua resistência ao cisalhamento apresentaram, novamente, trajetórias praticamente idênticas.

Com relação à evolução dos esforços na linha de cravação, a FIGURA 2.50 (a) mostra claramente que, as cravações efetuadas em solos com resistências ao cisalhamento constantes, apresentaram esforços constantes ao longo da profundidade de penetração da âncora, diferindo entre si apenas pela sua magnitude. Para as cravações efetuadas em solos cujas resistências ao cisalhamento são linearmente dependentes da profundidade, os esforços presentes na linha de cravação também apresentaram uma evolução linearmente dependente da profundidade da âncora.

A FIGURA 2.49 (b) mostra o que acontece com a trajetória de uma âncora, quando a mesma é obrigada a penetrar num solo com duas camadas distintas entre si quanto à natureza de suas resistências ao cisalhamento. A figura mostra que, quando a âncora atinge um trecho de solo, onde a distribuição das tensões de mobilização aplicadas sobre a âncora são maiores do que costumavam ser, ou seja, quando a âncora passa de trecho de solo

mais “mole” para um trecho mais “duro” (na figura representados por “SU=[10{0-12m} ; 55 {25m}] KPa” e “SU=[5{0-12m} ; 10{13-25m}] Kpa”), sua trajetória sofre imediata modificação, tal que, quanto mais duro for o solo para as profundidades a serem penetradas, tanto maior será o ganho de profundidade para os futuros trechos de arrasto considerados, com relação aos anteriormente apresentados.

Para a situação inversa, ou seja, quando a âncora passa de um solo mais “duro” para outro mais “mole” (na figura representados por “SU=[10{0-12m} ; 5{13-25m}] Kpa”), o inverso também acontece com a trajetória, que passa a apresentar um menor ganho de profundidade para os futuros trechos de arrasto, com relação aos anteriormente apresentados. A interpretação da evolução dos esforços na linha de cravação, com relação a FIGURA 2.50 (b), é uma combinação dos argumentos apresentados para a FIGURA 2.50 (a).

Finalmente, a FIGURA 2.49 (c) mostra a evolução da trajetória da âncora para três novas distribuições de cisalhamento do solo: uma exponencial, uma quadrática e outra logarítmica. As demais, mostradas na figura, servem apenas como referência. A FIGURA 2.47 mostra a evolução da resistência ao cisalhamento não drenada do solo (SU) com a profundidade, para os solos estudados na FIGURA 2.49 (c).

A explicação destas trajetórias, como não poderia fugir à regra, passa antes pela compreensão da distribuição das tensões de mobilização que o solo aplica na âncora.



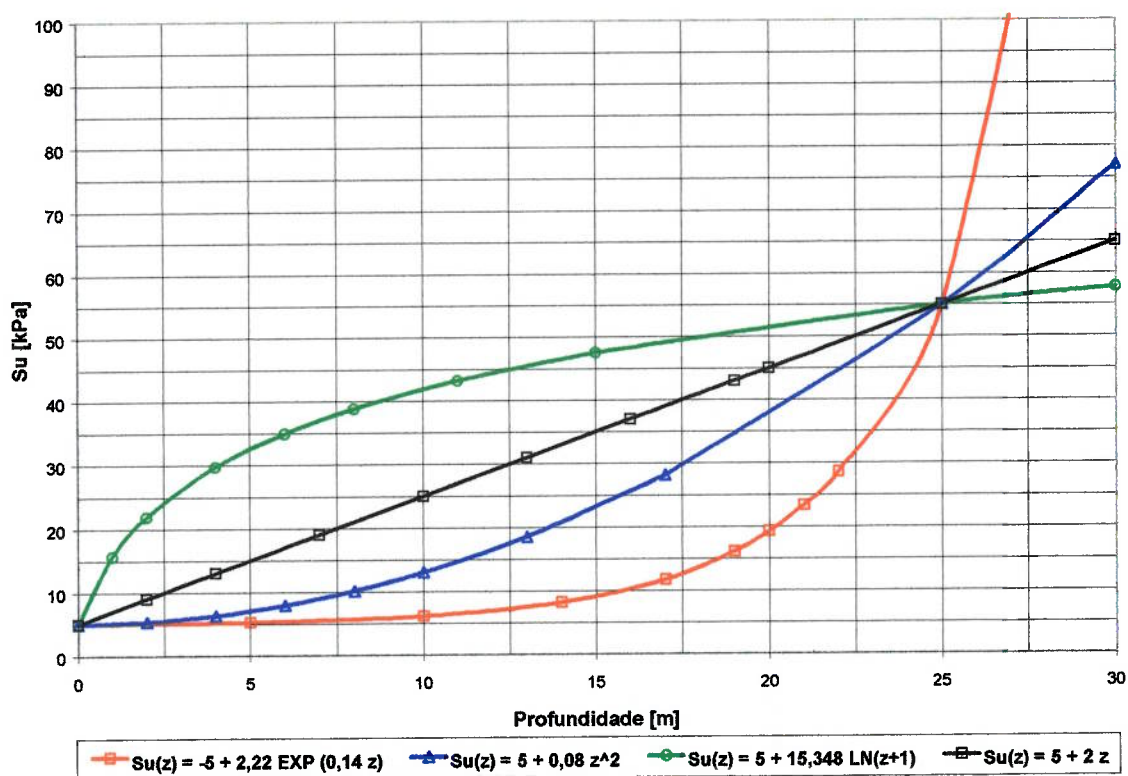


FIGURA 2.47 - Evolução exponencial, quadrática, logarítmica e linear da resistência ao cisalhamento do solo.

Para qualquer profundidade analisada, podemos observar ao analisar em conjunto as FIGURAS 2.47 e 2.49 (c), que existe uma correspondência entre o gradiente da expressão de  $SU(z)$ , para com a inclinação local da trajetória descrita pela âncora na profundidade considerada. Por exemplo, para a faixa de profundidade de 0 a 10 m, a função exponencial apresenta os menores valores de gradiente. Neste contexto, ao observarmos a trajetória descrita pela âncora neste solo - FIGURA 2.49 (c) -, podemos notar que, para um mesmo arrasto, é exatamente esta curva a que apresenta o menor ganho de profundidade.

Já para profundidade maiores, ocorre uma inversão no comportamento das trajetórias, associado à inversão das magnitudes dos gradientes das expressões de  $SU(z)$ . E a regra continua a mesma. Por exemplo, para a

profundidade de 25 metros, a função que apresenta o maior gradiente é a função exponencial. E, observando-se novamente a trajetória descrita pela âncora neste tipo de solo - FIGURA 2.49 (c) -, podemos notar que, para esta profundidade, a trajetória que apresenta a maior inclinação é justamente a trajetória de cravação em solo cuja resistência ao cisalhamento tem dependência exponencial. Ou seja, quanto maior o gradiente da expressão de  $SU(z)$ , tanto maior será a inclinação local da trajetória da âncora.

A prova contundente da afirmação feita no parágrafo anterior pode ser encontrada nas FIGURA 2.51 (b) e 2.51 (c). Nota-se que, quanto maior é a taxa de crescimento da resistência ao cisalhamento (ou seja, o gradiente) do solo que a âncora encontra imediatamente à sua frente, com relação ao trecho de solo já percorrido anteriormente, tanto maior é a tendência de crescimento do ângulo de orientação da pata. Este fato se verifica em particular para faixa de 12 a 13 metros na FIGURA 2.51 (b), onde tem-se, para algumas curvas, uma mudança abrupta das propriedades mecânicas do solo. Como a inclinação local da trajetória está intimamente associada ao ângulo de orientação da pata da âncora<sup>[14]</sup>, fica demonstrado que, para a faixa de transição de solos, o ângulo de orientação da pata aumenta quando o solo à frente da descontinuidade apresenta um grande crescimento de  $SU(z)$ , e diminui, quando o solo à frente da descontinuidade apresenta um grande diminuição de  $SU(z)$ .

Mas por que a distribuição do perfil de resistência ao cisalhamento tem tamanha influência na trajetória da âncora?

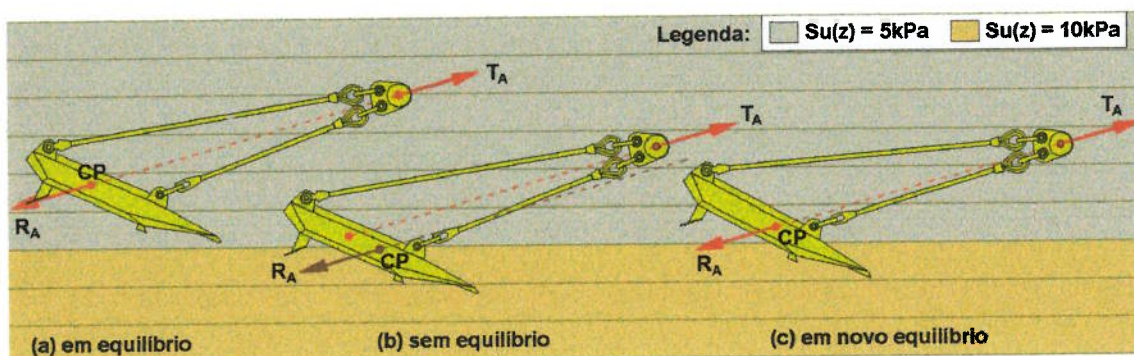


FIGURA 2.48 - Alternância de estados com equilíbrio e sem equilíbrio, ocasionada pela mudança do centro de pressão da âncora.

Porque os esforços resultantes, frutos da interação solo-estrutura da âncora dependem essencialmente desta distribuição. Conforme visto no começo deste capítulo - ítem 2.1.1.3 -, estes esforços resultantes podem ser calculados através da integral definida pela equação (12), sendo aplicados sobre o centro de pressão da âncora. Mas se o perfil de resistência ao cisalhamento do solo em contato com a âncora for alterado, altera-se por consequência o centro de pressão. Como o esforço resultante é aplicado sobre o centro de pressão, esta nova configuração de esforços faz com que a situação de equilíbrio anterior - FIGURA 2.48 (a) - se transforme numa situação onde não existe equilíbrio - FIGURA 2.48 (b) -. Conforme se processa sua movimentação, a âncora irá então se orientar de modo que o sistema volte a assumir uma nova condição de equilíbrio - FIGURA 2.48 (c).

Neste ponto é importante lembrar que o equilíbrio de forças e momentos é calculado no ponto de conexão da âncora com a linha de cravação, sendo este ponto uma articulação. Neste contexto, a condição de equilíbrio se dará quando o esforço resultante ( $R_A$  na figura) tiver mesma direção e sentido oposto ao esforço proveniente da linha de cravação ( $T_A$  na figura). Nesta situação, a somatória de momentos ao redor deste ponto deve

ser nula, de modo a existir equilíbrio. Caso esta condição não seja satisfeita, a âncora irá adotar uma orientação tal, que se satisfaçam as exigências postuladas acima, conforme já explicado no item 2.1.2 deste mesmo capítulo.

Desta maneira, a trajetória da âncora vai sendo construída pela alternância de estados de equilíbrio, e estados sem equilíbrio. Esta alternância de estados pode ocorrer pela mudança de direção do esforço externo aplicado na âncora (caso já explicado do fenômeno de horizontalização), ou pela mudança do centro de pressão da âncora (caso apresentado agora).

Com relação aos esforços presentes na linha de cravação, a FIGURA 2.50 (c) mostra que, a exemplo das FIGURAS 2.50 (a) e 2.50 (b) anteriormente analisadas, a evolução dos esforços é fundamentalmente dependente do perfil de suas respectivas resistências ao cisalhamento. Por exemplo, a curva que mostra a evolução do esforço presente na linha de cravação para solos exponenciais tem grande semelhança com expressão de  $SU(z)$  exponencial - FIGURA 2.47.

Neste contexto, é importante lembrarmos que, a evolução dos esforços presentes na linha de cravação dos ensaios experimentais, desenvolvidos em tanque de prova, é muito similar à evolução da curva exponencial da FIGURA 2.50 (c), o que leva a crer que a expressão da resistência ao cisalhamento do solo do tanque de prova (capítulo seguinte) tem natureza exponencial, e não linear como observado no mar. Como será visto adiante no capítulo 3, o método de preparo do solo presente no tanque, associado à utilização da bomba centrífuga para sua homogenização, podem ter feito com que suas resistências ao cisalhamento assumissem uma distribuição tal, que se assemelhasse a uma curva exponencial.

Mas, independentemente do que de fato aconteceu com a lama do tanque de prova, as simulações numérico-computacionais desenvolvidas com os vários tipos de solo mostraram como se dá e evoluem as trajetórias, bem como os esforços atuantes na linha de cravação ao longo da profundidade.

Pode-se notar que a trajetória, bem como o ângulo de orientação da pata da âncora, são fundamentalmente dependentes do gradiente da expressão da resistência ao cisalhamento do solo em contato com a âncora na profundidade analisada, enquanto que a evolução do esforço presente na linha de cravação assume um comportamento muito similar ao apresentado pela própria expressão de resistência ao cisalhamento do solo estudado.

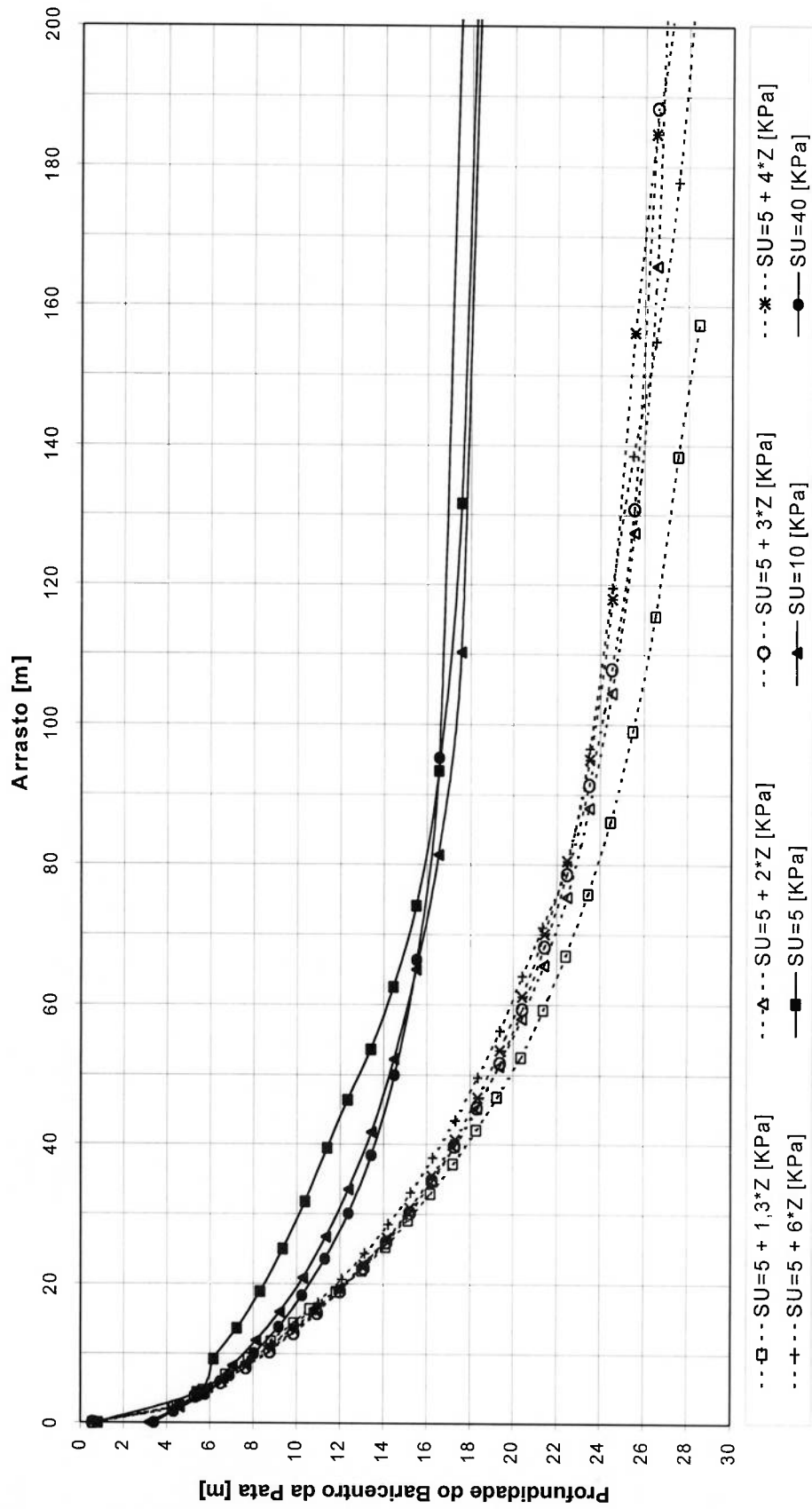


FIGURA 2.49(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S4.

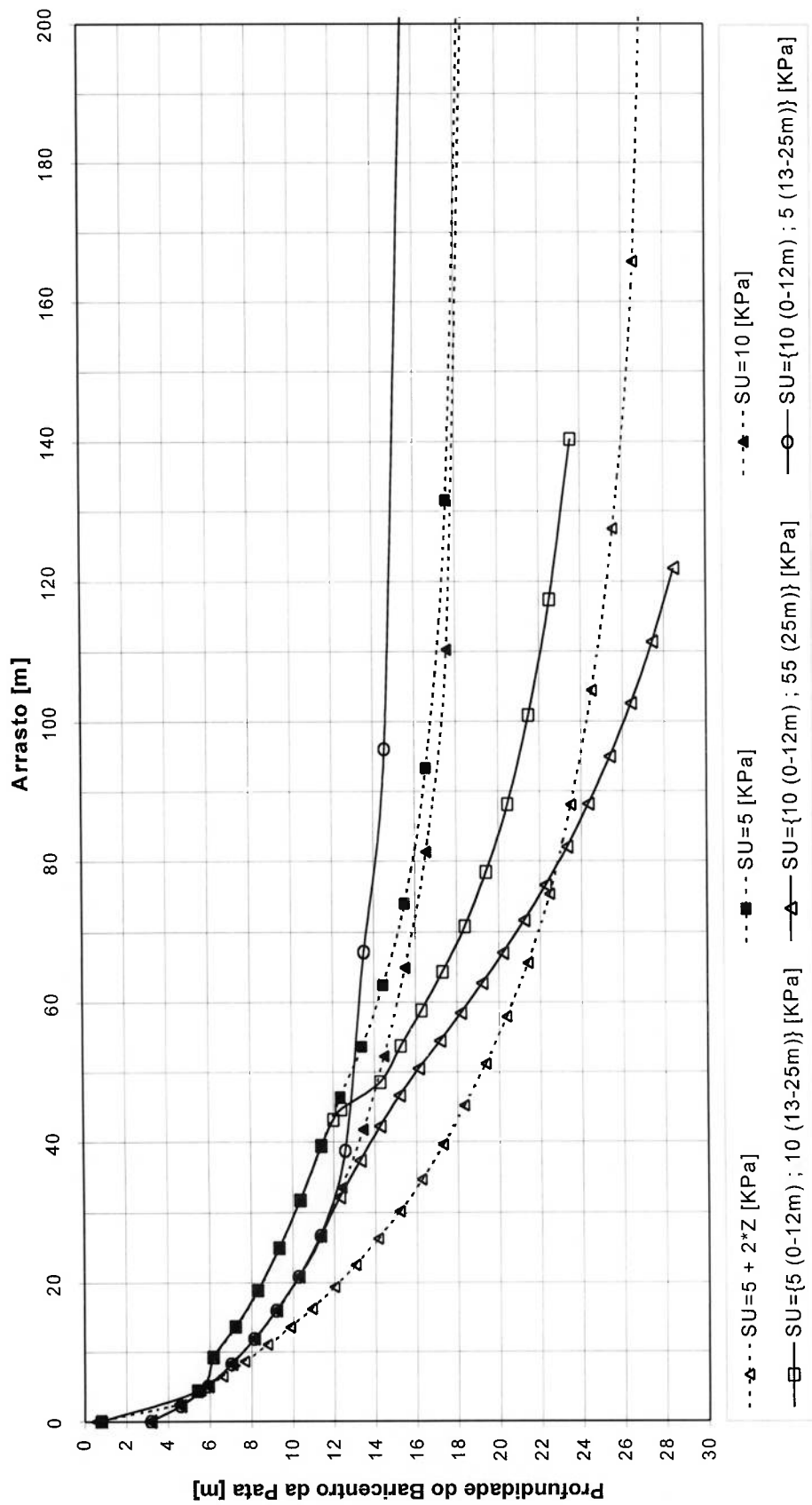


FIGURA 2.49(b) - Modelo computacional da âncora **CENO-ROF** de 10m<sup>2</sup>: Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S4.

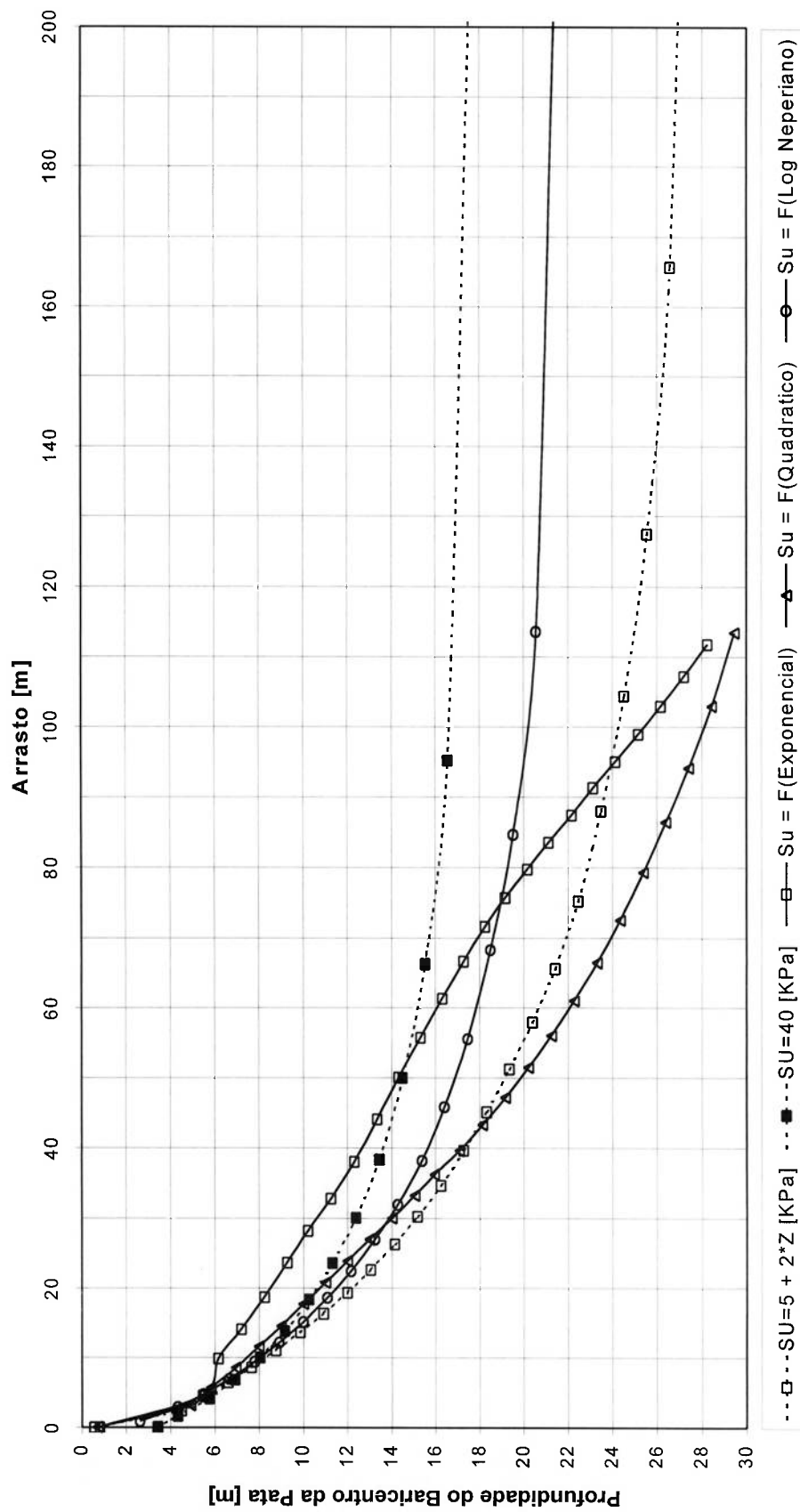


FIGURA 2.49(c) - Modelo computacional da âncora **CENO-ROF** de  $10\text{m}^2$ : Profundidade da âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S4.



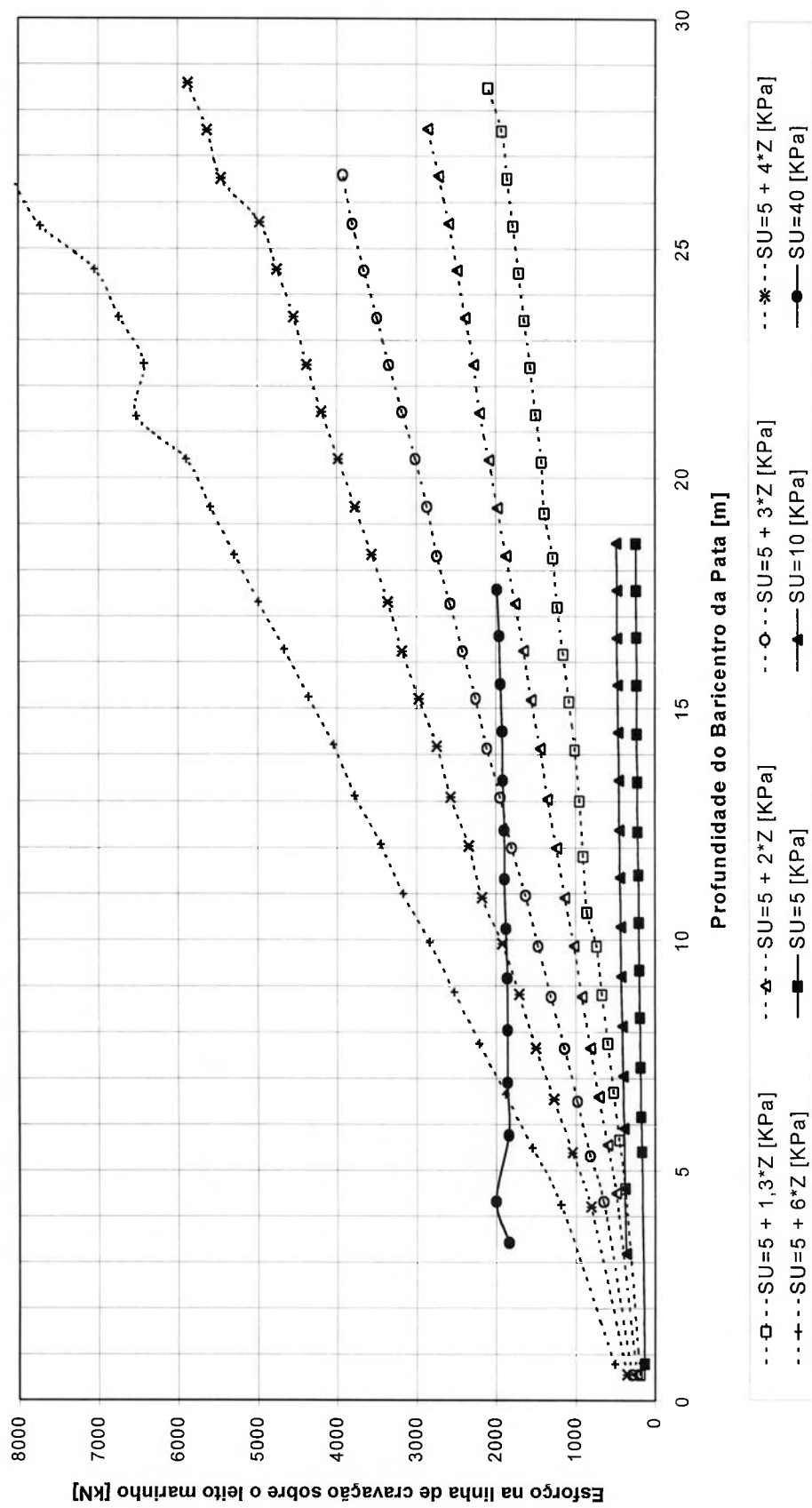


FIGURA 2.50(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S4.

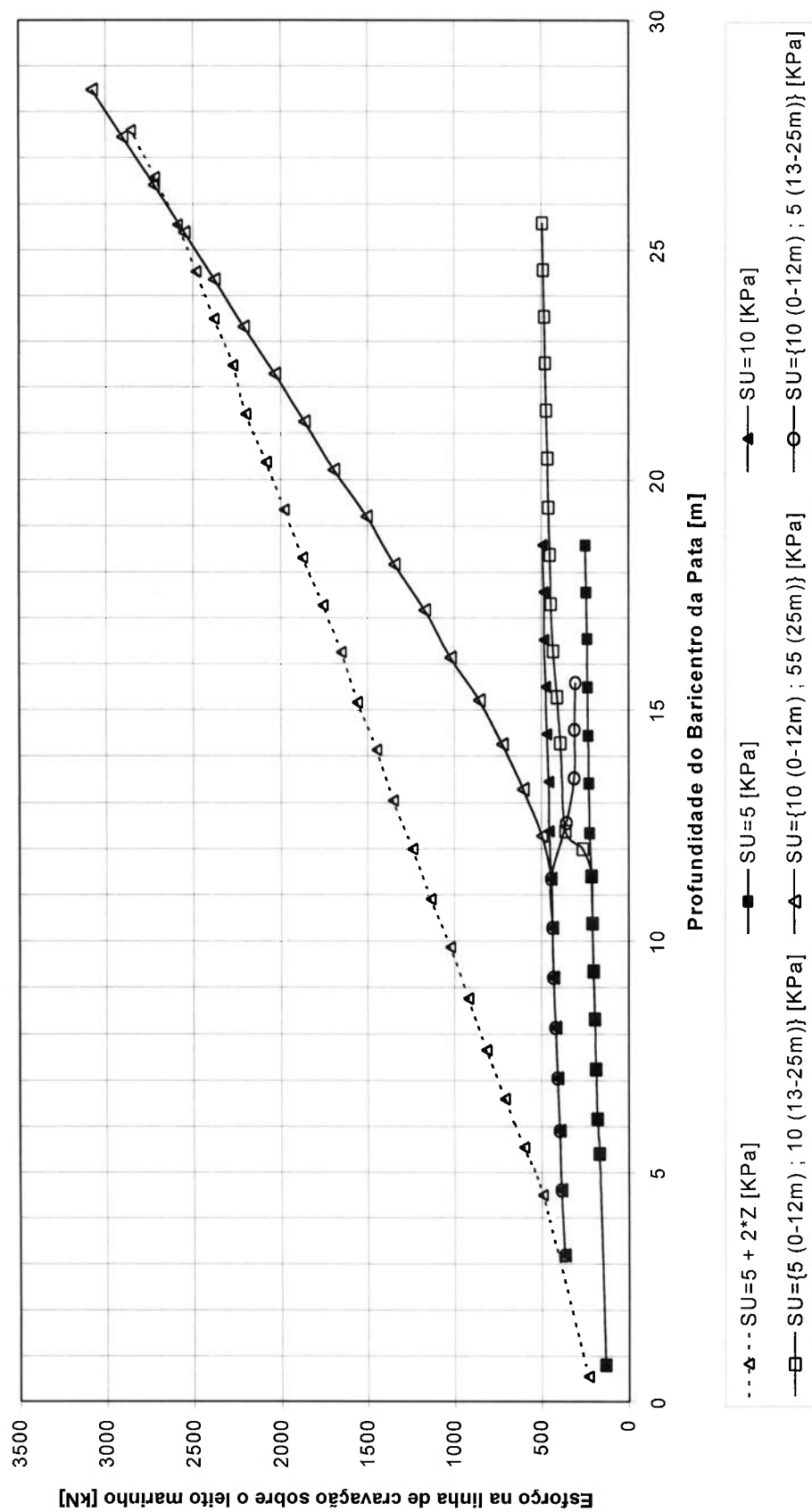


FIGURA 2.50(b) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S4.

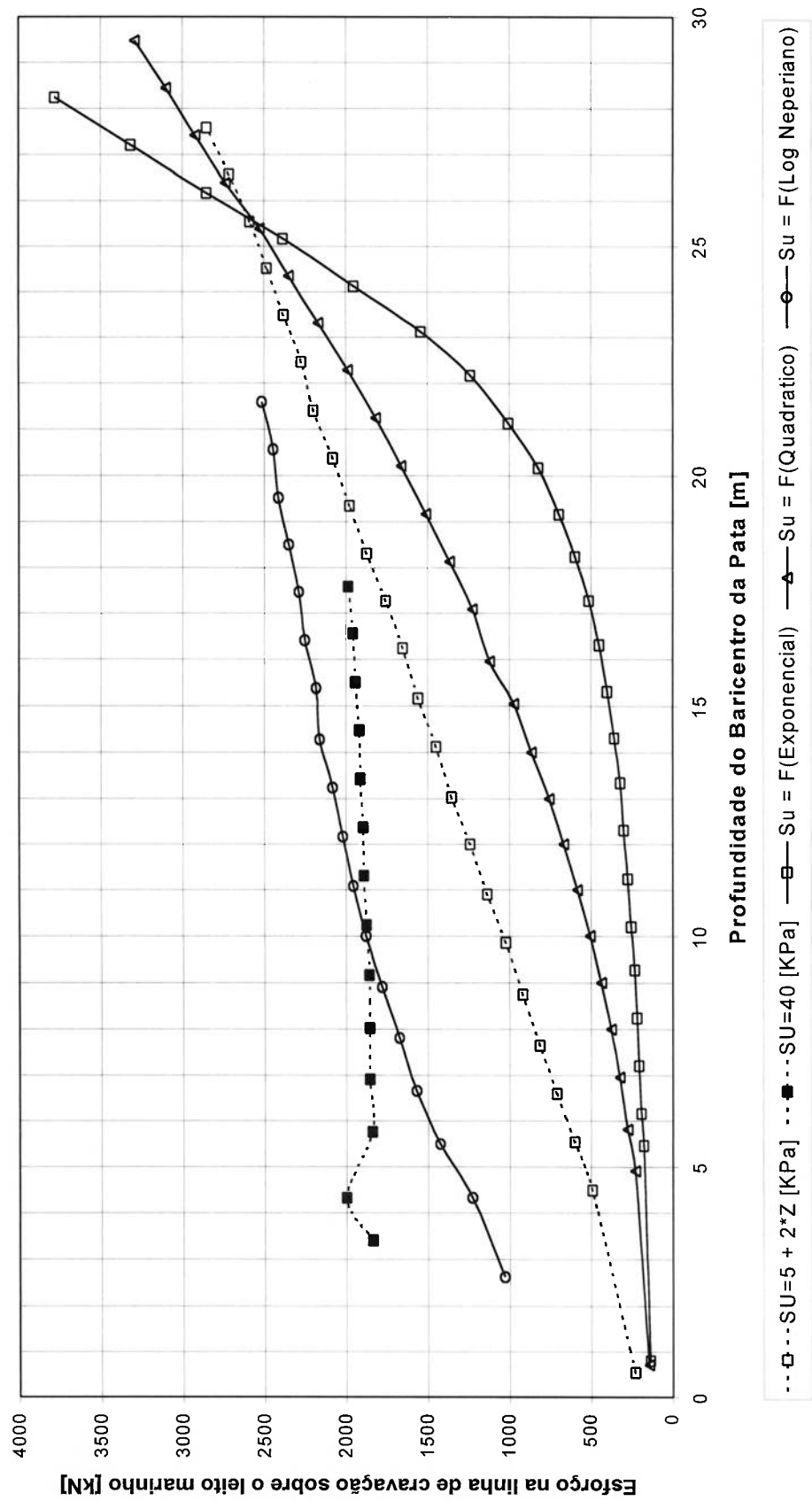


FIGURA 2.50(c) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Esforço na linha de cravação sobre o leito marinho x profundidade da âncora, correspondente a série de simulações S4.

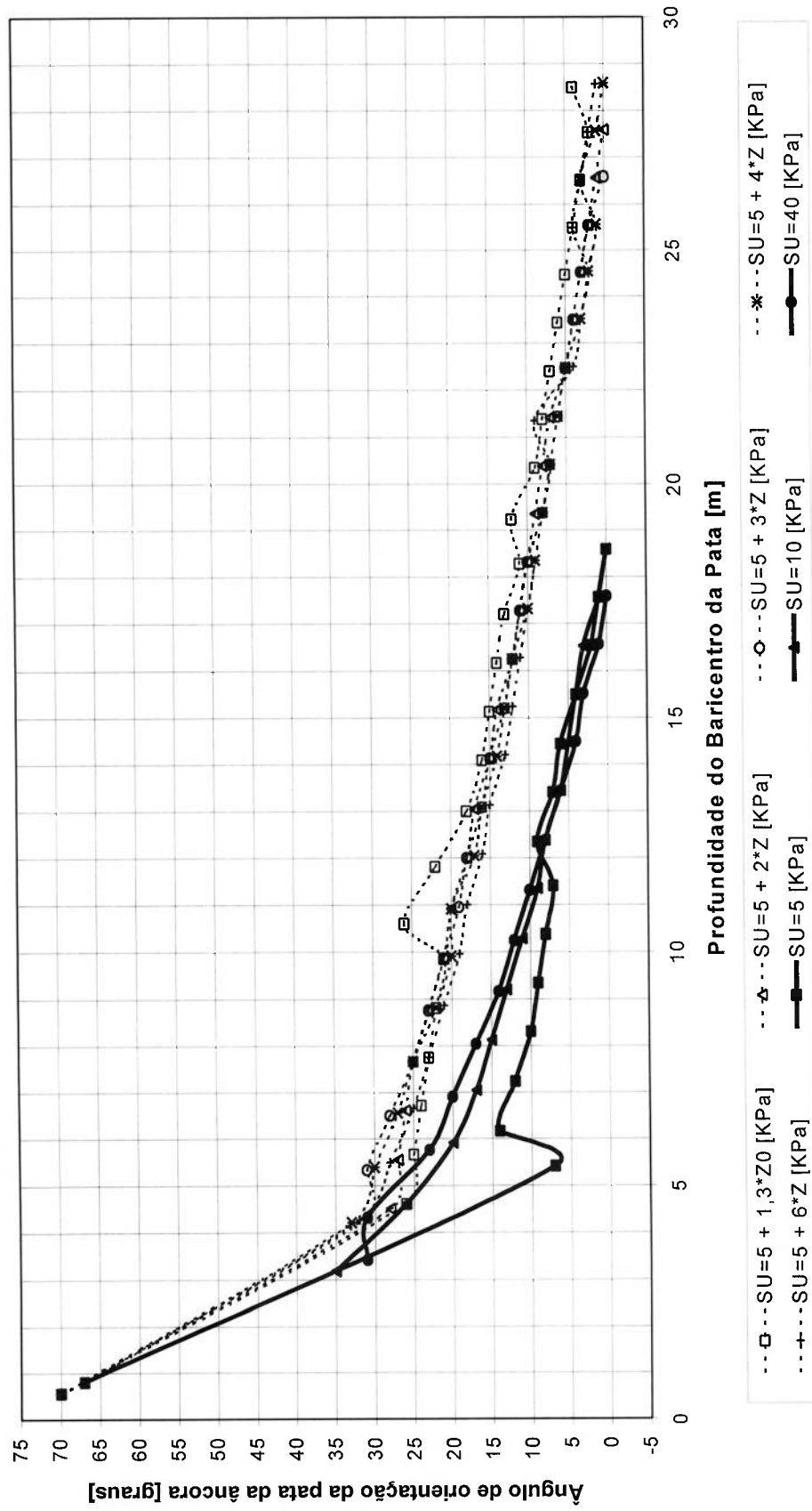


FIGURA 2.51(a) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade do baricentro da âncora, correspondente a série de simulações S4.

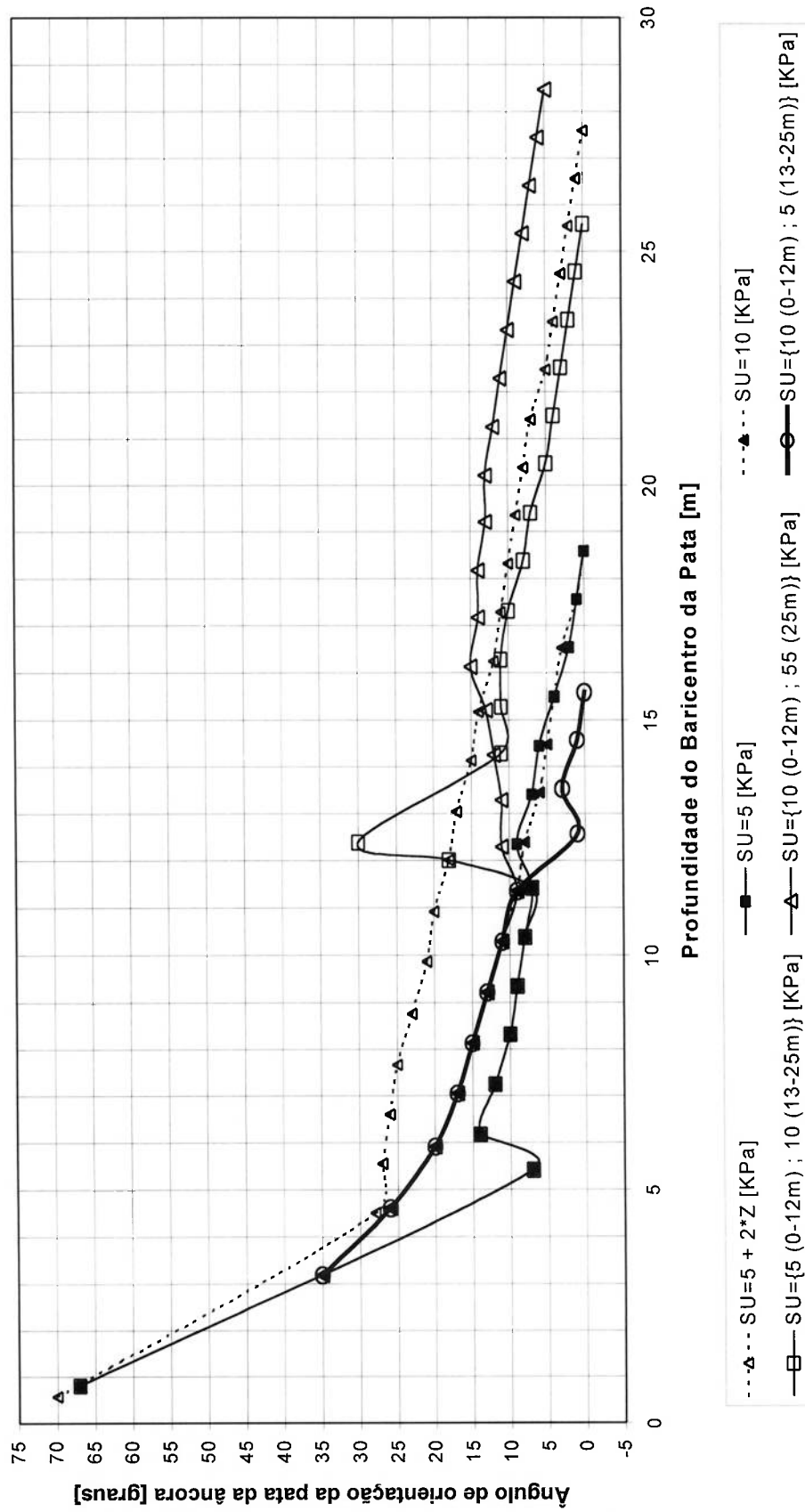


FIGURA 2.51(b) - Modelo computacional da âncora **CENO-ROF** de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade do baricentro da âncora, correspondente a série de simulações S4.

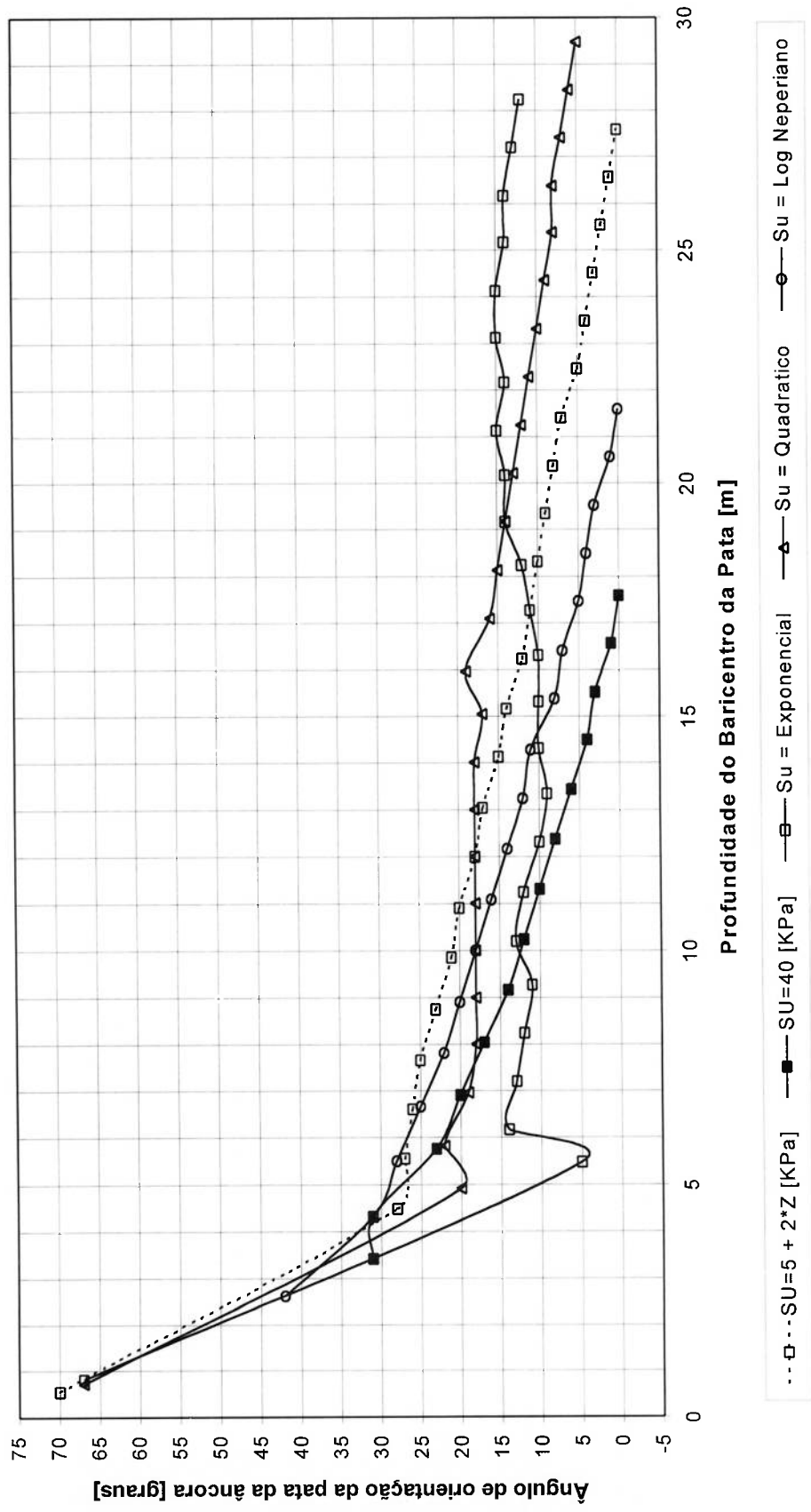


FIGURA 2.51(c) - Modelo computacional da âncora CENO-ROF de 10m<sup>2</sup>: Ângulo de orientação da pata da âncora x profundidade do baricentro da âncora, correspondente a série de simulações S4.

#### **2.4.5 S5: Simulações com Âncoras Comerciais**

Para a série de simulações S5, é apresentada, em função da profundidade do baricentro da pata das âncoras estudadas, a evolução de suas trajetórias.

A análise detalhada desta série se encontra no capítulo 5, onde as trajetórias aqui apresentadas são confrontadas com as trajetórias dos testes de mar realizados pela Petrobrás.

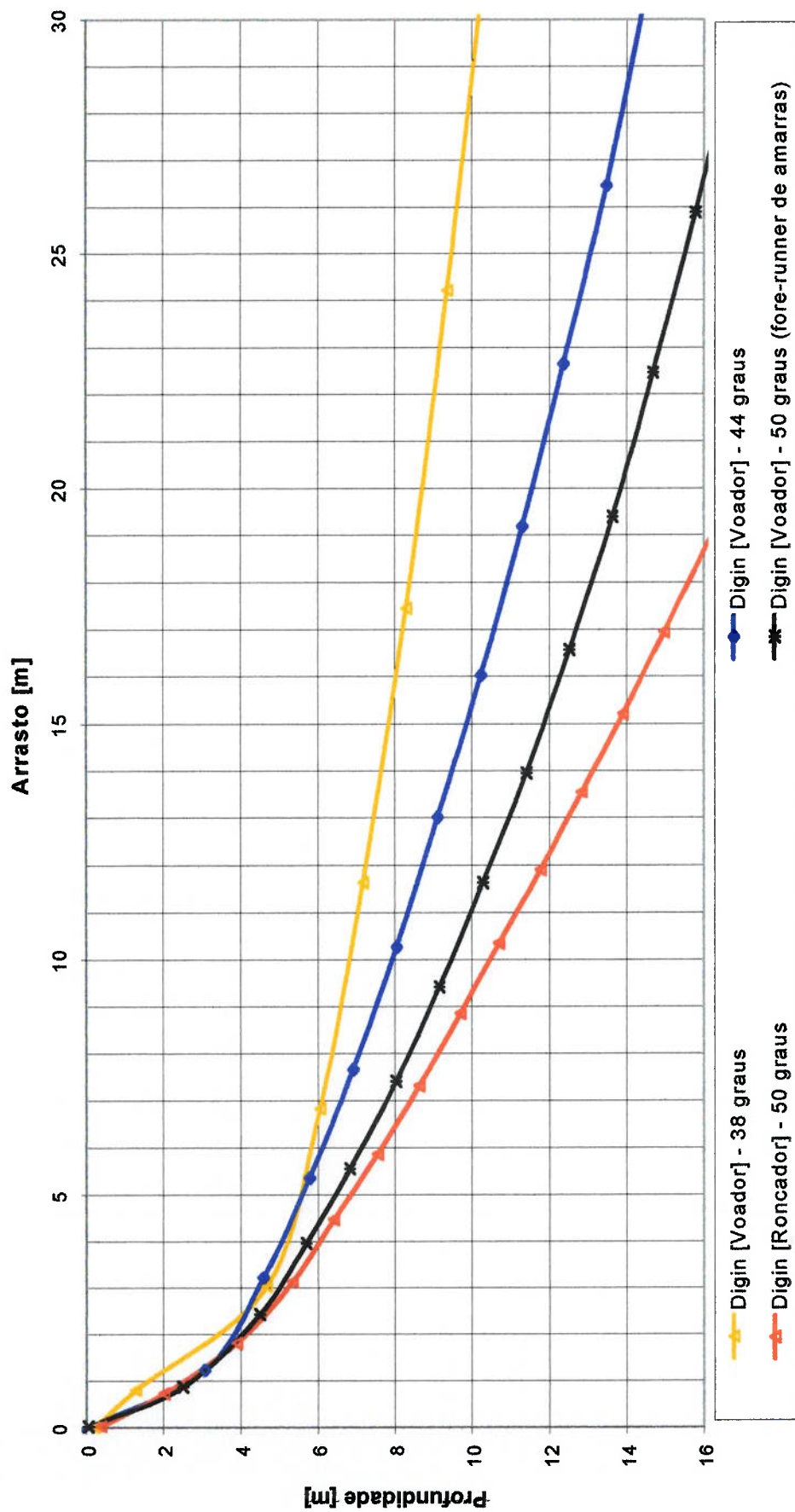


FIGURA 2.52 - Modelo computacional da âncora DENLA MK3 de 10m<sup>2</sup>: Profundidade do Centro de gravidade da pata âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S5.



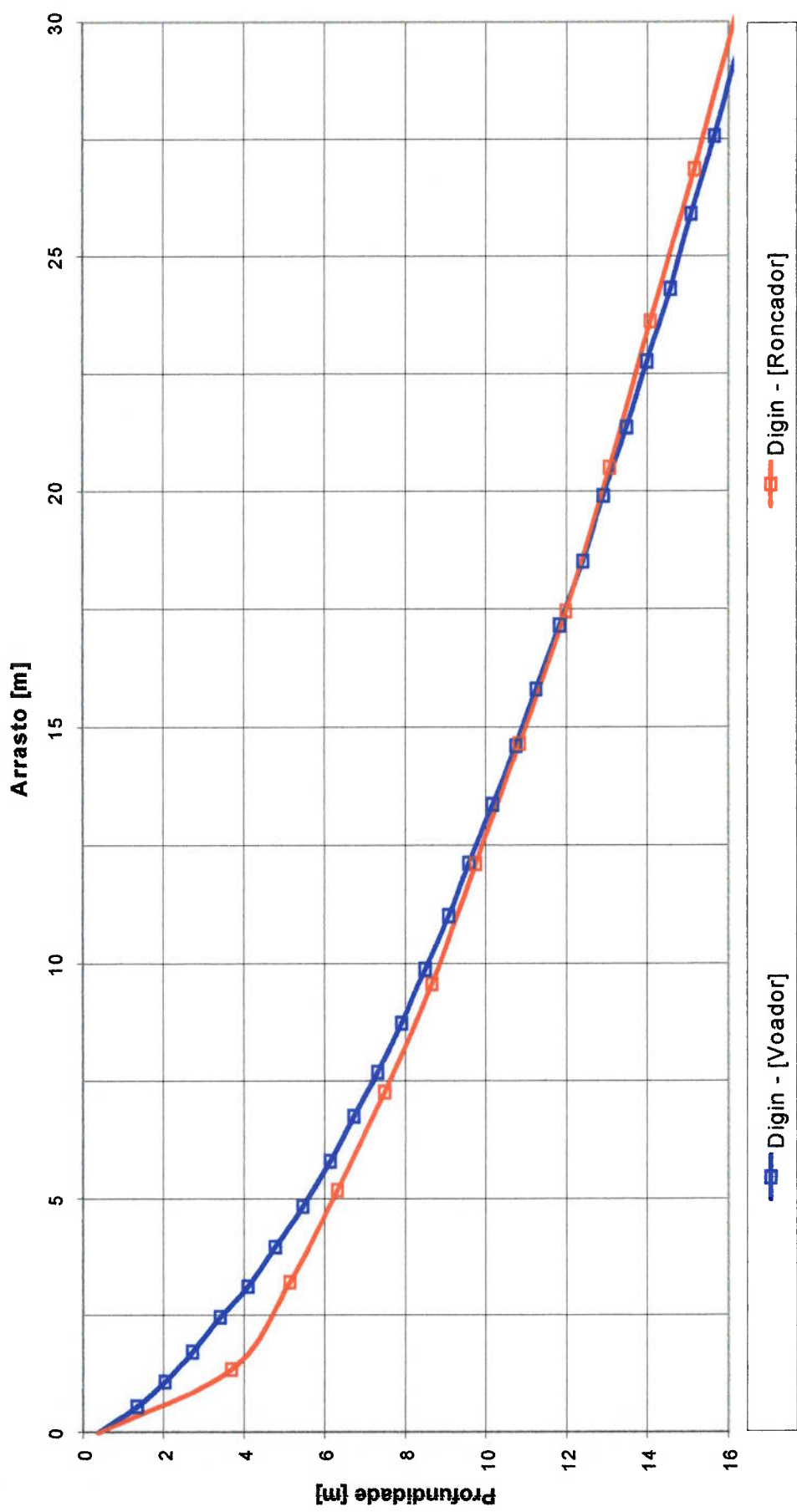


FIGURA 2.53 - Modelo computacional da âncora STEVMANTA de 11m<sup>2</sup>: Profundidade do Centro de gravidade da pata âncora x arrasto da âncora, correspondente a série de simulações S5.

### 3 Análise Experimental

A realização de ensaios em tanque de prova, utilizando modelos de âncoras em escala 1:20, além de revelar a evolução de uma série de variáveis associadas à cravação ao longo do tempo (graças à instrumentação disponível no laboratório), implica na obtenção de resultados experimentais mais próximos dos reais, quando comparados com os resultados obtidos em ensaios realizados anteriormente, em tanques com gel ou em tanques com laponite.<sup>[16]</sup>

Os ensaios experimentais aqui desenvolvidos têm por objetivo revelar e compreender o comportamento dos modelos de âncora estudados no decorrer de suas cravações, através da monitoração constante ao longo do tempo dos seguintes parâmetros:

- O arrasto do centro de gravidade do modelo de âncora;
- A profundidade do centro de gravidade do modelo de âncora;
- A força aplicada na linha de cravação;
- O ângulo de orientação da pata do modelo de âncora;
- A orientação da linha de cravação no ponto de contato com o anel redirecionador do fuso;
- A velocidade escalar desenvolvida pelo modelo de âncora.

Os experimentos desenvolvidos neste trabalho foram realizados no Laboratório de interação solo-estrutura<sup>[17]</sup> do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da Universidade de São Paulo.

### 3.1 Modelos de Âncora

Os ensaios experimentais foram realizados com modelos em escala 1:20 das âncoras **CENO-ROF** - FIGURAS 3.1 e 3.2 - e **STEV MANTA** - FIGURAS 3.3 e 3.4. Fabricado em conjunto com o CENO-USP, os modelos de âncora escala 1:20 tiveram suas geometrias definidas conforme as bases do projeto de desenvolvimento da primeira VLA nacional<sup>[18]</sup>.

Ambos os modelos, construídos com chapas de aço inox de 2,5mm de espessura, procuraram reproduzir com fidelidade a geometria externa de suas respectivas âncoras. A placa delta, por exemplo, cujo modelo em escala 1:1 já foi anteriormente ilustrado através da FIGURA 2.8, foi construída em escala 1:20 tentando-se sempre manter as características originais do modelo real, conforme mostra a FIGURA 3.5. A distância entre os dois furos da base é de 15mm, e a distância entre o furo de conexão da linha de cravação a qualquer um dos furos da base é de 19mm. O conhecimento destes valores é necessário para a determinação dos ângulos de ataque que cada configuração de cabresto estudada irá determinar, através da resolução do mecanismo composto pela pata, os cabrestos e a placa delta.

Os cabrestos dos modelos em escala 1:20 são constituídos por uma camada interna de aço, e uma camada externa de PVC transparente, de modo a evitar que se enferrujem com o passar do tempo. Tanto os cabrestos de ré quanto os cabrestos de vante possuem 3mm de diâmetro externo. Os cabrestos estão conectados à pata através dos olhais de ré e de vante. Para o modelo escala 1:20 da âncora **CENO-ROF**, a distância entre olhais é de

104mm, enquanto para o modelo escala 1:20 da âncora **STEV MANTA**, esta distância é de 101mm.



FIGURA 3.1 - Modelo em escala 1:20 da âncora **CENO-ROF**.

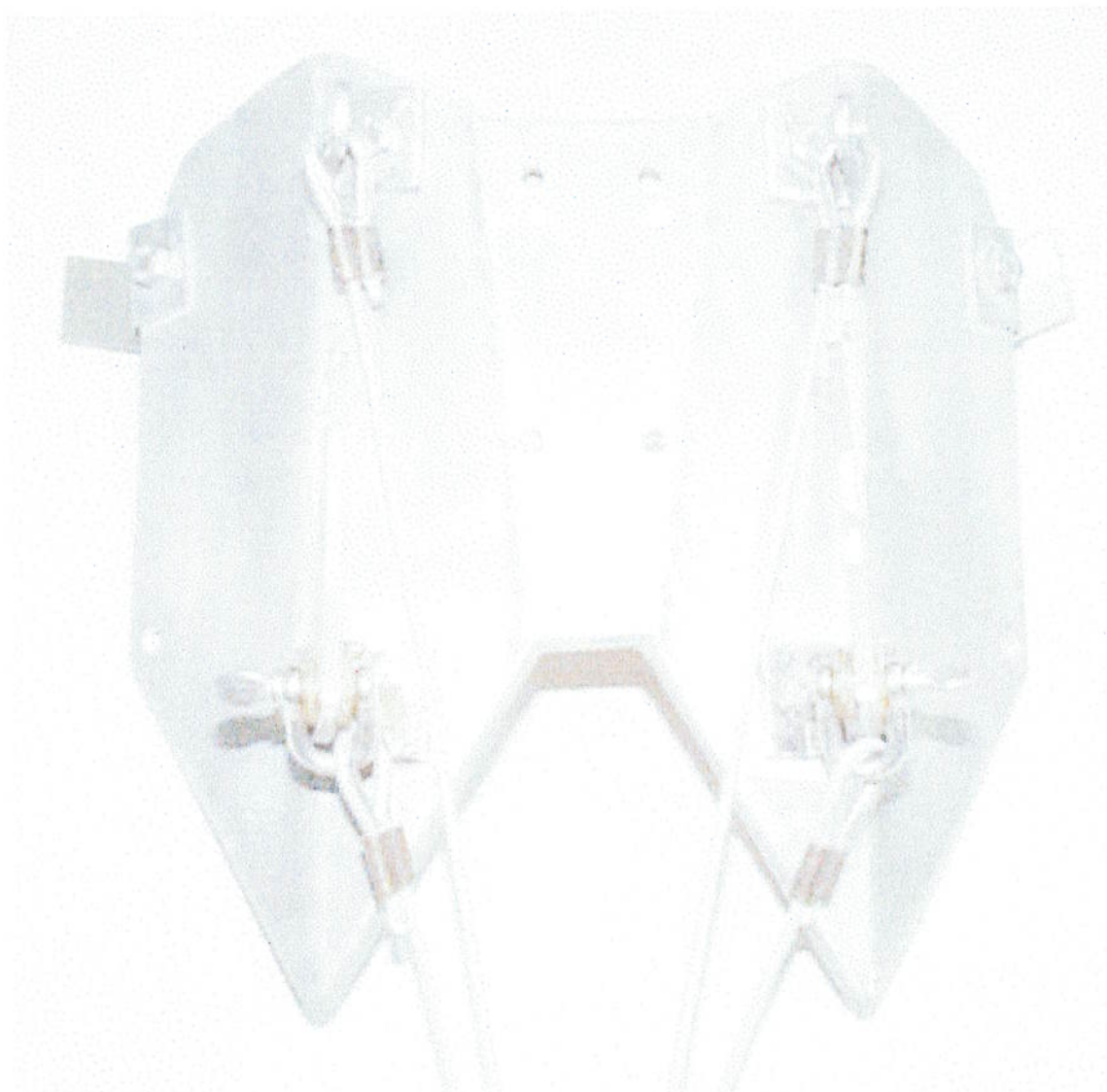


FIGURA 3.2 - Detalhe de pata do modelo em escala 1:20 da âncora CENO-ROF.



FIGURA 3.3 - Modelo em escala 1:20 da âncora **STEV**MANTA.

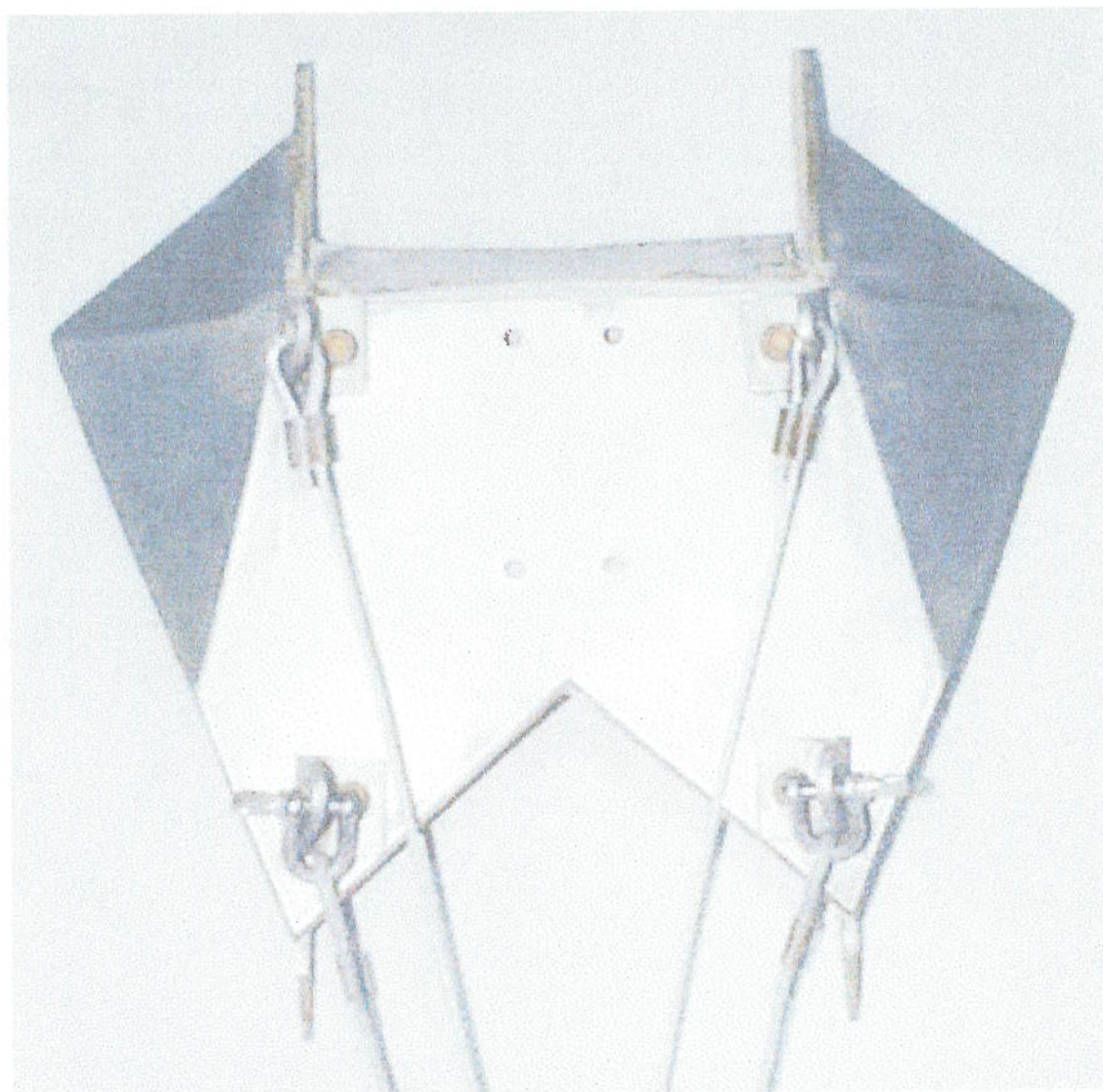


FIGURA 3.4 - Detalhe de pata do modelo em escala 1:20 da âncora STEVMANTA.



FIGURA 3.5 - Detalhe da placa delta em escala 1:20.

### 3.2 Linha de Cravação

A linha de cravação utilizada nos ensaios experimentais é composta por cordão em nylon trançado, de diâmetro nominal  $\frac{1}{4}$  polegadas, conforme ilustrado na FIGURA 3.6. Uma de suas extremidades é conectada ao modelo de âncora através de um laço (que passa por dentro de uma das manilhas da placa delta), enquanto a outra extremidade é conectada ao guincho de tracionamento.

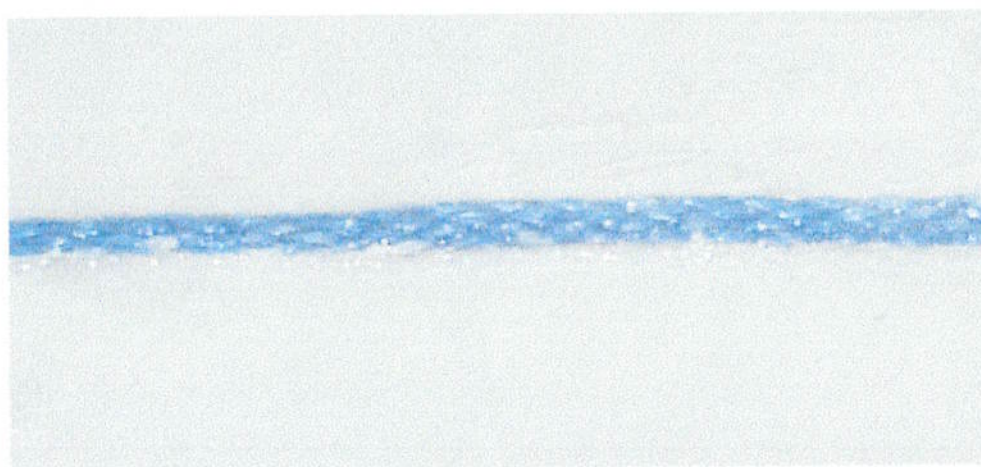


FIGURA 3.6 - Trecho da linha de cravação utilizada nos ensaios experimentais.



### 3.3 Solo

O solo no qual foram realizados os ensaios experimentais - ilustrado na FIGURA 3.7 - é composto por 50% em massa de argila caolinítica MTN-325, e 50% de água. As características técnicas dessa argila são apresentadas no APÊNDICE 2.

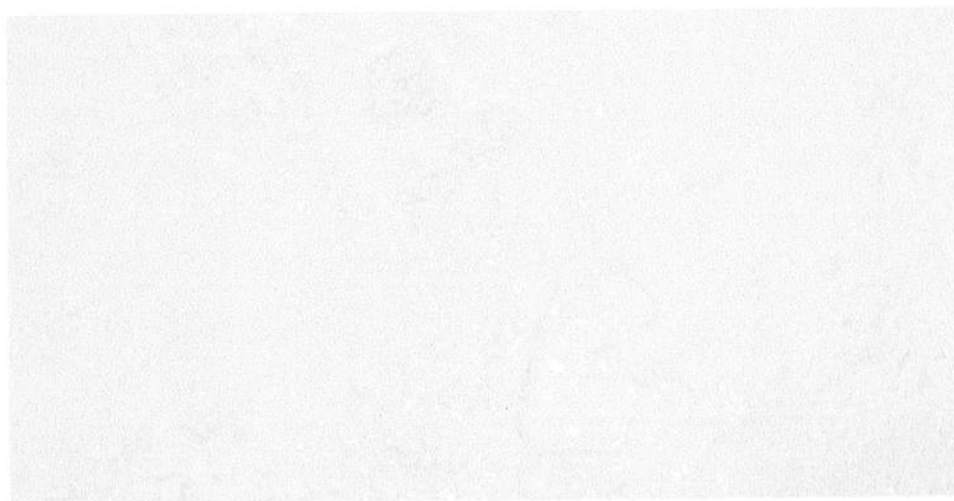


FIGURA 3.7 - Solo argiloso utilizado nos ensaios experimentais.

A determinação das propriedades deste solo foi realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, através da realização de ensaios de palheta no próprio tanque de prova. Apesar de pouco conclusivos, pois a resolução do instrumento de medição não era adequada para os ensaios desenvolvidos, os resultados destes testes indicaram uma resistência ao cisalhamento da argila caolinítica entre 0.7 e 2.1 *kPa*, para a faixa de profundidade de 1 a 1,5 metros.

A faixa de profundidade de 0 a 1 metro não pode ser examinada, devido à baixa resistência mecânica apresentada pelo solo no que tange à movimentação das palhetas do instrumento de medição. Para esta faixa, tão baixo era o valor da resistência ao cisalhamento do solo, que o instrumento de medição foi incapaz de registrá-la, acusando-a como nula.

### 3.4 Infra-Estrutura Laboratorial

#### 3.4.1 Tanque de Prova

Construído com a finalidade de desenvolver a primeira VLA nacional, o tanque de prova do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas<sup>[17]</sup> tem dimensões internas máximas de 8,00m x 2,00m x 2,65m, conforme ilustrado na FIGURA 3.8. Seu interior foi impermeabilizado de modo a se evitar que o solo perca umidade para o meio que o circunda, o que poderia acarretar mudança de suas propriedades ao longo do tempo. A FIGURA 3.9(a) apresenta uma foto do interior do tanque, quando este ainda se encontrava vazio. O pequeno bólido metálico, no fundo do tanque, é um modelo em escala 1:20 da âncora **CENO-ROF**. A FIGURA 3.9(b) mostra uma foto do tanque de prova já operacional, preenchido com argila caolinítica MTN-325, conforme citado anteriormente. Ao fundo desta foto está a sala de controle, onde se encontra o computador central que controla todos os equipamentos instalados no tanque. Maiores detalhes podem ser encontrados na referência [17].

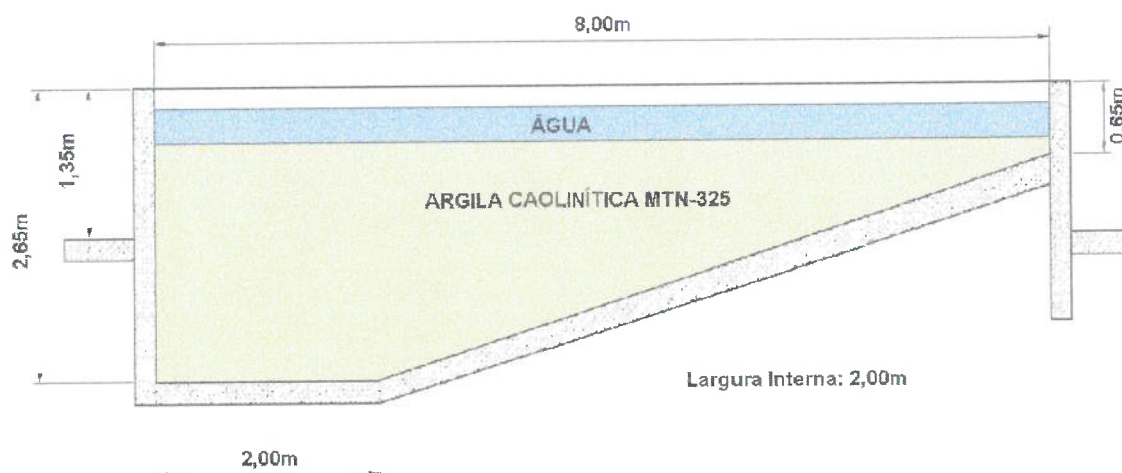
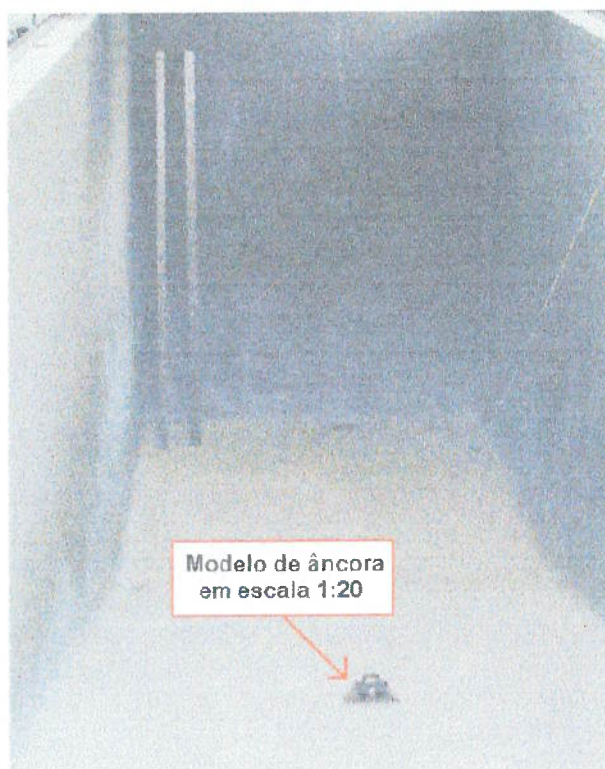


FIGURA 3.8 - Dimensões do Tanque de Prova.



(a) Vista interna do tanque de prova vazio. <sup>[17]</sup>



(b) Vista do tanque de prova cheio de argila caolinítica.

FIGURA 3.9 - Tanque de interação solo-estrutura do CENO-USP

O tracionamento da linha de cravação é realizado através de um guincho - FIGURA 3.10 -, instalado ao lado da parede da região mais profunda do tanque. Com capacidade para 2 toneladas, o guincho é acionado por um motor trifásico de 220V, e é controlado pelo computador central.



FIGURA 3.10 - Guincho de tracionamento da linha de cravação. <sup>[17]</sup>

Devido ao pequeno comprimento do tanque (8,00m), foi construído na parte interna da parede, ao lado do guincho, um sistema de redirecionamento da linha de cravação. Este sistema, denominado de fuso, está ilustrado na FIGURA 3.11. Composto basicamente por um anel móvel por onde passa a linha de cravação, um corpo cilíndrico com rosca interna, um fuso com rosca ACME e um motor elétrico, o fuso tem a função de redirecionar os esforços atuantes na linha de cravação dentro do solo.

Conforme a profundidade da âncora, o anel móvel tem sua posição vertical alterada, de modo a redirecionar a direção da força de tração da linha de cravação, no ponto de contato com o anel. O sistema de controle foi programado para manter o segmento de reta, que vai do centro de gravidade da âncora até o ponto de contato da linha de cravação com o anel, com um ângulo inferior ou igual a 8 graus com a horizontal. Assim, conforme a posição

da âncora, o computador reposiciona o anel de modo que a inclinação deste seguimento seja sempre inferior ou igual a 8 graus com a horizontal.

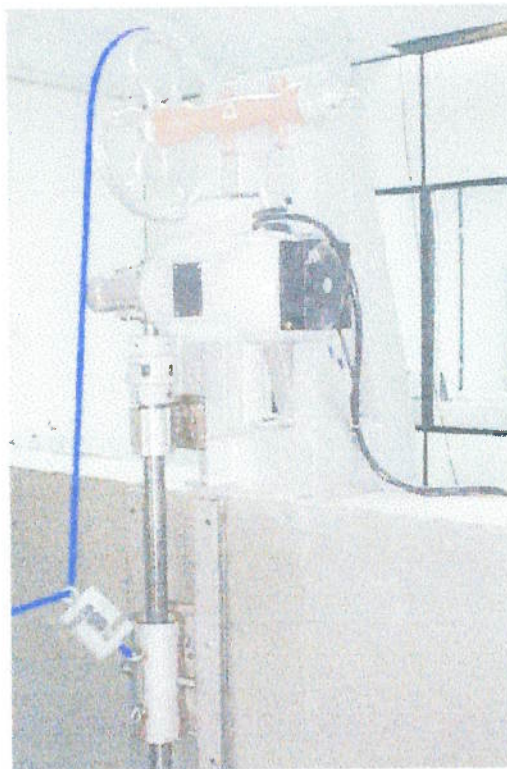


FIGURA 3.11 - Fuso redirecionador da linha de cravação. [17]

### 3.4.2 Sistema de Controle e Monitoramento

Os equipamentos presentes no tanque de prova do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas são controlados por um computador central. Neste computador, o programa VLAPOS<sup>[12]</sup>, desenvolvido em linguagem turbo-pascal, aquisita os dados provenientes de cinco sensores através de uma placa de aquisição de dados. São quatro LVDTs (transdutores lineares de posição) e uma célula de carga. A FIGURA 3.12 mostra a tela principal do programa de controle e monitoramento do tanque de prova.

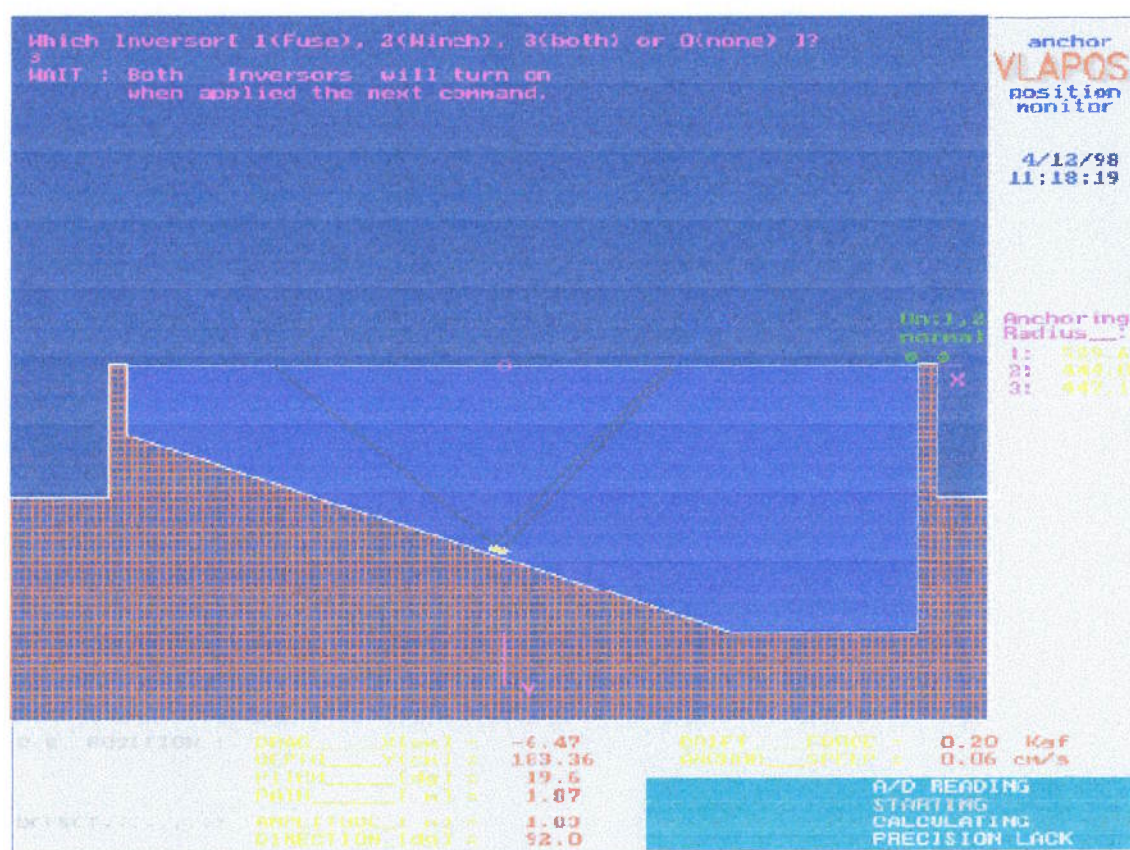


FIGURA 3.12 - Tela principal do programa de controle e monitoramento do tanque de prova. [12]

O controle dos equipamentos depende da posição em que se encontra o modelo de âncora. Por exemplo, conforme a profundidade do modelo, o programa aciona o fuso de modo a reposicionar o anel redirecionador da linha de cravação. O programa também atua no guincho, de maneira a manter a velocidade do modelo de âncora constante ao longo da cravação. Os sensores podem ser divididos em três conjuntos, conforme a função que são destinados a exercer.

O primeiro conjunto de sensores é composto por três LVDTs, uma série de polias, cabos de aço e linhas de pesca extremamente finas. Esse sistema é responsável pela localização planar do modelo de âncora, e está ilustrado na

FIGURA 3.13. Através dele é possível conhecer, a cada instante, a localização do modelo no plano vertical-longitudinal no interior do tanque de prova.



FIGURA 3.13 - Sistema de localização planar do modelo de âncora. <sup>[17]</sup>

Neste conjunto, cada um dos LVDTs está conectado a uma roda de bicicleta através de um cabo de aço, tensionado com um peso inferior a 10 *kgf*. Cada roda, por sua vez, está conectada ao modelo de âncora através de uma linha extremamente fina. O esforço de tração nas linhas de pesca conectadas à âncora não ultrapassa 0,5 *kgf*, devido a uma redução de 20 para 1 presente no sistema, efetuada pelas rodas de bicicleta. Estas rodas são responsáveis pela

compatibilização dos movimentos apresentados pelo modelo de âncora (deslocamento máximo de 8 m) e os movimentos de translação admissíveis pelos LVDTs (deslocamento máximo de 40 cm). Qualquer movimentação do modelo de âncora é transmitida aos LVDTs através das linhas conectadas à âncora. O programa **VLAPOS**, por sua vez, registra essa variação ao interrogar os LVDTs, processa os dados e grava no arquivo de saída a inclinação da pata do modelo de âncora com a horizontal, arrasto do centro de gravidade da âncora e profundidade desse mesmo centro de gravidade, para o referido instante em que foi realizada a leitura.

O segundo conjunto é composto por um único LVDT, que monitora a posição vertical do anel redirecionador da linha de cravação. De maneira similar ao anterior, este único LVDT está conectado ao fuso através de um cabo de aço, um conjunto de polias, uma roda de bicicleta e uma linha extremamente fina. Qualquer movimentação apresentada pelo anel é transmitida ao LVDT. O programa **VLAPOS**, ao interrogar este sensor, processa os dados e armazena no arquivo de saída a posição vertical do anel para o referido instante de interrogação.

O último conjunto é composto somente por uma célula de carga, ilustrada na FIGURA 3.14. Pela concepção do sistema, o valor da força de tração na linha de cravação depende do posicionamento do modelo de âncora. O computador interroga a célula, processa os dados e armazena, então, no arquivo de saída, o valor da força de tração na linha de cravação.





FIGURA 3.14 - Célula de carga utilizada para medição dos esforços na linha de cravação.<sup>[17]</sup>

Assim, após processados todos os dados pelo computador central, o programa **VLAPOS** registra em um arquivo de saída os seguintes parâmetros (os termos entre parênteses representam exatamente os termos presentes no arquivo de saída para descrever as variáveis em questão - vide FIGURA 3.15):

- A profundidade do baricentro do modelo de âncora (ANCHOR DEPTH);
- O arrasto do baricentro do modelo de âncora (ANCHOR DRAG);
- A inclinação da pata do modelo de âncora (ANCHOR PITCH);
- A força de tração da linha de cravação (DRIFT FORCE);
- A posição do anel de redirecionamento da linha de cravação (SPINDLE DEPTH);
- O intervalo de tempo decorrido para cada leitura efetuada (TIME INTERVAL).

Através da manipulação destes parâmetros, o programa também calcula a velocidade de deslocamento da pata dos modelos de âncora (ANCHOR SPEED), a distância percorrida pela âncora ao longo de sua trajetória (ANCHOR PATH), e o ângulo da linha de cravação (LINE SLOPE) no ponto de

contato com o fuso. A FIGURA 3.15 mostra um trecho do arquivo de saída onde as variáveis acima estão registradas, referente ao ensaio Ceno-C3. Os resultados completos para cada um dos ensaios aqui desenvolvidos, conforme será especificado no item 3.5, estão disponíveis no APÊNDICE 4.

file name = cenoc3      8/ 2/ 99      11:38:54

|   | ANCHOR<br>DRAG<br>[cm] | ANCHOR<br>DEPTH<br>[cm] | ANCHOR<br>PITCH<br>[deg] | ANCHOR<br>PATH<br>[ m] | SPINDLE<br>DEPTH<br>[cm] | DRIFT<br>FORCE<br>[Kgf] | LINE<br>SLOPE<br>[deg] | ANCHOR<br>SPEED | Time<br>Interval<br>[sec] |
|---|------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------|
| I | 0.78                   | 59.56                   | 71.95                    | 0.02                   | 25.50                    | 2.85                    | 2.63                   | 1.03 cm/s       | 300.88                    |
| I | 0.86                   | 59.75                   | 71.91                    | 0.02                   | 25.50                    | 2.82                    | 2.71                   | 0.20 cm/s       | 302.31                    |
| I | 0.97                   | 59.98                   | 71.94                    | 0.02                   | 25.51                    | 2.87                    | 2.72                   | 0.25 cm/s       | 303.68                    |
| Q | 1.36                   | 60.81                   | 71.60                    | 0.03                   | 25.51                    | 2.84                    | 2.74                   | 0.92 cm/s       | 327.08                    |
| Q | 1.39                   | 60.91                   | 71.64                    | 0.03                   | 25.51                    | 2.82                    | 2.81                   | 0.10 cm/s       | 328.51                    |
| F | 1.55                   | 61.24                   | 71.73                    | 0.04                   | 25.51                    | 2.83                    | 2.81                   | 0.37 cm/s       | 344.60                    |
| F | 1.77                   | 60.87                   | 71.64                    | 0.04                   | 25.40                    | 2.82                    | 2.85                   | 0.43 cm/s       | 347.07                    |
| F | 1.77                   | 60.93                   | 71.62                    | 0.04                   | 25.41                    | 2.88                    | 2.82                   | 0.06 cm/s       | 349.16                    |
| F | 1.80                   | 60.95                   | 71.64                    | 0.04                   | 25.41                    | 2.90                    | 2.82                   | 0.03 cm/s       | 351.03                    |
| F | 1.81                   | 61.03                   | 71.62                    | 0.04                   | 25.41                    | 2.98                    | 2.83                   | 0.08 cm/s       | 353.17                    |
| F | 1.86                   | 61.08                   | 71.58                    | 0.04                   | 25.41                    | 2.88                    | 2.83                   | 0.07 cm/s       | 354.98                    |
| F | 1.90                   | 61.17                   | 71.54                    | 0.04                   | 25.42                    | 3.07                    | 2.84                   | 0.10 cm/s       | 357.07                    |
| F | 1.94                   | 61.28                   | 71.36                    | 0.04                   | 25.41                    | 2.99                    | 2.84                   | 0.12 cm/s       | 358.93                    |
| F | 2.01                   | 61.43                   | 71.40                    | 0.05                   | 25.40                    | 2.96                    | 2.85                   | 0.17 cm/s       | 360.91                    |
| F | 2.08                   | 61.50                   | 71.23                    | 0.05                   | 25.41                    | 2.90                    | 2.86                   | 0.10 cm/s       | 362.78                    |
| F | 2.14                   | 61.73                   | 71.07                    | 0.05                   | 25.42                    | 2.94                    | 2.87                   | 0.24 cm/s       | 364.87                    |
| F | 2.21                   | 61.88                   | 70.99                    | 0.05                   | 25.42                    | 2.92                    | 2.89                   | 0.17 cm/s       | 366.73                    |
| F | 2.23                   | 61.92                   | 71.05                    | 0.05                   | 25.40                    | 2.78                    | 2.90                   | 0.04 cm/s       | 368.82                    |

FIGURA 3.15 - Trecho do arquivo de saída do programa VLAPOS.

## 3.5 Procedimentos

### 3.5.1 Procedimentos de Ensaio

Os procedimentos de ensaio seguem as especificações contidas na referência [19]. O modelo de âncora é primeiramente colocado na posição inicial de ensaio dentro do solo, com o auxílio de uma linha de nylon presa no olhal de recuperação da âncora. Isto faz com que, ao final do posicionamento do modelo de âncora, sua pata esteja praticamente toda encoberta pela lama do tanque, formando um ângulo próximo a 60 graus com a superfície da mesma, conforme ilustrado na FIGURA 3.16.

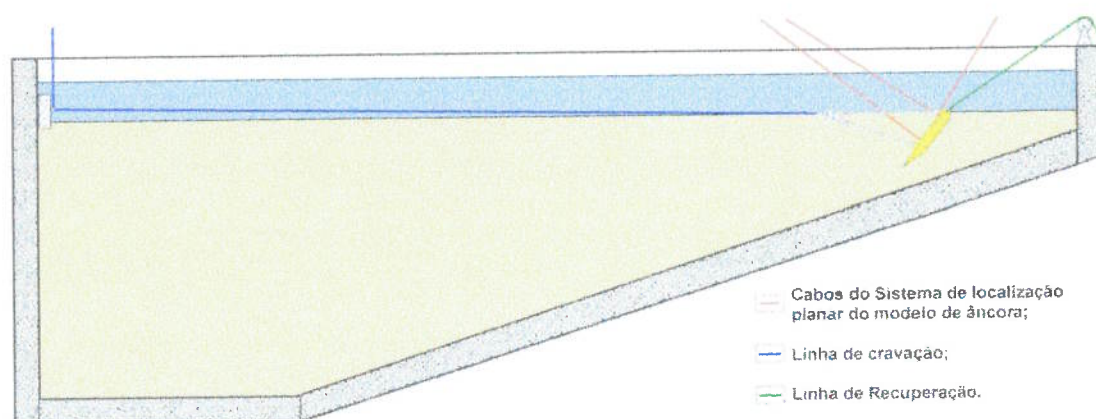


FIGURA 3.16 - Posicionamento inicial do modelo de âncora no tanque.

Feito o posicionamento inicial, deve ser especificado a velocidade de recolhimento da linha de cravação no programa **VLAPOS**. Seu valor foi sempre de  $0,5 \text{ m/min}$ . A cravação é então iniciada, e o modelo de âncora começa a se movimentar dentro do solo.

É importante lembrar que ao longo de toda a cravação o programa **VLAPOS** mantém a velocidade do guincho constante ao redor do valor especificado, bem como impede que o ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de contato com fuso ultrapasse os 8 graus. Conforme se processa a cravação, os parâmetros especificados (item 3.4.2 deste capítulo) vão sendo continuamente adquiridos pelo programa.

O ensaio é finalizado quando o modelo atinge a profundidade em lama de  $100 \text{ cm}$ , correspondente a aproximadamente cinco vezes o valor de seu comprimento. Após o término do ensaio, o modelo é retirado do solo através da mesma linha que o colocou na posição inicial, presa ao olhal de recuperação do modelo de âncora (linha verde na FIGURA 3.16).

Espera-se um intervalo de tempo mínimo de  $45 \text{ min}$  entre um ensaio e outro. Ao término do dia, é realizado o procedimento de homogeneização do solo.

### 3.5.2 Procedimentos de Homogeneização do Solo

O procedimento de homogeneização, consiste em passar uma bomba lameira, ao término do dia, ao longo do tanque por 3 vezes consecutivas e em duas diferentes profundidades, 70 e 120 cm em relação à mureta do tanque. Com isso visa-se uma melhor homogeneização e desagregação do solo. “Este procedimento de homogeneização do solo é importante, pois com este recurso pode-se ter uma uniformidade nos ensaios e, por consequência uma padronização das características de resistência mecânica da lama”, conforme citado em [19]. Após o término do procedimento de homogeneização, espera-se no mínimo 12 horas para a realização de novos ensaios.

Porém, o procedimento de homogeneização não correspondeu às expectativas. O princípio de funcionamento da bomba (centrífuga), aliado à restrição de sua zona de atuação, acabaram por tornar não homogêneo ainda mais o solo, criando um trecho de descontinuidade. A alta rotação da bomba alterava o índice de vazios do solo que por ela passava, aumentando o volume de água no interior da estrutura do mesmo. Isto reduziu drasticamente a resistência ao cisalhamento do solo por onde a bomba foi passada.

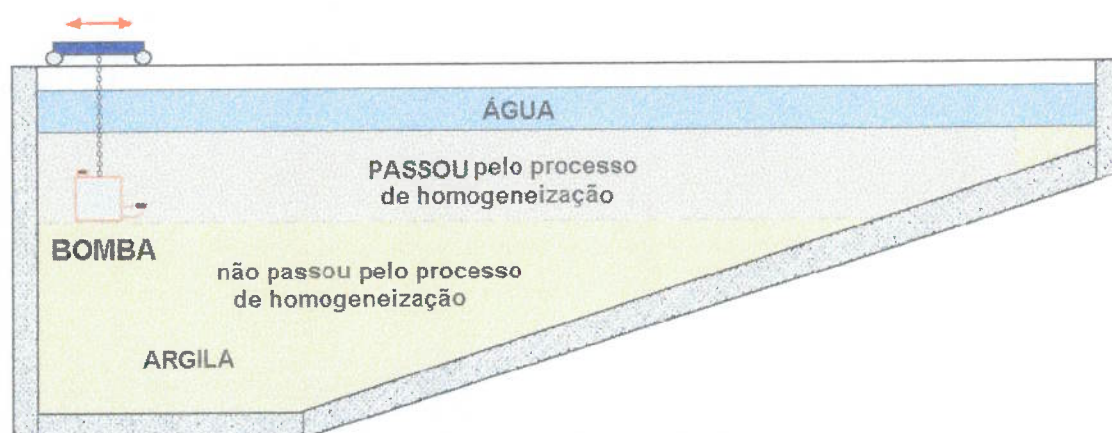


FIGURA 3.17 - Região de atuação no tanque da bomba lameira.

Devido ao seu tamanho, peso e aos recursos disponíveis para manipulá-la, a bomba somente atingia a região superficial do solo, faixa que vai de 0 a aproximadamente 70 *cm* de profundidade, conforme mostrado na FIGURA 3.17. Ou seja, para esta faixa de profundidade, a utilização contínua da bomba reduziu a resistência ao cisalhamento do solo. Já para a faixa na qual ela não atuou, (faixa com profundidade superior a 70 *cm*, aproximadamente) a resistência ao cisalhamento do solo continuou inalterada. Foi somente nesta faixa que o Instituto de Pesquisas Tecnológicas conseguiu medir as propriedades do solo, já que na faixa superficial o aparelho as registrava como nulas (item 3.3).

Este fato é aqui citado porque tem participação fundamental na interpretação dos resultados experimentais, principalmente no que tange à evolução das forças de tração presentes na linha de cravação, que assumem comportamentos distintos para a faixa de solo superficial (de 0 a 70 *cm*) e para a faixa seguinte (superior a 70 *cm*), conforme será visto adiante.

### **3.6 Especificações dos Ensaios**

De maneira similar ao realizado no capítulo 3, os ensaios experimentais aqui desenvolvidos estão agrupados em séries de simulações, cada uma delas visando evidenciar a influência de um determinado parâmetro na cravação. Porém, em virtude da maior dificuldade de realização dos ensaios experimentais em escala 1:20 face aos ensaios “virtuais” desenvolvidos no capítulo anterior, bem como à necessidade de adequação dos objetivos destes ensaios com os objetivos do projeto da VLA nacional<sup>[17]</sup> em desenvolvimento pelo CENO-USP, somente foram investigados, para a âncora CENO-ROF, a

influência do ângulo de ataque e a influência dos apêndices em sua cravação, correspondendo à primeira e segunda série de simulações aqui desenvolvidas, respectivamente.

A terceira série de simulações foi desenvolvida com o modelo em escala 1:20 da âncora **STEVANTA**. Esta série, ao contrário das anteriores cujo objetivo era evidenciar a influência de um determinado parâmetro na cravação, foi desenvolvida visando estabelecer uma relação entre os resultados dos ensaios realizados em laboratório, com os resultados dos testes realizados em mar<sup>[1]</sup> pela PETROBRAS, com esta mesma âncora em escala real, no que tange à comparação de suas trajetórias (único parâmetro cuja evolução foi medida tanto em mar como em laboratório).

### 3.6.1 Série E1: Influência do Ângulo de ataque

De maneira a se investigar a influência do ângulo de ataque, foram construídos, para o modelo da âncora **CENO-ROF** escala 1:20, três diferentes configurações de cabresto. Para cada configuração foram realizados 2 testes.

As alterações nos cabrestos foram efetuadas através da modificação do comprimento do cabresto de vante. As dimensões dos cabrestos ensaiados são mostradas na tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Comprimentos dos cabrestos ensaiados.

| Descrição do Cabresto | L VANTE [mm] | L RÉ [mm] |
|-----------------------|--------------|-----------|
| Cabresto #1           | 205          | 280       |
| Cabresto #2           | 210          | 280       |
| Cabresto #3           | 215          | 280       |

Cada configuração de cabresto determina um ângulo de ataque. A determinação dos ângulos envolvidos é conseguida resolvendo-se o mecanismo composto pela pata e o cabresto. O programa "Delta Plate Solver 1.0" resolve numericamente este problema, e está detalhadamente descrito no apêndice 3 deste trabalho. A tabela 3.2 mostra os ângulos encontrados pelo programa, para as três configurações de cabresto experimentadas.

TABELA 3.2 - Ângulo dos cabrestos ensaiados com a pata da âncora.

| Descrição do Cabresto | $\theta_{\text{VANTE}}$ [graus] | $\theta_{\text{RÉ}}$ [graus] |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Cabresto #1           | 51,6                            | 37,6                         |
| Cabresto #2           | 56,0                            | 40,9                         |
| Cabresto #3           | 60,0                            | 44,1                         |

### 3.6.2 Série E2: Influência do Apêndice de Ré

De maneira a se investigar a influência do apêndice de ré na cravação, foram realizados, para o modelo em escala 1:20 da âncora **CENO-ROF**, um teste com a presença do apêndice, e outro sem a presença do mesmo. As dimensões do apêndice de ré versão AP04, instalado no modelo de âncora podem ser encontradas no APÊNDICE 1 desta dissertação. A FIGURA 3.17 mostra o apêndice de ré aparafusado na pata do modelo de âncora **CENO-ROF** escala 1:20. Para removê-lo, basta retirar-se o parafuso.

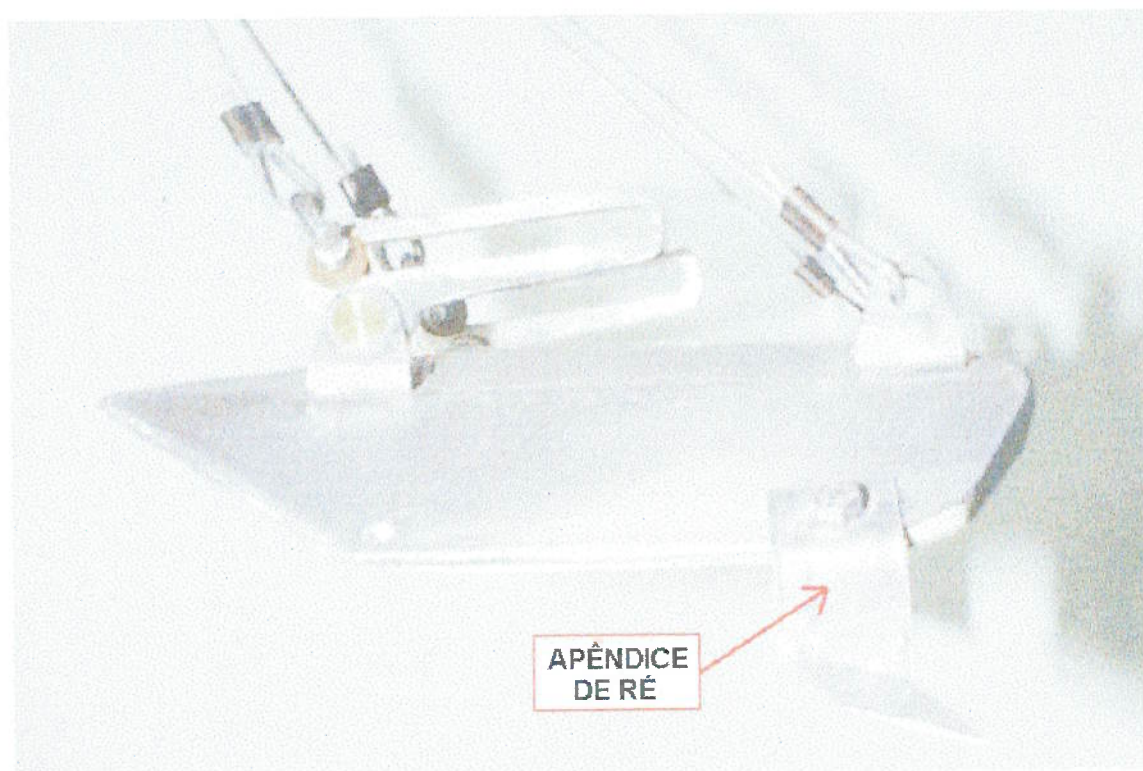


FIGURA 3.18- Detalhe do Apêndice de Ré aparafusado na pata do modelo da âncora Petrobrás **CENO-ROF** escala 1:20.

### 3.6.3 Série E3: *Ensaios com uma Âncora Comercial*

Foram realizados 6 testes com o modelo em escala 1:20 da âncora **STEVANTA**. Conforme já dito anteriormente, no início deste capítulo, esta série, ao contrário das anteriores, foi desenvolvida visando estabelecer uma relação entre os resultados dos ensaios realizados em laboratório com os resultados dos testes realizados em mar<sup>[1]</sup> pela **PETROBRAS**, com esta mesma âncora em escala real. A configuração dos cabrestos é portanto a mesma configuração adotada nos testes em mar, sendo o ângulo de ataque de 44 graus.



## 3.7 Resultados

### 3.7.1 Série E1: Influência do Ângulo de Ataque

Conforme supracitado em 3.6.1, foram analisadas 3 configurações, de cabresto. Para cada configuração foram realizados 2 testes. São aqui apresentados os resultados destes testes na forma de cinco gráficos. Cada gráfico mostra a evolução de um dos seguintes parâmetros em função da profundidade do centro de gravidade da âncora:

- O arrasto do centro de gravidade do modelo de âncora;
- A força aplicada na linha de cravação;
- O ângulo de orientação da pata do modelo de âncora;
- A orientação da linha de cravação no ponto de contato com o anel redirecionador do fuso (fuso ilustrado na FIGURA 3.19);
- A velocidade escalar desenvolvida pelo modelo de âncora.

Observando-se a FIGURA 3.20, pode-se concluir que, para os testes apresentados na figura, o ângulo de ataque praticamente não tem qualquer influência na trajetória descrita pela âncora. Mas sabemos que isto não é verdade, não somente devido às conclusões inferidas anteriormente através da observância dos resultados das simulações numérico-computacionais, mas principalmente, devido à constatação em mar desta influência através dos testes realizados com os diferentes ângulos de ataque da âncora **DENLA MK3** (a ser visto mais adiante no capítulo 5 - FIGURA 5.4). Então, como explicar os resultados experimentais da FIGURA 3.20?

A explicação passa, antes de tudo, pelo solo presente no tanque de prova. Conforme citado no item 3.5.2 deste trabalho, foi utilizada uma bomba

centrífuga como procedimento de homogeneização do solo. E de fato, a bomba homogeneizou o solo por onde foi passada. Mas quanto ao resultado desta operação de homogeneização, cabem duas importantes considerações:

- (i) O princípio de funcionamento da bomba reside no turbilhonamento, à alta velocidade, do material que passa por seu rotor centrífugo. Este processo mecânico muda o índice de vazios do solo<sup>[9]</sup>, porque altera a distribuição interna de volumes ocupados pelas fases sólida, líquida e gasosa, presentes na estrutura do solo. Como consequência, temos uma imediata alteração nas propriedades do mesmo, fazendo com que, no caso específico do que aconteceu no tanque de prova, o solo turbilhonado tivesse sua resistência ao cisalhamento bastante reduzida em relação à resistência apresentada antes do processo de homogeneização.
- (ii) O método de passagem da bomba centrífuga, apesar de homogeneizar a camada superficial, tornou o solo não homogêneo numa escala maior, no sentido de que a bomba centrífuga somente atuou na camada de 0 a 70 cm de profundidade. Na época, era impraticável, com os recursos disponíveis no laboratório, levar a bomba a uma profundidade superior a 70 cm. Resultado: criou-se uma camada de solo com resistência ao cisalhamento praticamente constante, e de valor efetivamente baixo, para a faixa de profundidade que vai de 0 a 70 cm de profundidade, e outra camada, na qual não atuou a bomba centrífuga, com resistência ao cisalhamento superior e crescente com a profundidade.

Naturalmente, quando se constatou que o procedimento de homogeneização do solo estava de fato provocando uma heterogeneidade num contexto maior, além de praticamente liquefazer a camada superficial, o estrago já estava feito.

Com estas considerações em mente, pode-se agora melhor entender, e conseqüentemente melhor explicar os resultados experimentais desenvolvidos no tanque de prova com os modelos de âncoras em escala 1:20.

No que tange aos resultados apresentados na FIGURA 3.20, as baixas resistências ao cisalhamento da camada de solo superficial podem ter influenciado de tal maneira as trajetórias, de modo que o modelo de âncora deixe de penetrar na direção de orientação de sua pata. Neste caso, os ângulos de ataque passam a ter pouca influência na construção das trajetórias das âncoras.

Ao observarmos as trajetórias descritas pelos modelos de âncora, iremos notar que, para o valor de arrasto de 250cm, a configuração com o maior ângulo de ataque (cabresto #3), é a que apresenta a menor profundidade atingida, o que é completamente contra o bom senso e contra os resultados já alcançados em mar com a âncora DENLA MK3. A partir da profundidade de 75 cm, esta configuração (cabresto 3), inverte seu comportamento, passando a apresentar maiores ganhos de profundidade do que as demais configurações.

Esta súbita mudança de comportamento pode estar associada à referida descontinuidade do solo. Para a faixa de profundidade inferior a 75 cm, o modelo de âncora apresentou um comportamento anormal, provavelmente penetrando numa direção diferente da definida pela inclinação de sua pata, tendo aí o ângulo de ataque muito pouca influência. Ao encontrar um solo mais

coeso, a aproximadamente 70 cm de profundidade, com maiores resistências ao cisalhamento, a trajetória passou a ser mais fortemente influenciada pelo ângulo de ataque da âncora, passando o modelo a apresentar um comportamento mais condizente com a realidade, realidade esta, já constatada nos testes realizados em mar com a âncora **DENLA MK3** (vide FIGURA 5.4), e nas próprias simulações em computador desenvolvidas com a âncora **CENOROF**.

Com relação aos esforços de cravação, podemos notar, ao se observar a FIGURA 3.21, que o esforço de tração presente na linha de cravação permanece constante, por volta de 4 a 5 kgf, até que o centro de gravidade da pata da âncora atinja a profundidade aproximada de 70 cm. A partir daí, o esforço na linha de cravação cresce, num ritmo acentuado, e cuja curva se assemelha a uma exponencial, até o término da cravação, quando o modelo de âncora em escala 1:20 atinge a profundidade de 110 cm, e o esforço bate na casa dos 30 kgf. Isto mostra claramente uma mudança de comportamento do solo, exatamente na faixa limite de atuação da bomba centrífuga, uma vez que a configuração geométrica da âncora, bem como seu ângulo de ataque, permaneceram inalterados para cada curva representada na FIGURA 3.21.

Somando-se à influência do solo, outro fator merece atenção especial no que tange à compreensão dos resultados experimentais, especialmente quanto às trajetórias apresentadas pelos modelos de âncora em escala 1:20. Este fator se refere ao fuso, o elemento redirecionador da linha de cravação (item 3.4.1 desta dissertação). O modo de programação do fuso impõe, caso o segmento de reta que vai do ponto com coordenadas definidas pelo centro de gravidade da âncora, até o ponto com coordenadas definidas pelo próprio fuso, atinja uma

inclinação superior a 8 graus, que o fuso altere sua posição vertical, de modo a não deixar esta inclinação passar do valor especificado. A FIGURA 3.22 mostra a evolução da inclinação da linha de cravação, para as configurações de cabresto ensaiadas, em função da profundidade do modelo de âncora. A FIGURA 3.19 mostra, em particular para o ensaio experimental C1, o posicionamento do fuso em sucessivos instantes do processo de cravação.

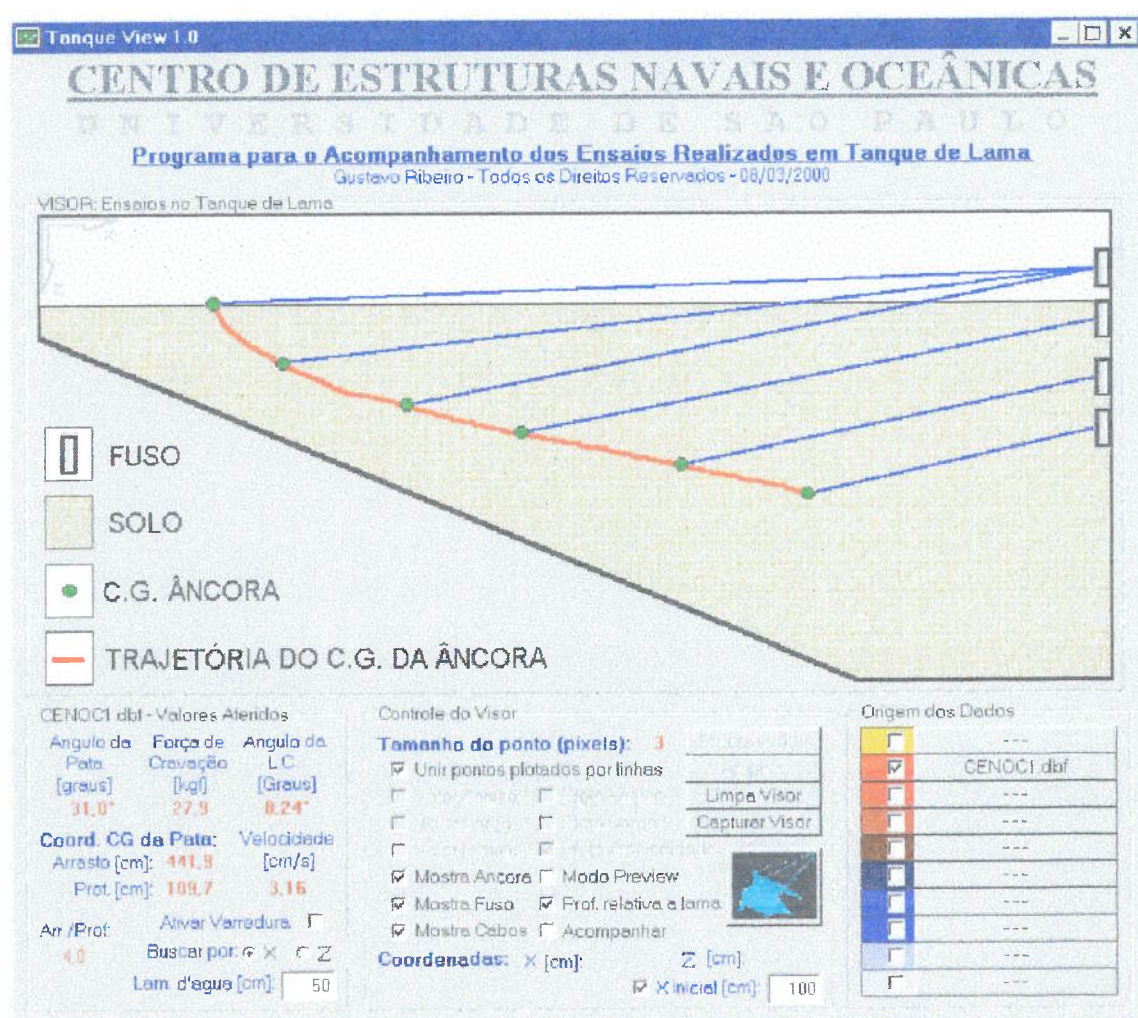


FIGURA 3.19 - Posicionamento do fuso em sucessivos instantes do processo de cravação.

A FIGURA 3.22 mostra que o ângulo de inclinação da linha de cravação no ponto de contato com o fuso (aproximado pela inclinação do segmento de reta que vai do fuso até a âncora), aumenta gradativamente até a profundidade

de 60 cm. A partir daí, o valor da inclinação da linha de cravação se mantém constante, em torno de 8 graus. Ou seja, o fuso começa, a partir desta profundidade, a se reposicionar, de modo a evitar que o valor da referida inclinação exceda os 8 graus.

O fuso foi construído para maximizar o comprimento do tanque, através da manipulação da linha de cravação. Sendo reposicionado à medida que o modelo de âncora ganhasse profundidade, o fuso intencionalmente modificaria o ponto de tracionamento da linha de cravação, de modo a compatibilizá-la com o que de fato acontece em mar. Porém, seu atual estado de programação não permite que a forma em catenária assumida pela linha de cravação no mar seja reproduzida no tanque. Por que?

Porque no mar, o trecho do fore-runner que aflora na superfície do solo é que tem sua inclinação impedida de exceder os 8 graus, durante toda a cravação (vide FIGURA 2.31). E como isso é conseguido? Através da linha de peso, que tem um comprimento tal que, ao término da operação de cravação da VLA, o ângulo que a linha de cravação forma com a superfície do leito marinho, especificamente o fore-runner, não exceda 8 graus de inclinação (item 1.4.2 desta dissertação).

Neste contexto, o trecho do fore-runner dentro do solo marinho fica livre para assumir a forma geométrica em catenária invertida - FIGURA 2.32 (b) -, fruto de sua interação com o solo, de modo que o ângulo de inclinação de cada segmento de fore-runner cresça continuamente ao longo da profundidade, até atingir seu valor máximo no ponto de conexão com a âncora.

No caso dos ensaios experimentais desenvolvidos no tanque de prova, a programação atual do fuso, aliada a baixa resistência ao cisalhamento da

camada superficial do solo, que ameniza a forma em catenária invertida assumida linha de cravação, faz com que, o ângulo de inclinação da linha de cravação, no ponto de conexão com a âncora, seja impedido de crescer com o ganho de profundidade da âncora. Para compreender melhor este raciocínio, basta imaginarmos que, caso o modelo de âncora percorresse toda a extensão do tanque, estando a uma determinada profundidade, e bem próximo ao fuso (por exemplo, a uns 20 cm de distância deste), o ângulo que a linha de cravação estaria formando no ponto de contato com a âncora, seria exatamente de 8 graus, uma vez que a coordenada do modelo de âncora estaria praticamente sobre a coordenada do fuso redirecionador da linha de cravação (vide evolução do posicionamento do fuso na FIGURA 3.19). Ou seja, estaria sendo imposto, neste caso, que ao término da cravação o ângulo de orientação da linha de cravação no ponto de contato com a âncora seja de 8 graus, imposição esta, que não acontece no mar, conforme mostram os resultados da FIGURA 2.28 (a).

O modo atual de programação do fuso também impede a ocorrência do fenômeno de horizontalização da trajetória, uma vez que este fenômeno é essencialmente dependente da variação da inclinação da linha de cravação no ponto de contato com a âncora. Por esse motivo, este fenômeno não pode ser constatado nos ensaios desenvolvidos no tanque de prova, apesar de já verificada sua ocorrência nos ensaios em mar e nas simulações em computador.

Com relação ao ângulo de inclinação da pata da âncora, a observância da FIGURA 3.23 mostra que, conforme se aumenta sua profundidade, esse ângulo diminui, até se estabilizar numa faixa que vai de 30 a 40 graus,

conforme o ângulo de ataque da âncora. Curiosamente, a estabilização em torno desse valor se dá a partir 60 cm de profundidade. Mas o que acontece exatamente nesta profundidade?

É exatamente nesta profundidade que o fuso começa a agir, conforme nos mostra ainda mais claramente a FIGURA 3.23. Ou seja, a partir da profundidade de 60 cm, o fuso passa indiretamente a interferir no processo gradual de reorientação da pata da âncora, uma vez que começou a manter constante o ângulo de inclinação da linha de cravação em 8 graus, num ponto cada vez mais próximo à âncora. Neste contexto, é importante lembrar que quanto menor o comprimento de cabo em contato com o solo, tanto mais suave será a forma em catenária assumida pela linha de cravação, tornando-se cada vez mais retilínea.

No mar, conforme mostrado na FIGURA 2.28 através das simulações numérico-computacionais, a tendência é que o ângulo de inclinação da linha de cravação, no ponto de contato com a âncora, aumente progressivamente com a profundidade, se estabilizando somente quando a âncora horizontalizar sua trajetória. Já nos ensaios experimentais, o fuso precocemente estabiliza a orientação da linha de cravação num ponto, que não é nem o ponto de contato com a âncora, nem o ponto no qual a linha de cravação aflora na superfície, mas sim, um ponto intermediário entre estes dois extremos. O problema vai se agravando à medida que a âncora se aproxima do fuso, porque esse ponto de controle de inclinação da linha de cravação passa a aproximar-se do ponto de conexão desta com a âncora. Ou seja, cada vez mais, o fuso impõe uma restrição ao natural crescimento do ângulo de inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora, crescimento este naturalmente observado



nas simulações desenvolvidas - FIGURA 2.28. Esta restrição, indiretamente, impede o efeito supracitado de reorientação da pata da âncora em busca de uma orientação tal, que proporcione o equilíbrio de forças e momentos, impedindo a ocorrência do fenômeno de horizontalização da trajetória.

É neste contexto que os ensaios experimentais serão enfocados, porque, caso contrário, a simples observância dos resultados, sem os critérios prévios apresentados, certamente levará a falsas conclusões. Neste âmbito, os ensaios experimentais efetivamente não puderam comprovar a influência do ângulo de ataque no processo de cravação das VLAs, bem como comprovar a ocorrência do fenômeno de horizontalização de suas trajetórias.

Para finalizar, a velocidade desenvolvida pelo modelo de âncora em escala 1:20, apresentada na FIGURA 3.24 para a série de experimentos E1, apresenta valores escalares da ordem de 2 e 3 cm/s. Em escala 1:1, esta velocidade estaria situada entre 40 e 60 cm/s. Considerando que, um rebocador de 200 toneladas de Bollard-Pull (força propulsora), se movimenta a 0.8 nós (41 cm/s) numa operação de cravação, a velocidade desenvolvida pelo modelo de âncora se mostrou compatível com a velocidade de cravação desenvolvida em mar.

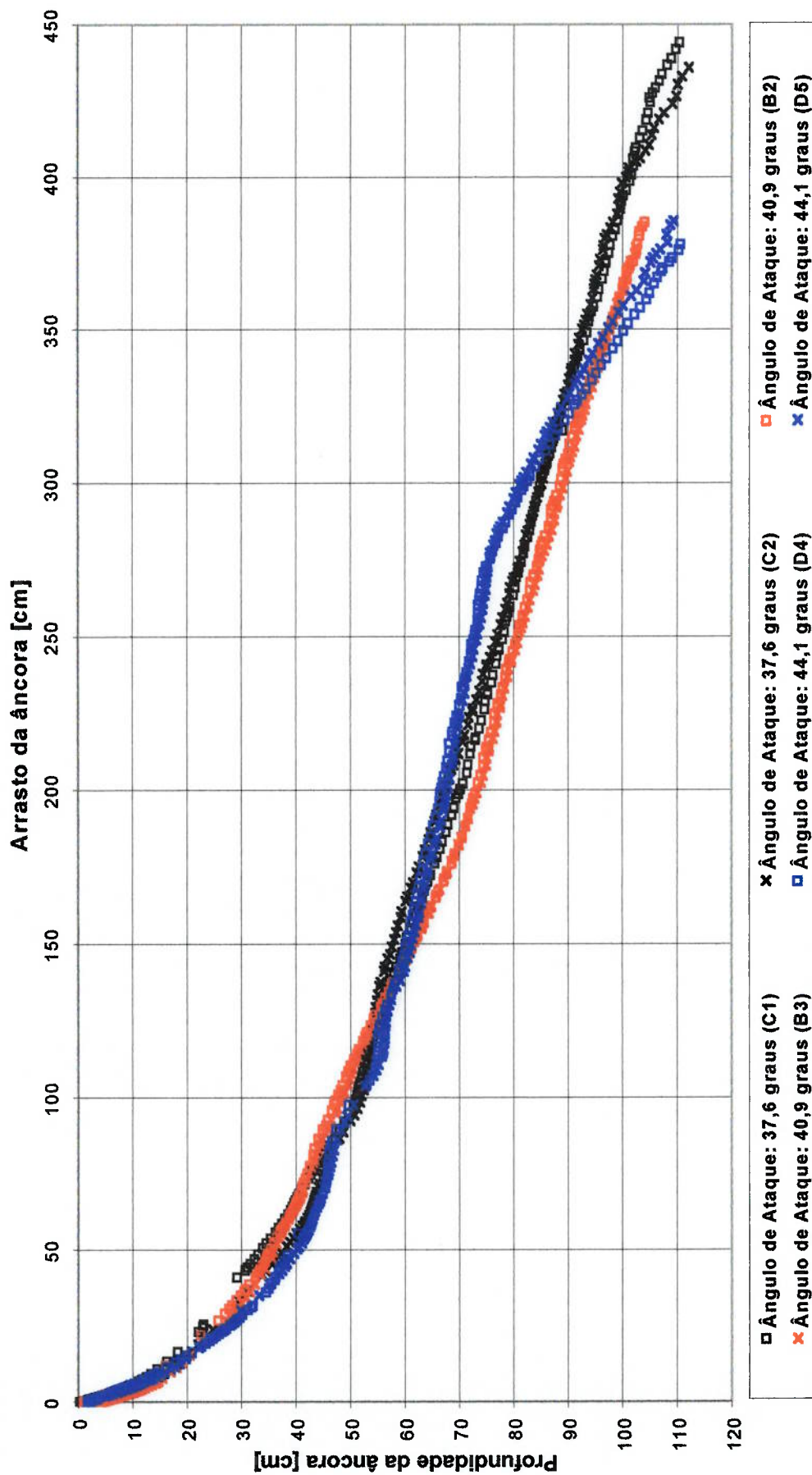


FIGURA 3.20 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E1.

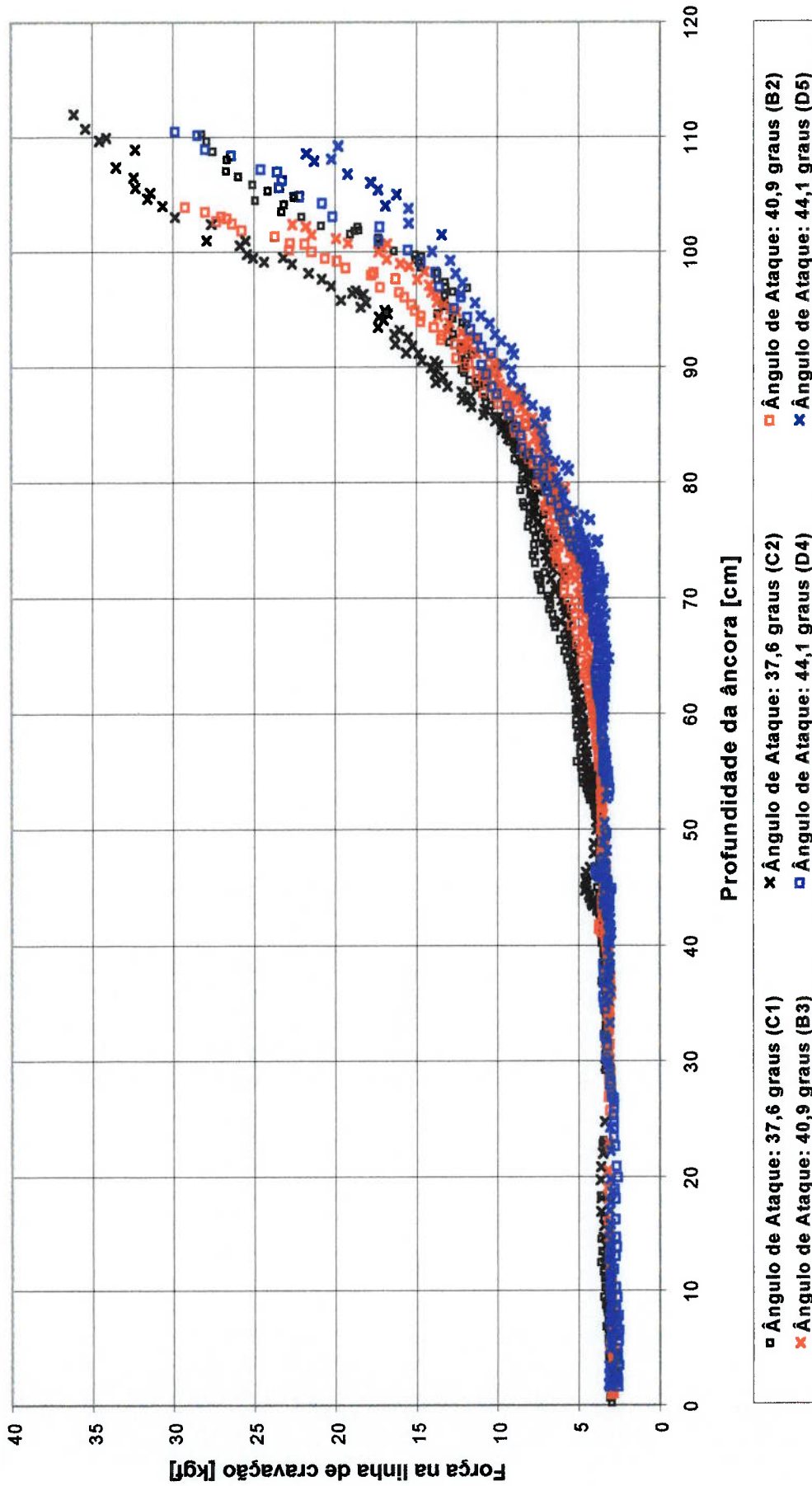


FIGURA 3.21 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Força na linha de cravação x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E.1.

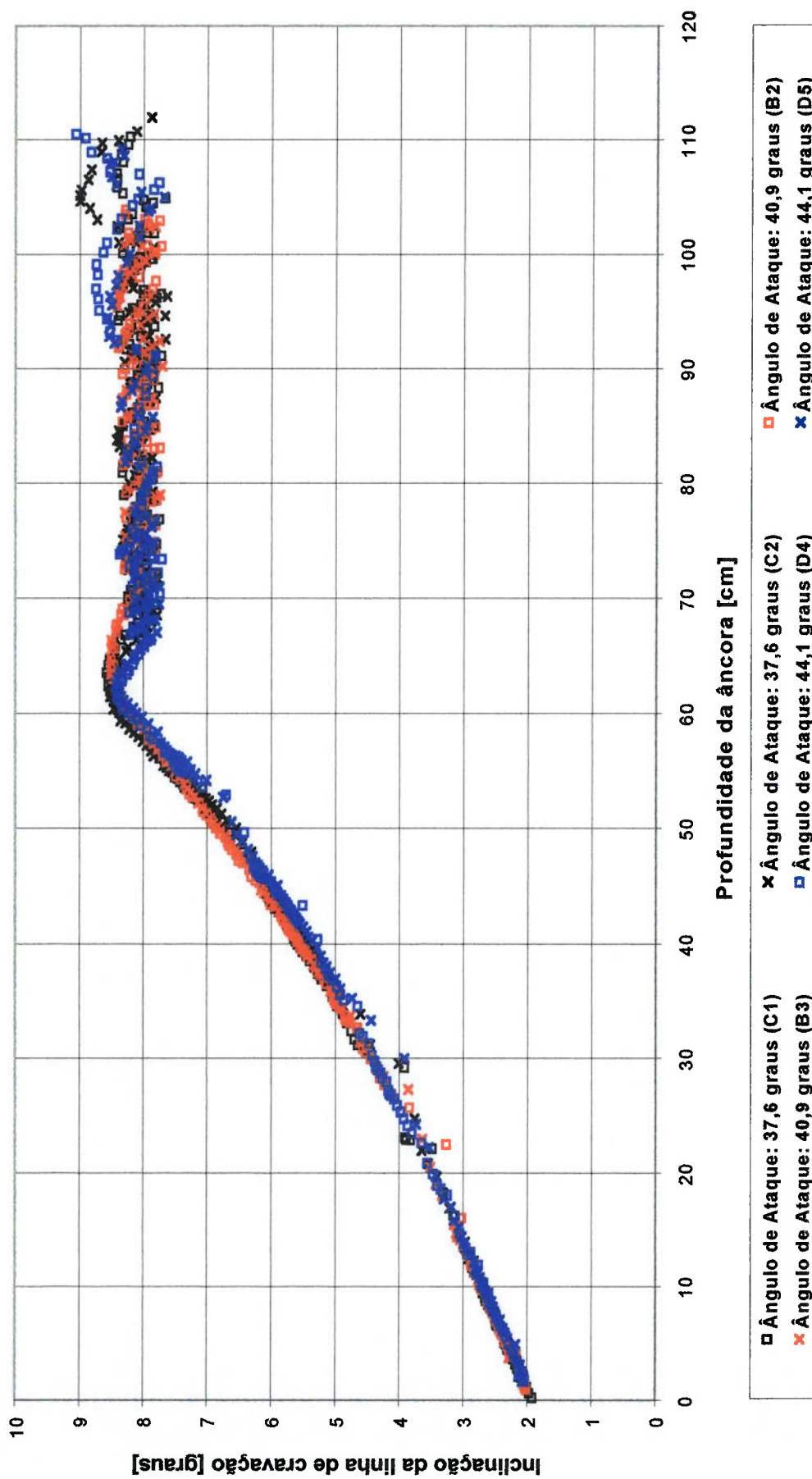


FIGURA 3.22 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Ângulo de inclinação da linha de cravação x Profundidade do centro de da âncora, correspondente a série de experimentos E1.

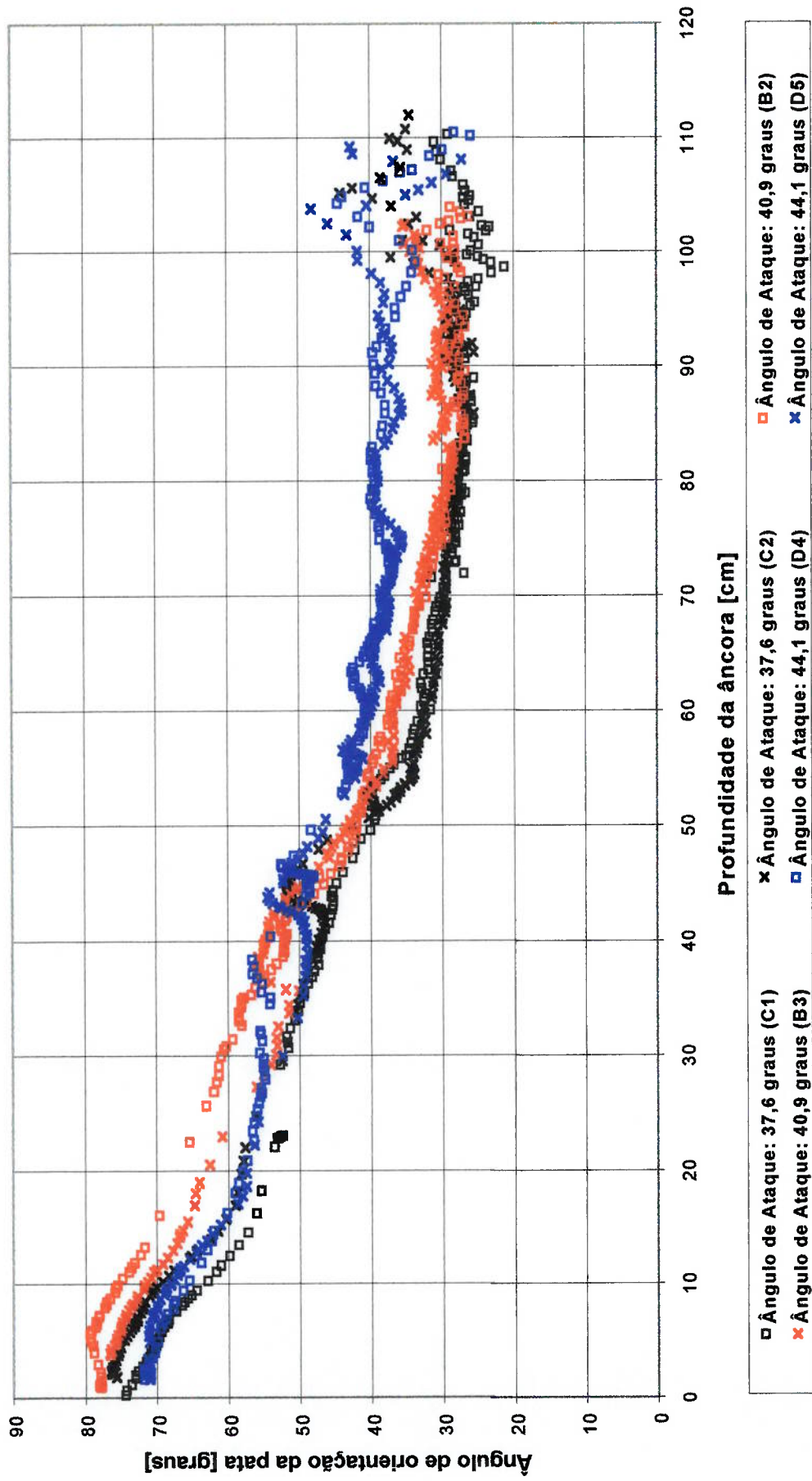


FIGURA 3.23 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Ângulo de orientação da pata x profundidade do centro de da âncora, correspondente a série de experimentos E1.

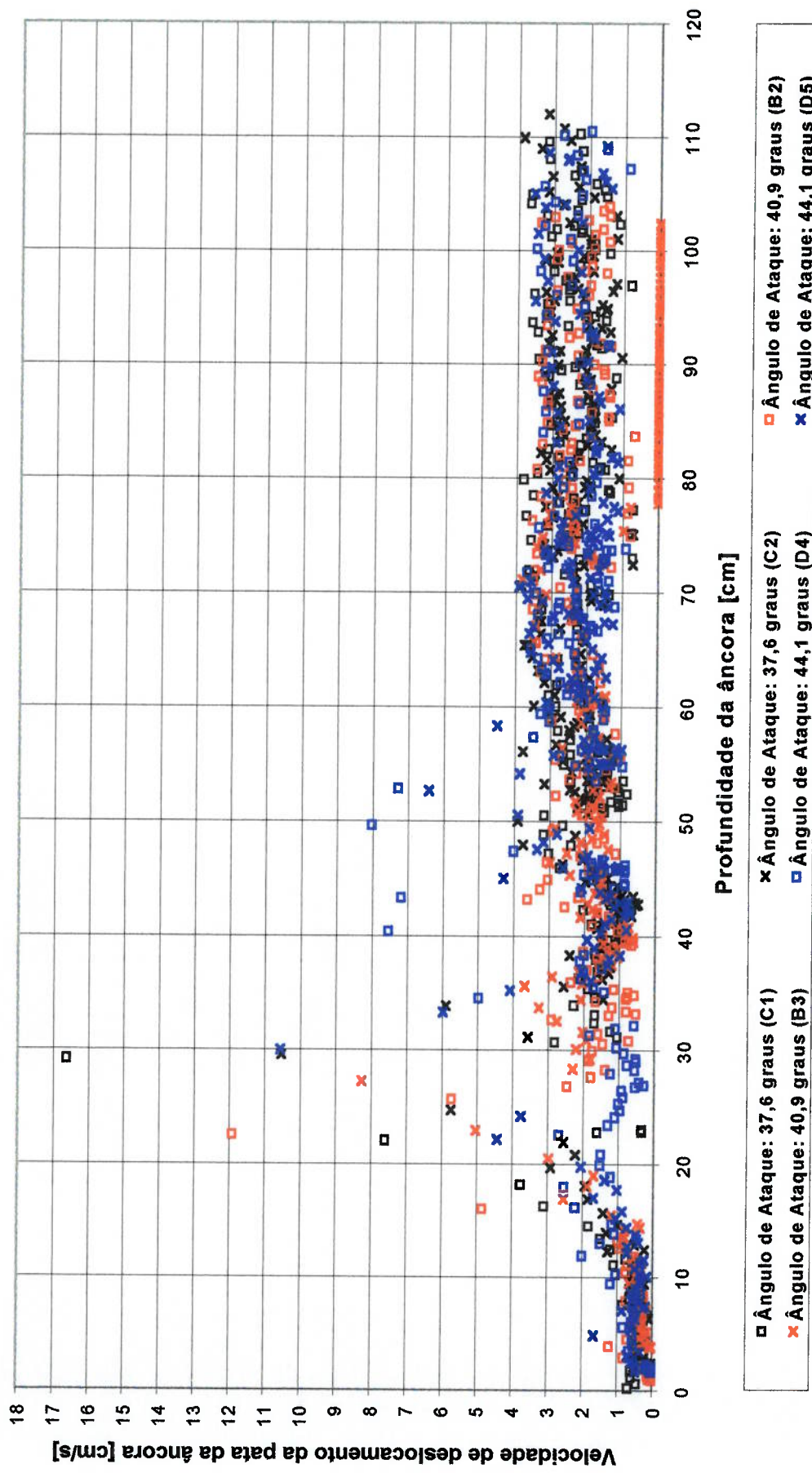


FIGURA 3.24 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Velocidade de deslocamento da pata x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E1.

### 3.7.2 *Série E2: Influência do Apêndice de Ré*

Conforme supracitado em 3.6.2, foram analisadas uma configuração de pata com apêndice de ré instalado e uma configuração sem apêndice. São aqui apresentados os resultados destes testes na forma de cinco gráficos. Cada gráfico mostra a evolução de um dos seguintes parâmetros em função da profundidade do centro de gravidade da âncora:

- O arrasto do centro de gravidade do modelo de âncora;
- A força aplicada na linha de cravação;
- O ângulo de orientação da pata do modelo de âncora;
- A orientação da linha de cravação no ponto de contato com o anel redirecionador do fuso;
- A velocidade escalar desenvolvida pelo modelo de âncora.

A FIGURA 3.25 mostra que a presença do apêndice AP04 no modelo experimental de âncora **CENO-ROF** aumentou a profundidade de penetração da âncora para um mesmo arrasto, quando comparada com a versão sem apêndice instalado. A FIGURA 3.26 mostra, também, que a tendência se repete com relação aos esforços: a presença do apêndice aumenta os esforços atuantes na linha de cravação.

A FIGURA 3.26 mostra, ainda, que o esforço presente na linha de cravação começa a subir acentuadamente a partir da profundidade de 65 cm, para qualquer uma das configurações experimentais ensaiadas. Este comportamento, já constatado nos ensaios experimentais anteriormente analisados (série de experimentos E1), vem a fortalecer o argumento de que o solo, para a camada superficial que vai de 0 a 70 cm de profundidade,

apresentava uma resistência ao cisalhamento baixa e de valor constante, que fazia com que o esforço presente na linha de cravação, na figura, dificilmente ultrapassasse 10 kgf. Já a partir de 65 cm profundidade, o solo passa a apresentar uma maior coesão entre suas partículas, e sua resistência ao cisalhamento passa a crescer com a profundidade, elevando as tensões na linha de cravação acima de 50 kgf.

Pode-se verificar que a presença do apêndice AP04, pelo menos qualitativamente, aumentou o ângulo de orientação da pata da âncora, com relação à configuração sem apêndice, confirmando a tendência já observada nas simulações numérico-computacionais. A tendência de estabilização do ângulo de orientação ao redor de zero não foi constatada nos ensaios experimentais - FIGURA 3.28 -, apesar de verificada nos ensaios numérico computacionais - FIGURA 2.36 -. Com relação a isto, cabem as mesmas considerações feitas no item anterior, com relação ao posicionamento do fuso e as baixas resistências ao cisalhamento apresentadas pelo solo para a faixa de 0 a 70 cm de profundidade, e nelas residem as possíveis explicações para a não ocorrência do fenômeno de horizontalização da trajetória, bem como para a tendência de não alinhamento da pata com a horizontal, observado nas simulações numérico-computacionais. Além disto, a partir de 70 cm de profundidade, o sistema de medição da posição da âncora passa a apresentar imprecisões de leitura, dificultando a interpretação dos resultados.

Os resultados das simulações numérico computacionais, descritos no capítulo 2, revelaram, portanto, uma maior influência dos apêndices na cravação das VLAs, do que os resultados dos ensaios experimentais.



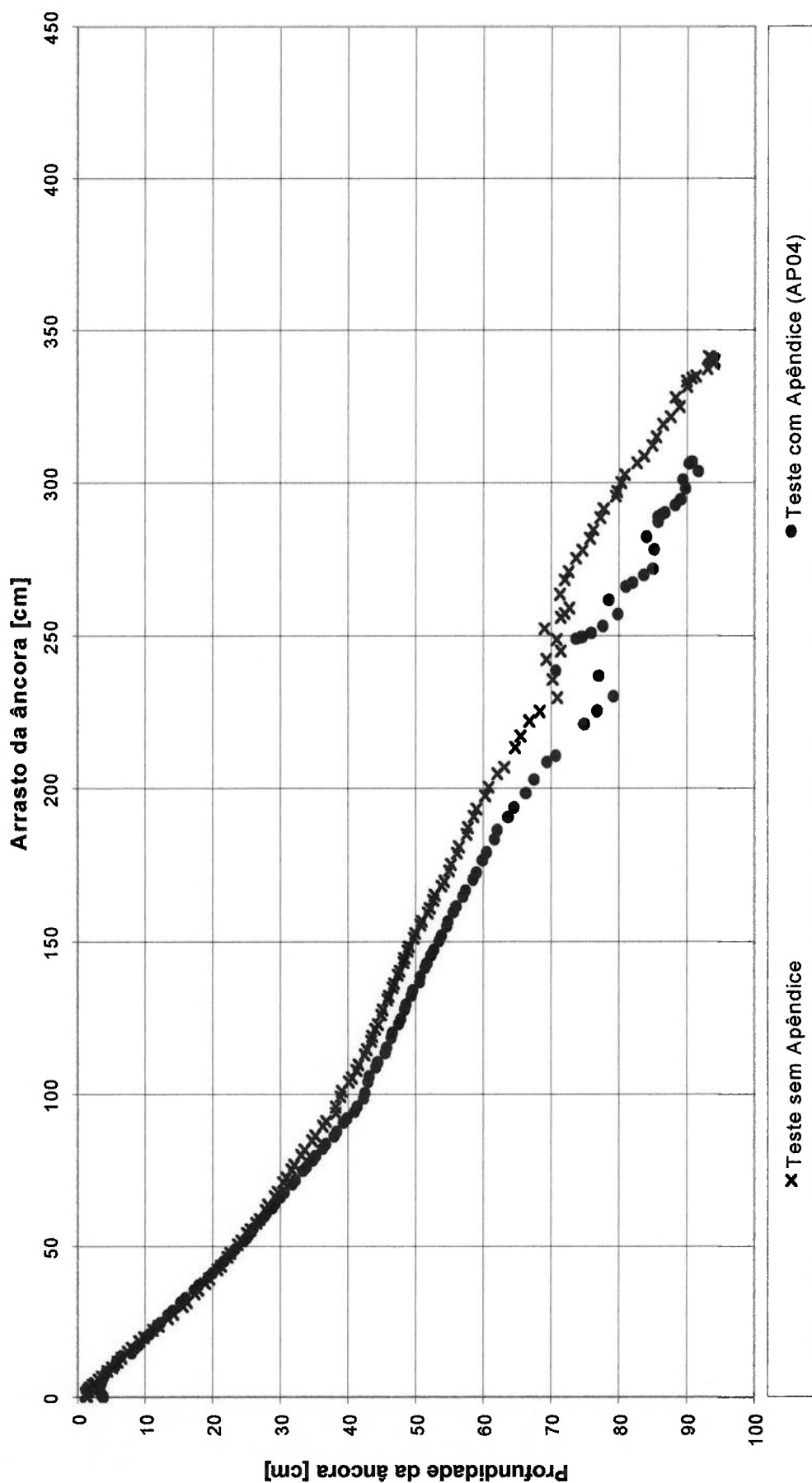


FIGURA 3.25 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.

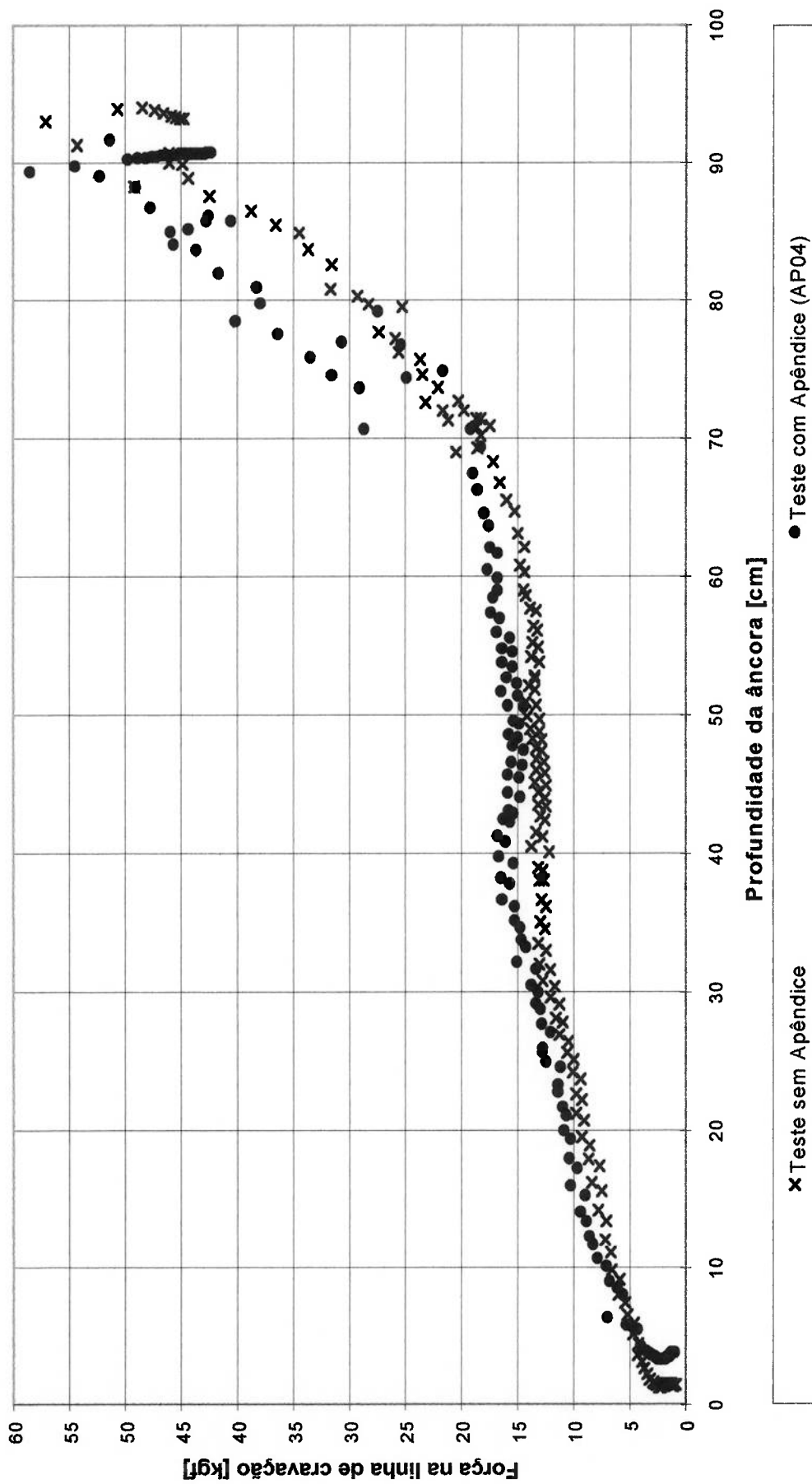


FIGURA 3.26 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Força na linha de cravação x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.

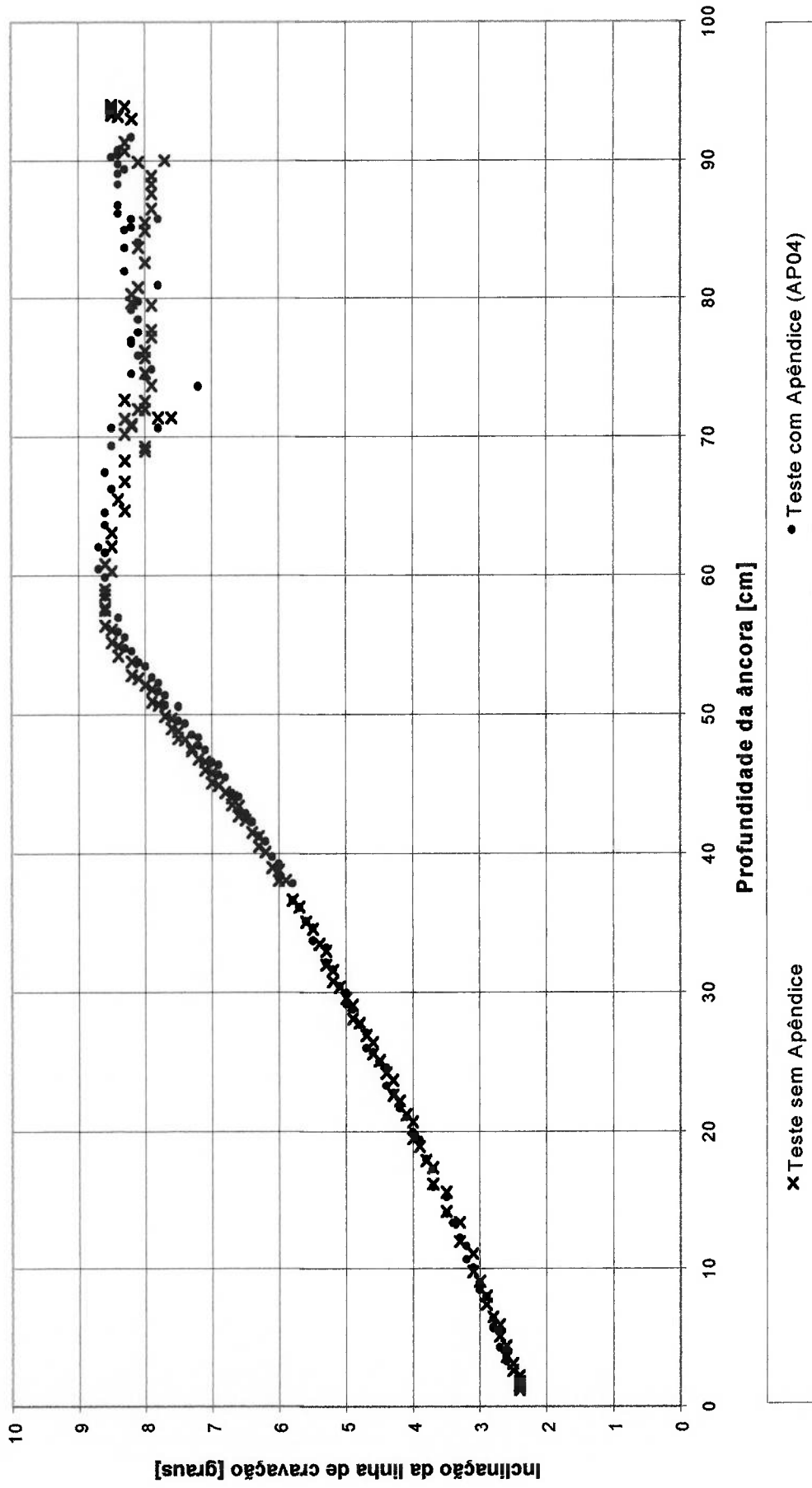


FIGURA 3.27 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Ângulo de inclinação da linha de cravação x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.

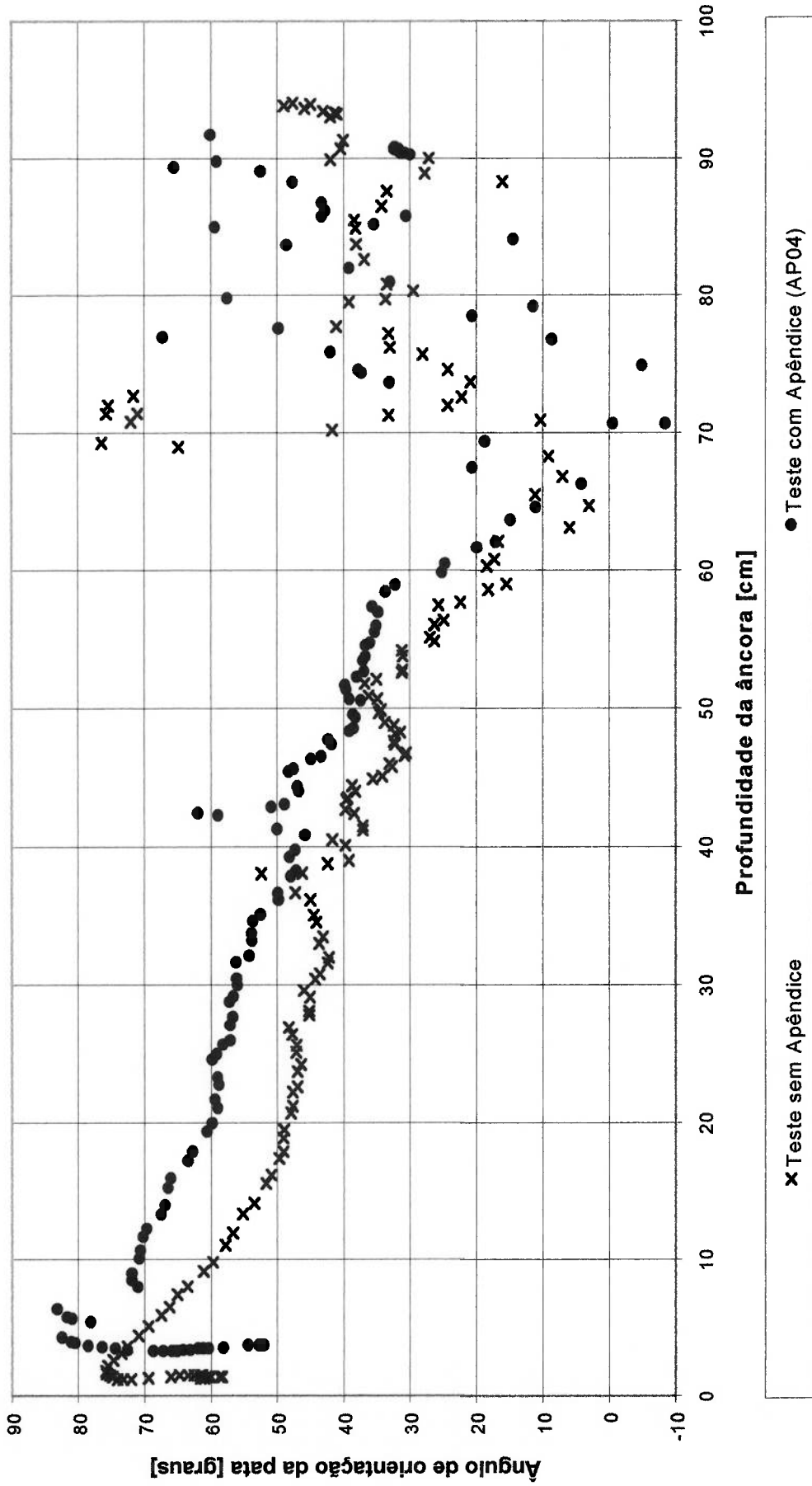


FIGURA 3.28 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Ângulo de orientação da pata x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.

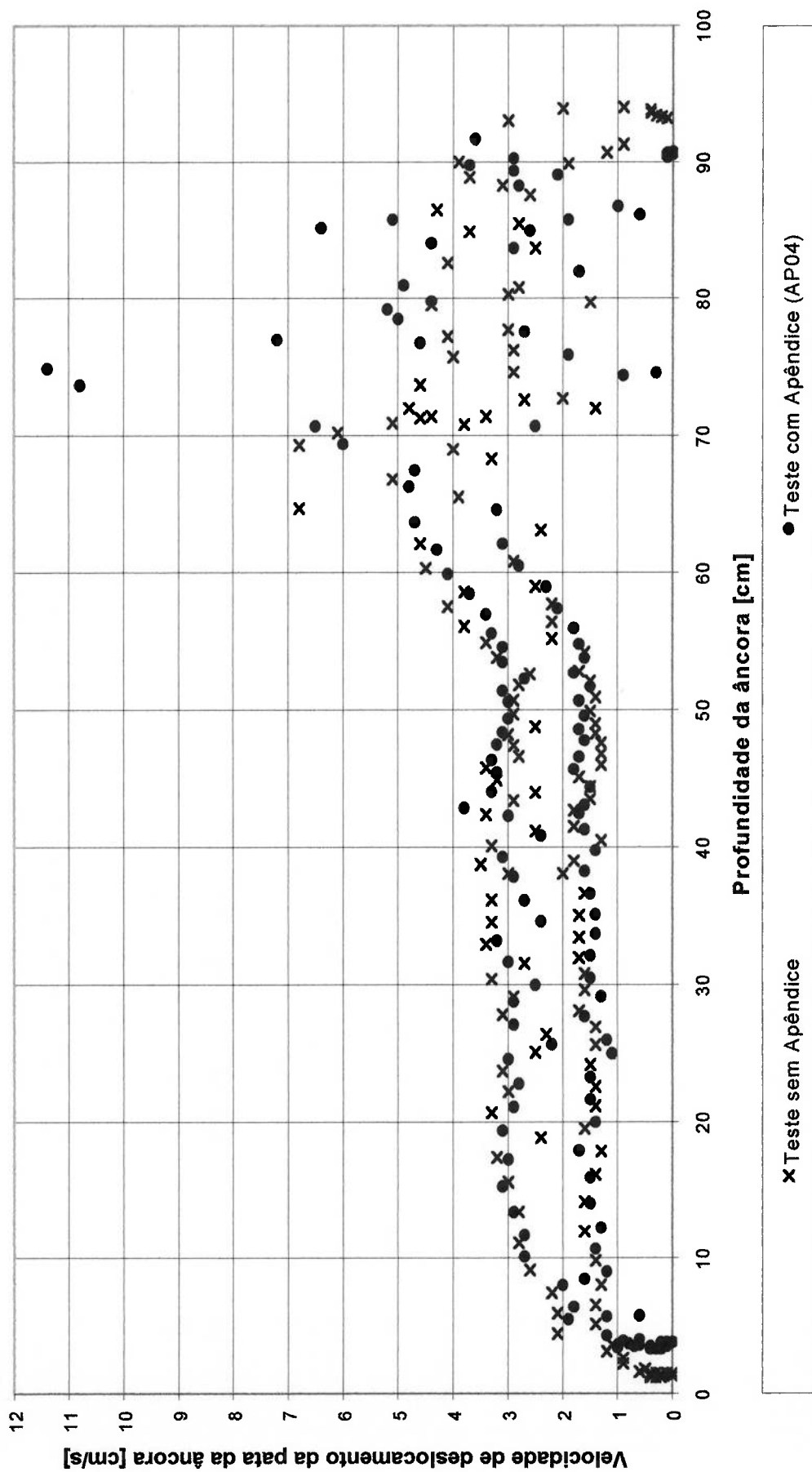


FIGURA 3.29 - Modelo experimental da âncora CENO-ROF escala 1:20: Velocidade de deslocamento da pata x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E2.

### **3.7.3 Série E3: Ensaio com uma Âncora Comercial**

Conforme supracitado em 3.6.3, serão aqui apresentados os resultados dos 6 testes realizados para a configuração ideal do modelo em escala 1:20 da âncora STEVMANTA.

São aqui apresentados os resultados destes testes na forma de cinco gráficos. Cada gráfico mostra a evolução de um dos seguintes parâmetros em função da profundidade do centro de gravidade da âncora:

- O arrasto do centro de gravidade do modelo de âncora;
- A força aplicada na linha de cravação;
- O ângulo de orientação da pata do modelo de âncora;
- A orientação da linha de cravação no ponto de contato com o anel redirecionador do fuso;
- A velocidade escalar desenvolvida pelo modelo de âncora.

A análise desta série se encontra no capítulo 5, onde as trajetórias aqui apresentadas são confrontadas com as trajetórias dos testes de mar realizados pela Petrobrás.

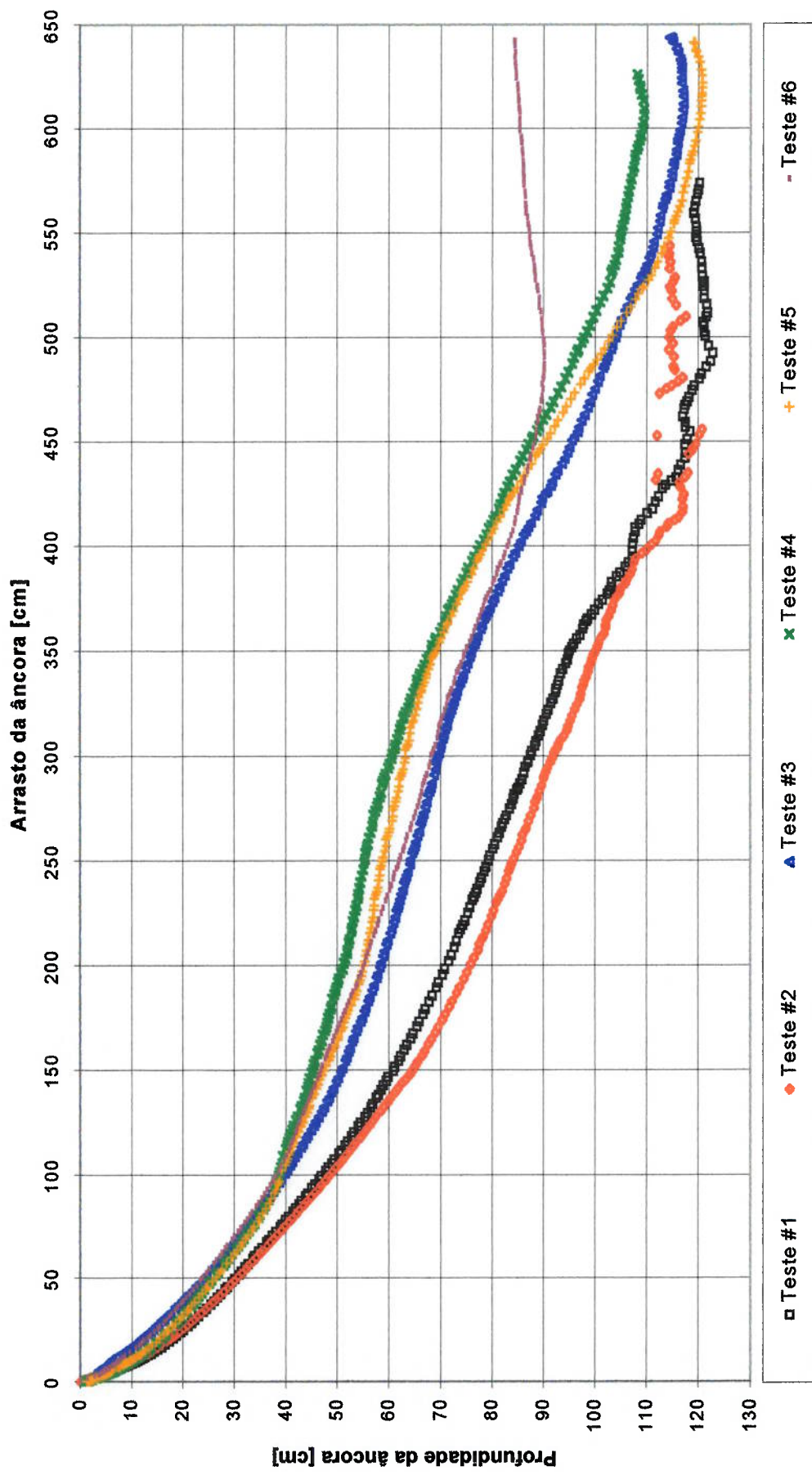


FIGURA 3.30 - Modelo experimental da âncora STEVMANTA escala 1:20: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.

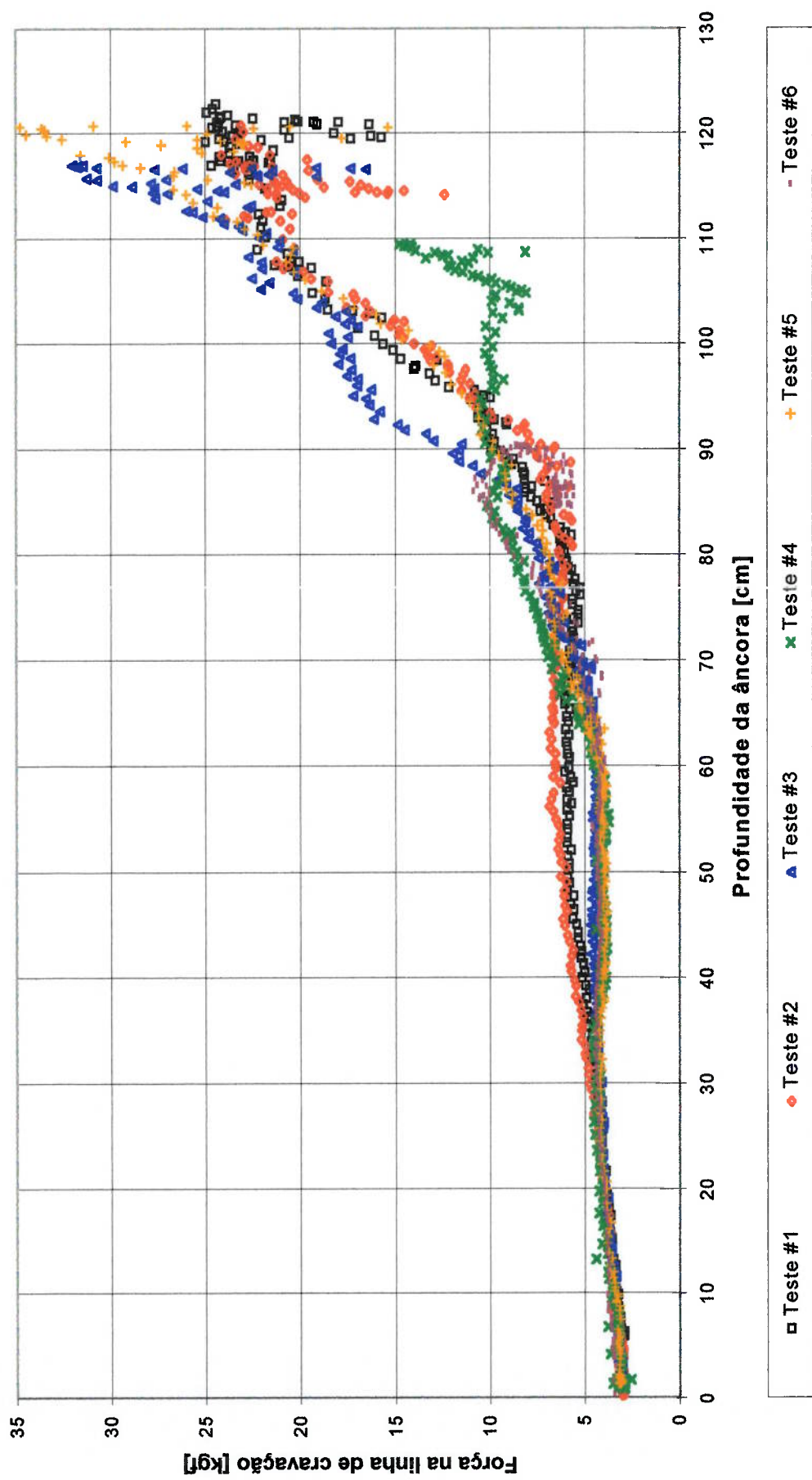


FIGURA 3.31 - Modelo experimental da âncora STEVMANTA escala 1:20: Força na linha de cravação x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.



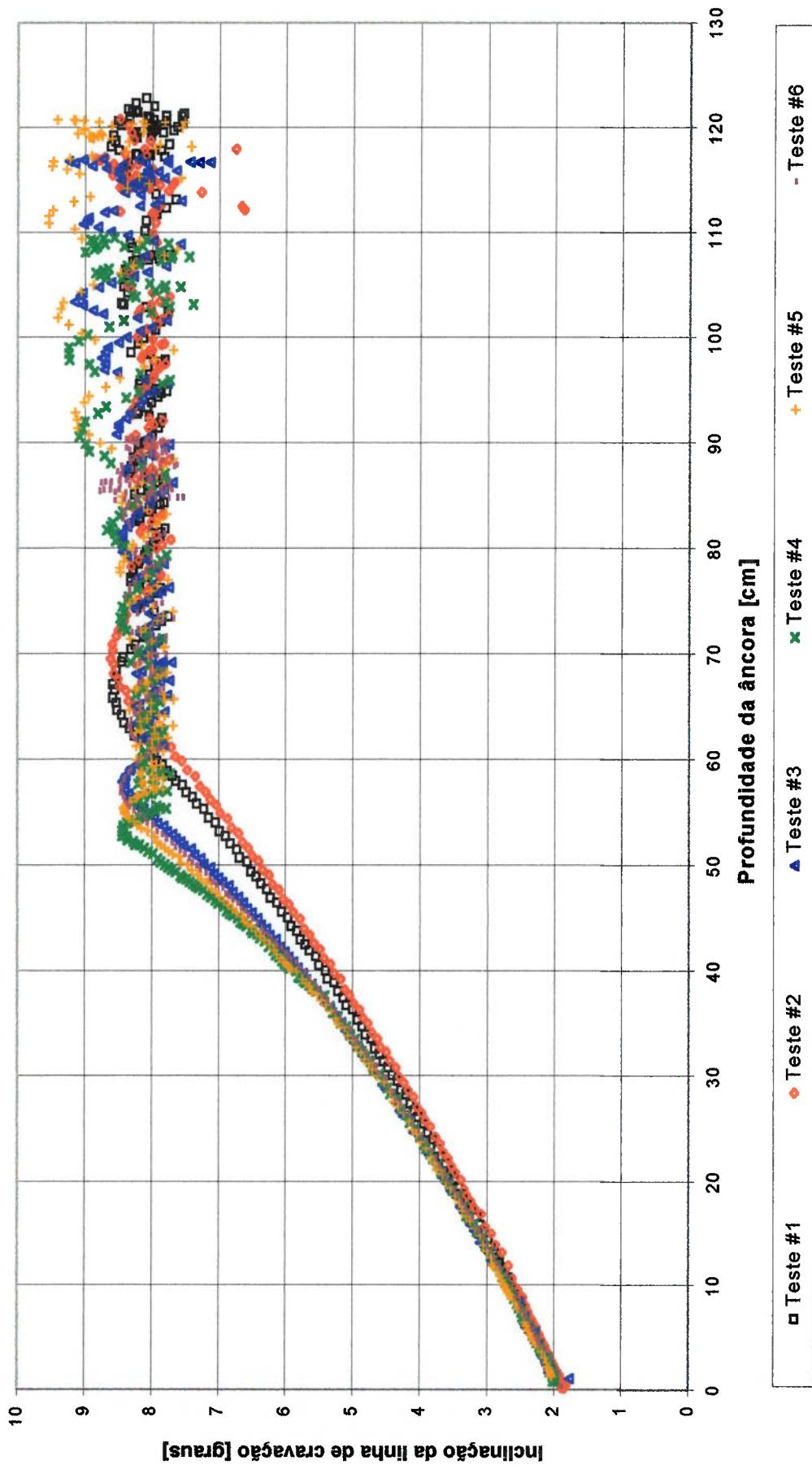


FIGURA 3.32 - Modelo experimental da âncora STEVMANTA escala 1:20: Ângulo de inclinação da linha de cravação x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.

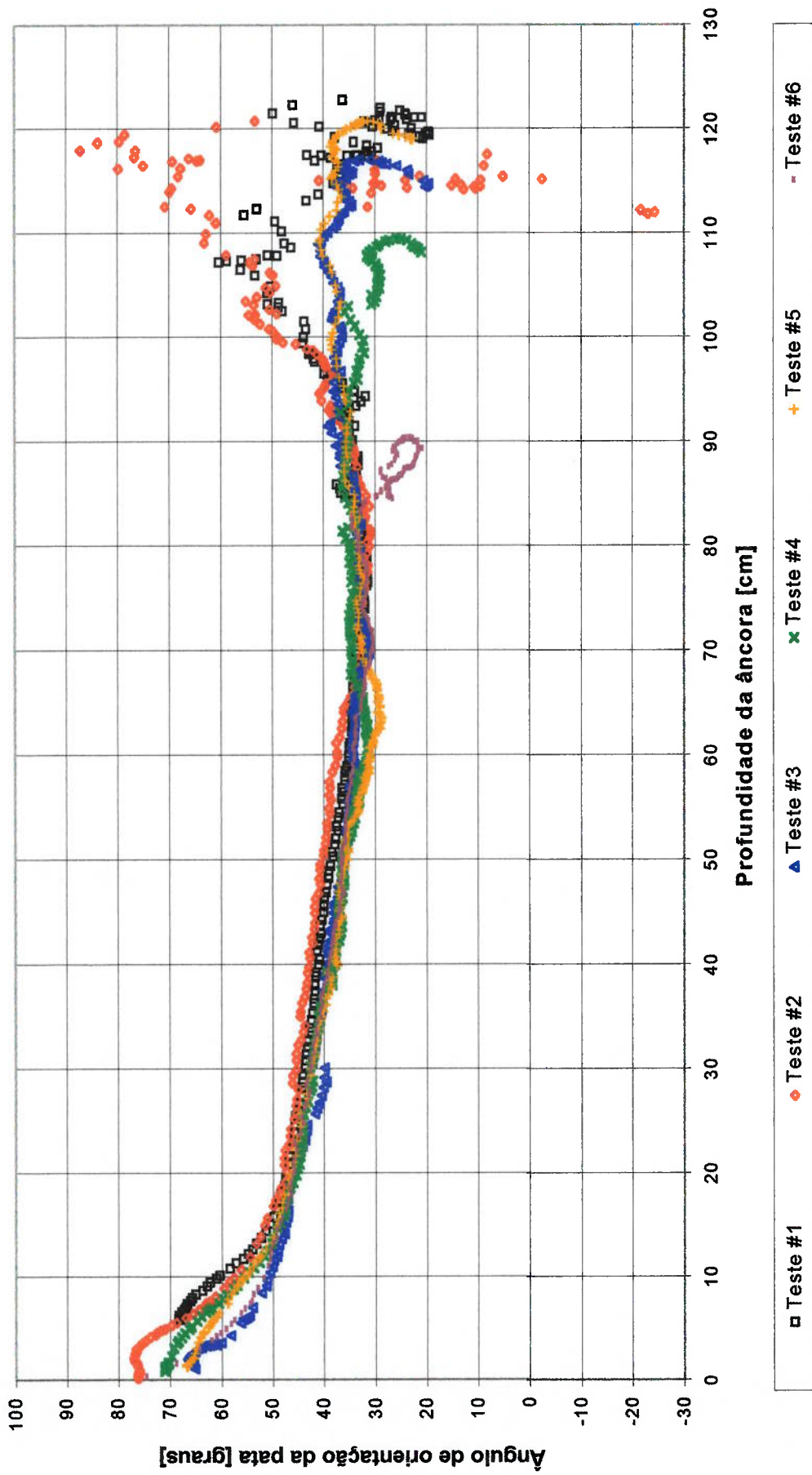


FIGURA 3.33 - Modelo experimental da âncora STEVMANTA escala 1:20: Ângulo de orientação da pata x profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.

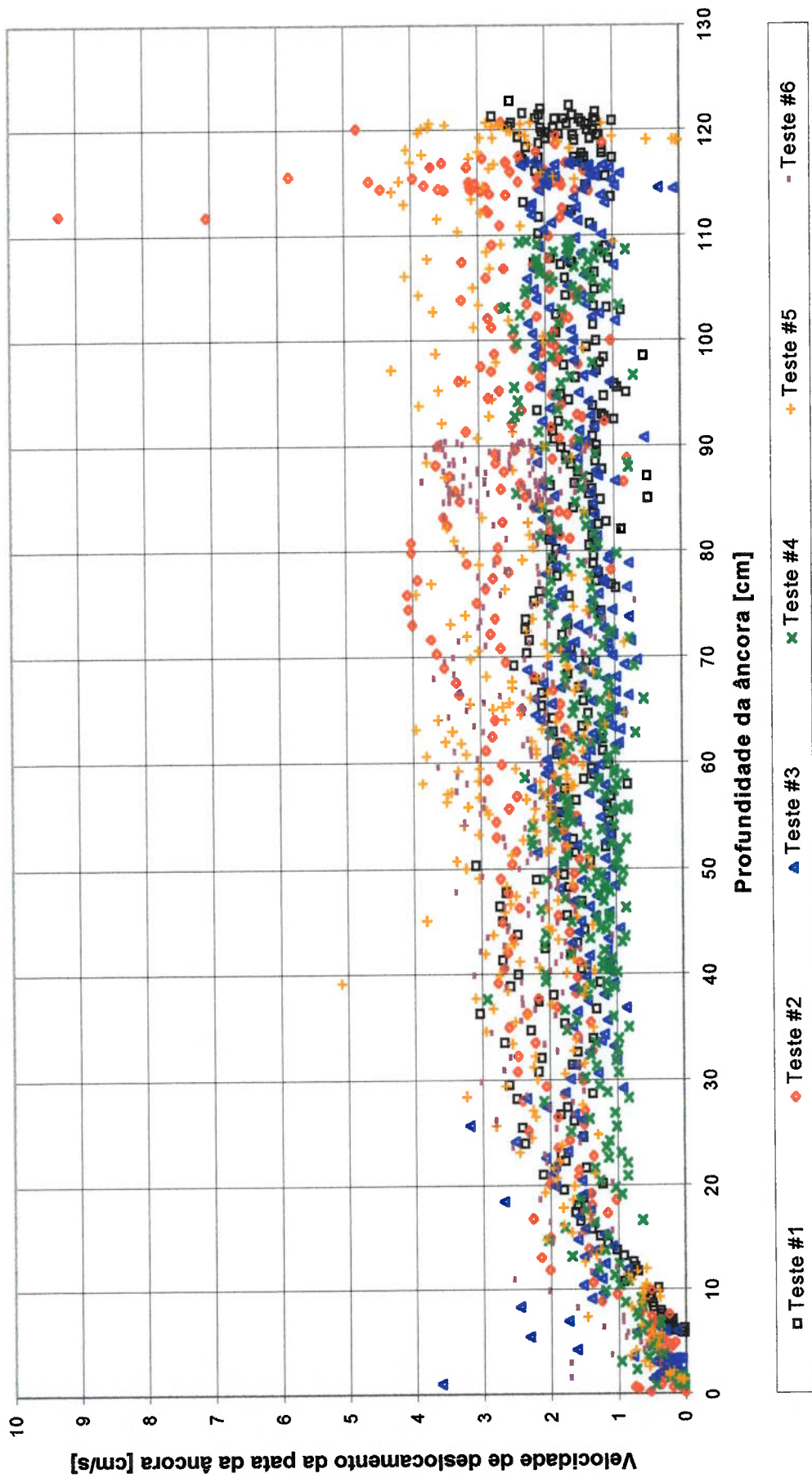


FIGURA 3.34 - Modelo experimental da âncora STEVMANTA escala 1:20: Velocidade de deslocamento da pata x Profundidade do centro de gravidade da âncora, correspondente a série de experimentos E3.

## 4 TESTES EM MAR

Em dezembro de 1997, foram realizados em mar pela PETROBRAS testes<sup>[1]</sup> com duas VLAs em escala real, nas locações da plataforma P27, situada no campo petrolífero de Voador, e P36, situada no campo de petrolífero de Roncador. Foi realizado um total de 21 testes, seis com a âncora **DENLA MK3** de 10m<sup>2</sup> de área projetada, e quinze com a âncora **STEVANTA** de 11m<sup>2</sup> de área projetada.

O solo encontrado em Voador tem seu perfil de resistência ao cisalhamento dado pela relação:  $SU(z)=5+2z$ , enquanto o solo de Roncador, mais "macio", tem seu perfil dado pela relação:  $Su(z)=3.58+1.63z$ . A configuração da linha de cravação é apresentada na TABELA 4.1.

Ambas as âncoras ensaiadas foram instrumentadas com um equipamento rastreador de trajetória - FIGURA 4.1 - de propriedade da BRUCE ANCHORS<sup>[11]</sup>, de modo que, ao final de cada teste, após a âncora ser içada ao convés do rebocador, os dados colhidos e armazenados em mídia magnética são recuperados para processamento em computador. No equipamento estão instalados diversos inclinômetros para registro de ângulos de inclinação e um sensor para registro das revoluções de um hélice nele instalado. Através da manipulação destes valores ao longo do tempo determina-se a trajetória da âncora.



(a) Instrumento rastreador instalado na âncora **DENLA MK3**;



(b) Instrumento rastreador instalado na âncora **STEV MANTA**;

FIGURA 4.1 - Âncoras instrumentadas com o equipamento rastreador de trajetória. <sup>[12]</sup>

A configuração da linha de cravação adotada para todos os testes foi basicamente a mesma, a exceção do primeiro trecho de cabo preso ao rebocador, ajustado conforme a profundidade da lâmina d'água, de modo a se evitar que o ângulo que a linha de cravação forma com a superfície do solo seja superior a 8 graus (conforme já anteriormente citado no capítulo 1).

TABELA 4.1 - Configuração da linha de cravação para os testes realizados em mar pela PETROBRAS com as âncoras **DENLA MK3** e **STEVMANA**.

| Trecho | Tipo do trecho | Comprimento [m] | Diâmetro nominal |
|--------|----------------|-----------------|------------------|
| #1     | Cabo de aço    | 220             | 3 3/4"           |
| #2     | Amarra         | 490             | 84 mm            |
| #3     | Cabo de aço    | *               | 3 3/8"           |

*\*Ajustável conforme a lâmina d'água*

Os resultados são apresentados na forma de dois gráficos – FIGURAS 4.2 e 4.3 -, sendo cada gráfico contendo os resultados dos testes para cada um dos modelos de âncora instrumentados. Cada curva representa a trajetória descrita pelo centro de gravidade da âncora, do início ao término da cravação. A TABELA 4.2 mostra, para cada um dos 21 testes realizados, a âncora utilizada, o ângulo de ataque adotado para cada âncora, o local e sua data de realização.

TABELA 4.2 – Denominação dos testes em mar realizados pela PETROBRAS com data, local, ângulo de ataque e modelo da âncora. <sup>[1]</sup>

| Denominação do teste | Âncora     | Ângulo de ataque [graus] | Local          | Data     |
|----------------------|------------|--------------------------|----------------|----------|
| 1D                   | DENLA MK3  | 38                       | Voador – P27   | 24/12/97 |
| 2D                   | DENLA MK3  | 44                       | Voador – P27   | 24/12/97 |
| 3D                   | DENLA MK3  | 50                       | Roncador – P36 | 27/12/97 |
| 4D                   | DENLA MK3  | 50                       | Roncador – P36 | 28/12/97 |
| 5D                   | DENLA MK3  | 50                       | Roncador – P36 | 28/12/97 |
| 6D*                  | DENLA MK3  | 50                       | Voador – P27   | 29/12/97 |
| 4M                   | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 21/12/97 |
| 5M                   | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 21/12/97 |
| 6M                   | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 22/12/97 |
| 7M                   | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 22/12/97 |
| 8M                   | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 22/12/97 |
| 9M                   | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 23/12/97 |
| 10M                  | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 23/12/97 |
| 11M                  | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 24/12/97 |
| 12M                  | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 25/12/97 |
| 13M                  | STEV MANTA | 44                       | Voador – P27   | 25/12/97 |
| 14M                  | STEV MANTA | 44                       | Roncador – P36 | 26/12/97 |
| 15M                  | STEV MANTA | 44                       | Roncador – P36 | 27/12/97 |

\* Este teste foi realizado com fore-runner de amarras.

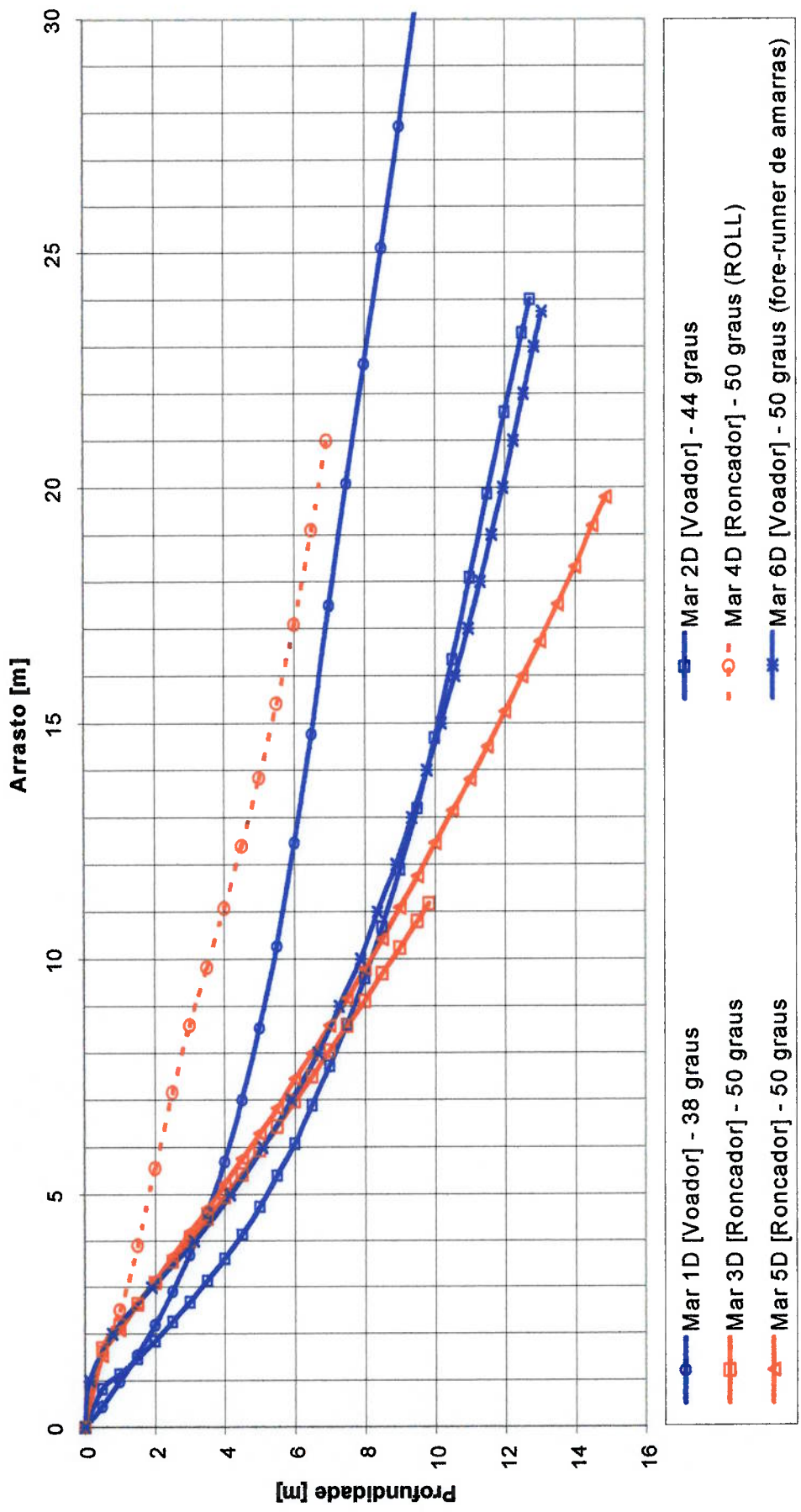


FIGURA 4.2 - Âncora DENLA MK3 de 10m<sup>2</sup>: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da pata da âncora, correspondente aos testes realizados em mar pela PETROBRAS. [1]



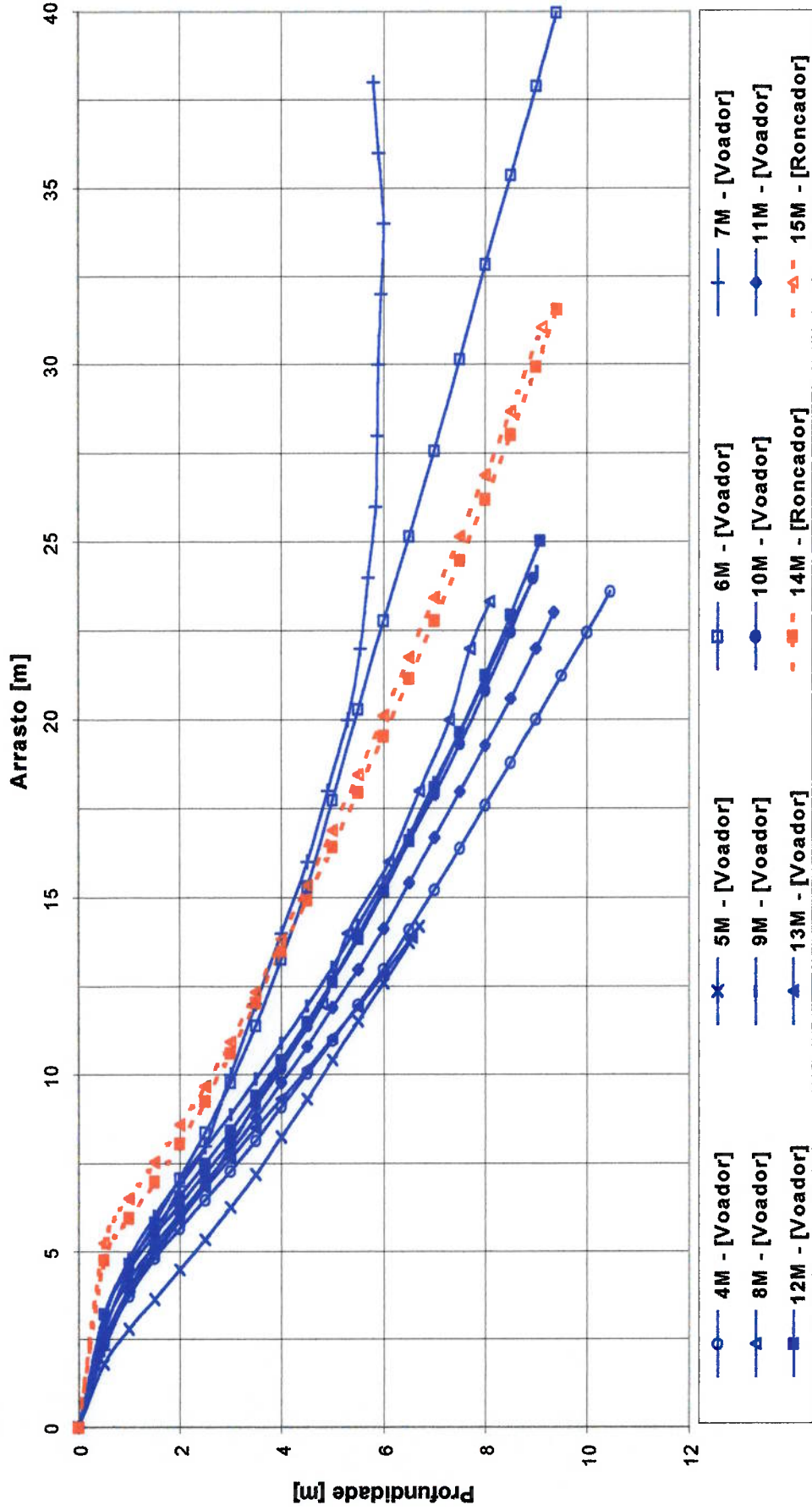


FIGURA 4.3 - Âncora STEVMANTA de 10m<sup>2</sup>: Profundidade x arrasto do centro de gravidade da pata da âncora, correspondente aos testes realizados em mar pela PETROBRAS. [1]

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Confronto com os Resultados em Mar

Os resultados dos testes em mar<sup>[1]</sup>, realizados com as âncoras **DENLA MK3** e **STEV MANTA** e apresentados no capítulo anterior, serão aqui confrontados com os resultados dos experimentos em tanque de prova e simulações em computador, à luz do que se observa na prática.

O confronto das informações, no que tange ao confronto dos resultados, se dará quanto à comparação das trajetórias apresentadas pelos centros de gravidade das âncoras. Quanto aos demais parâmetros estudados nesta dissertação (capítulos 2 e 3), fica impossibilitado seu confronto direto com a realidade, dada a ausência destas informações nos testes realizados em mar.

#### 5.1.1 *Simulações x Resultados em Mar*

As trajetórias numérico-computacionais a serem aqui analisadas se referem às cravações especificadas no item 2.3.5, as quais retratam as mesmas condições dos testes realizados em mar, inclusive no que concerne a escala das âncoras, mantidas as mesmas para ambas as âncoras.

As análises que se seguem, para efeitos de interpretação dos resultados numérico-computacionais à luz do que se observa na prática, são passíveis de um enfoque qualitativo e quantitativo.

Quantitativamente, ao serem sobrepostas, sem critério prévio, as trajetórias dos modelos computacionais com as trajetórias apresentadas nos testes em mar - FIGURAS 5.1 e 5.2 - pode-se crer que não existe consonância

entre resultados para a fase inicial de penetração (numa profundidade inferior a 6 metros).

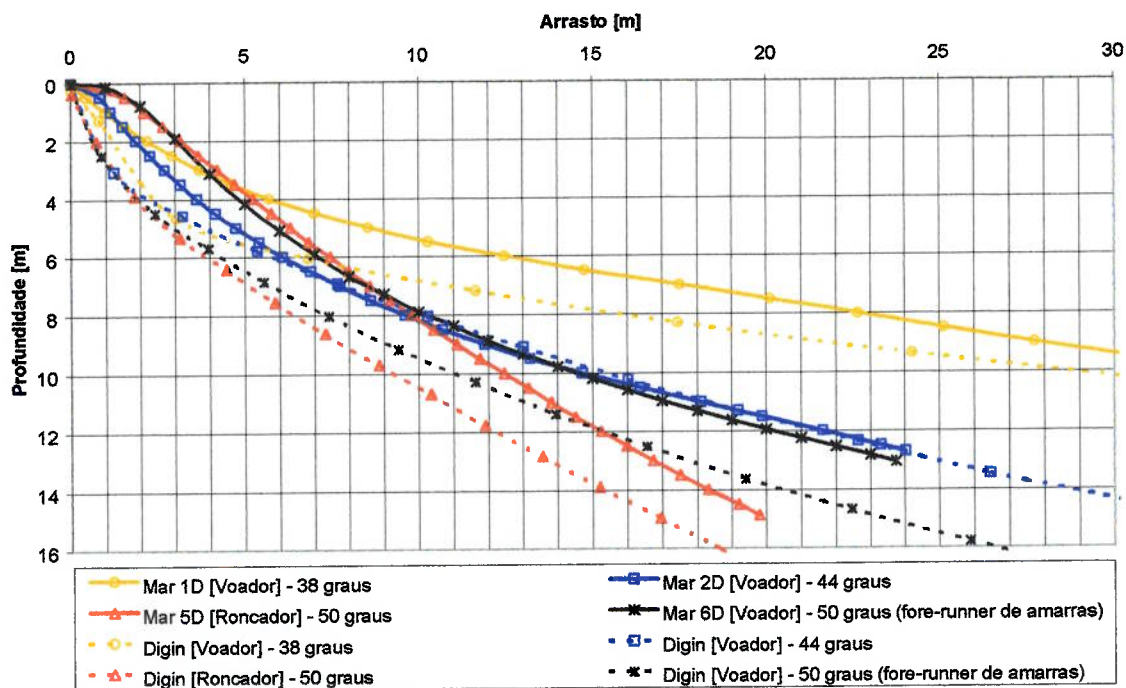


FIGURA 5.1 - DENLA MK3: Resultados numéricos x Resultados no MAR<sup>[1]</sup>.

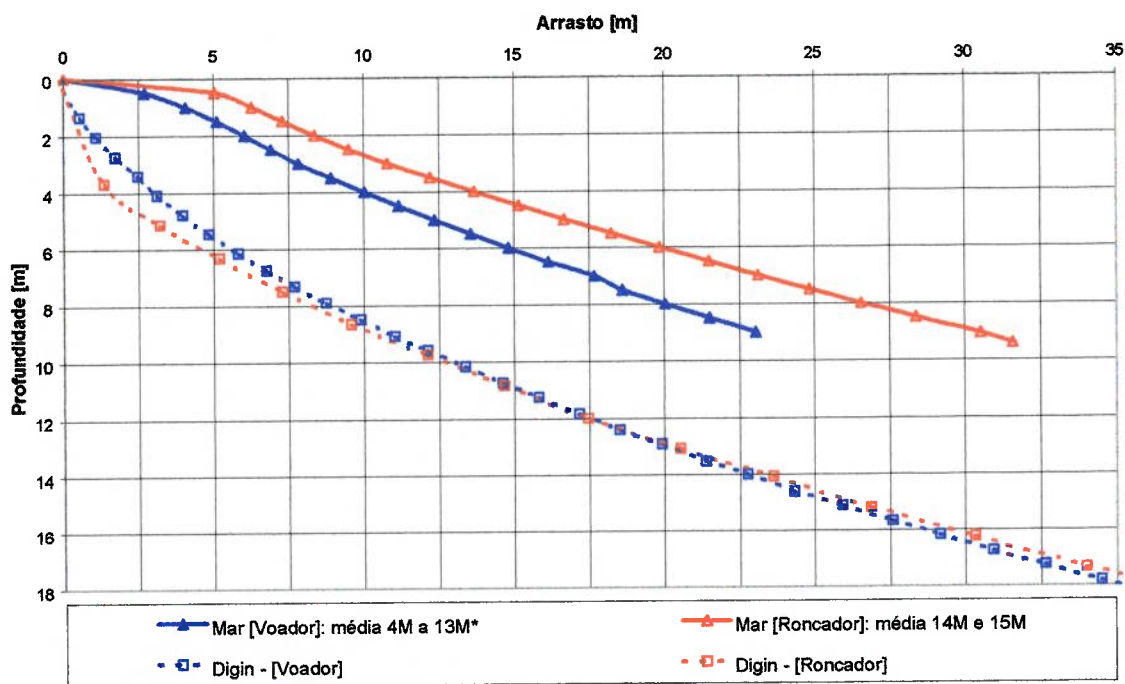
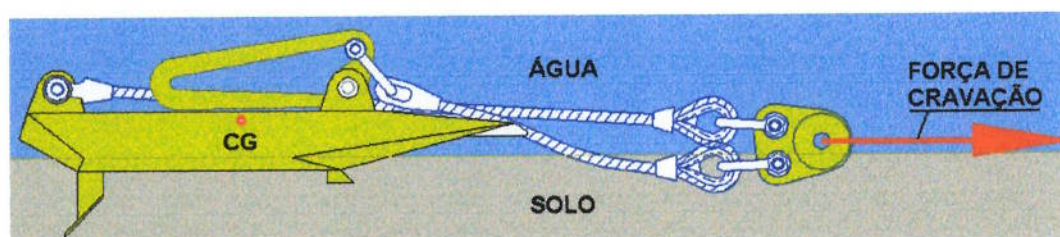
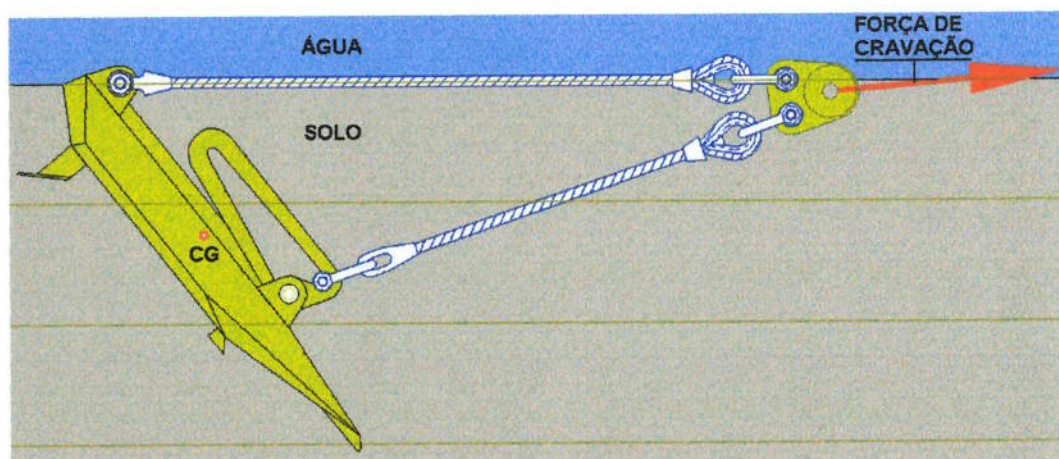


FIGURA 5.2 - STEVMANTA: Resultados numéricos x Resultados no MAR<sup>[1]</sup>.

Contudo, tal discrepância pode, em parte, ser explicada através da interpretação do que de fato ocorre no mar - FIGURA 5.3 (a) - e o que de fato é simulado pelo programa **DIGIN** - FIGURA 5.3 (b), para a fase inicial de penetração. Para o programa, a primeira interação, ou estado inicial, é realizada para a profundidade zero da conexão com a âncora, estando a pata já inclinada e dentro do solo, conforme ilustrado na FIGURA 5.3 (b).



(a) Situação inicial real no mar



(b) Situação inicial nas simulações e experimentos

FIGURA 5.3 - Estados de posicionamento inicial da âncora.

No mar, o estado inicial fica definido pela iminência do primeiro movimento da pata da âncora, quando os sensores começam a registrar a trajetória, estando a pata ainda na posição horizontal sobre a superfície do leito marinho (as especificações completas do procedimento de instalação de uma VLA podem ser encontradas no item 1.5 desta dissertação), conforme ilustrado na FIGURA 5.3 (a). Assim, toda a parte inicial da trajetória, que de fato

acontece no mar entre os dois estados: horizontal fora do solo, até o inclinado dentro do solo, conhecida como fase inicial de giro, não pode ser apropriadamente simulada pelo programa.

Por outro lado, se a análise quantitativa das trajetórias for feita a partir de uma determinada profundidade de referência, de tal forma que se elimine a diferença de estados iniciais acima citados, estaremos comparando trajetórias potencialmente similares.

Nesse contexto, impondo que a profundidade mínima de equivalência dos estados em questão é de 6 metros, vemos que os resultados obtidos para a âncora **DENLA MK3** (testes 1D, 2D e 5D), passam a ter consonância de trajetórias, conforme mostra a FIGURA 5.4. Na figura, todos os arrastos são medidos a partir do ponto de corte a seis metros de profundidade, com arrasto relativo inicial nulo.

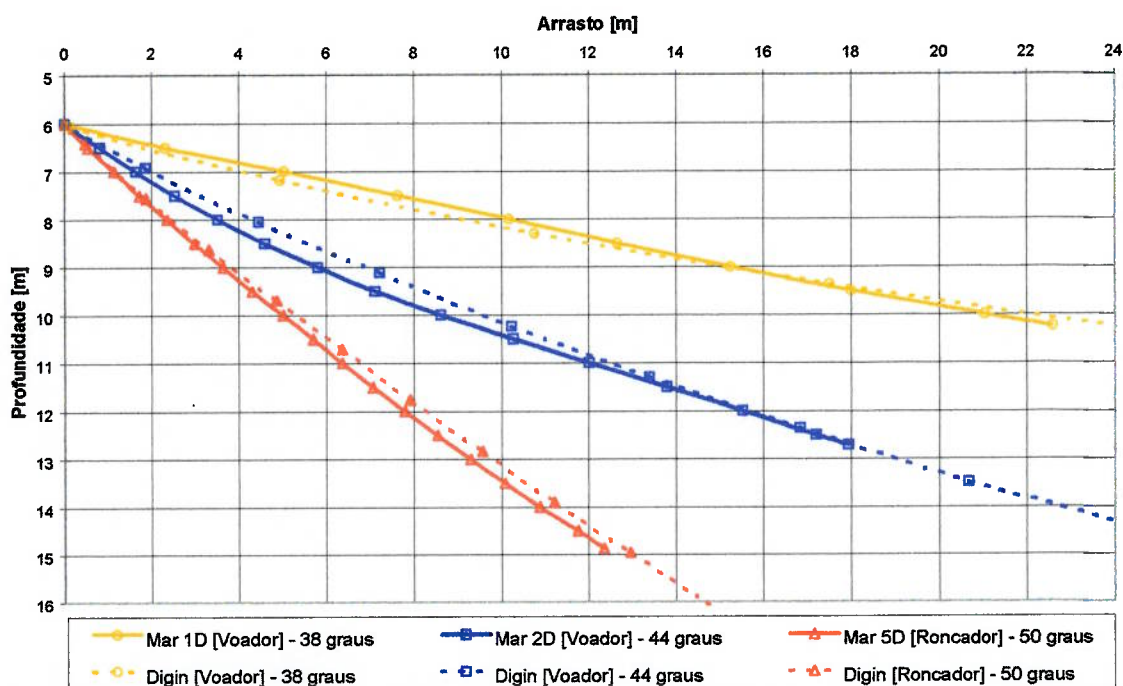


FIGURA 5.4 - DENLA MK3: Resultados numéricos x Resultados no MAR<sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1.

De maneira análoga, o mesmo pode ser feito para os resultados das simulações com âncora **STEVANTA**, conforme mostra a FIGURA 5.5. Aqui, mesmo após o ajuste de referência, o programa apresentou resultados nem sempre tão aceitáveis quanto os da FIGURA 5.4.

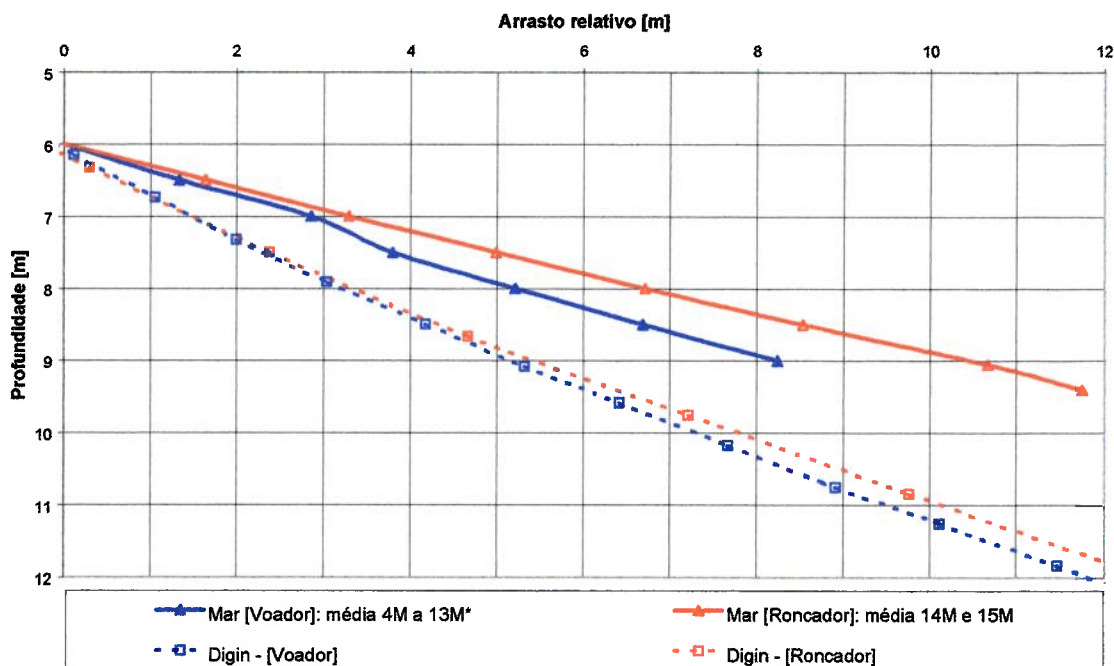


FIGURA 5.5 - **STEVANTA**: Resultados numéricos x Resultados no MAR<sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1.

Qualitativamente, ao se observar os resultados dos testes em mar realizados com a âncora **DENLA MK3** - FIGURA 5.1 - nota-se que, para um mesmo arrasto, o teste 6D - realizado com fore-runner de amarras – apresenta uma profundidade menor do que o teste 5D - realizado com fore-runner de cabo de aço.

Da mesma forma, ao se observar os resultados das simulações computacionais (mesma figura), nota-se que, para um mesmo arrasto, a profundidade atingida pela âncora para fore-runner de amarras é inferior à profundidade atingida pelo caso onde o fore-runner é composto por cabo de

aço. Ou seja, qualitativamente, teoria e prática revelam a mesma tendência: quanto maior é a resistência imposta à linha de cravação ao “corte” do solo, tanto menor é a profundidade atingida pela âncora.

Ainda com relação aos testes e simulações desenvolvidas com a âncora **DENLA MK3**, podemos dizer que, para a variação de seu ângulo de ataque (definição no item 1.4.1), a teoria e a prática revelem novamente a mesma tendência. Analisando-se trajetórias absolutas desta âncora - FIGURA 5.1 -, pode-se notar que, para um mesmo arrasto, quanto maior for o ângulo de ataque, tanto maior será a profundidade atingida pela âncora, tanto para as trajetórias numérico-computacionais, como para as trajetórias reais. Esta tendência pode ser mais claramente observada ao analisamos o arrasto relativo desta âncora a partir da profundidade de 6 metros - FIGURA 5.4.

Para os testes em mar realizados com a âncora **STEV MANTA**, nada se pode dizer com relação à influência do ângulo de ataque, ou com relação à variação da linha de cravação (no que tange à mudança do fore-runner), uma vez que estes parâmetros não sofreram alterações em qualquer um dos testes realizados.

Já com relação à mudança de locação nos testes em mar, podemos notar que, em particular para a âncora **STEV MANTA** - FIGURA 5.2 -, o arrasto inicial apresentado para a fase de giro foi maior em Roncador (P36), onde o solo é mais macio (menores resistências ao cisalhamento), do que em Voador (P27).

Para a âncora **DENLA MK3**, este efeito não fica tão evidente por se tratar de uma âncora de haste rígida. Este tipo de âncora apresenta uma fase

muito rápida de giro inicial, pois uma vez tencionada, a âncora quase que imediatamente fica orientada conforme a posição definida na FIGURA 5.3 (b).

Já as âncoras de cabresto, no instante que recebem os primeiros esforços provindos da linha de cravação, somente têm tencionado seus cabrestos de ré, enquanto que seus cabrestos de vante se mantêm frouxos. Este cenário assim permanece, enquanto a âncora vai gradualmente sendo arrastada e ganhando profundidade solo adentro, até que seus cabrestos de vante sejam tracionados, pondo fim à fase inicial de giro da âncora. Neste instante, a âncora se encontra na posição definida na FIGURA 5.3 (b).

Assim, conforme nos mostram as trajetórias dos testes em mar, através das FIGURAS 5.1 e 5.2, quanto menor for a resistência ao cisalhamento superficial do solo, tanto maior será o arrasto nesta fase inicial de giro, principalmente para as VLAs de haste flexível, caso da **STEV MANTA**. Este fato naturalmente não pode ser constatado nas simulações em computador e nos experimentos em tanque de prova, devido à questão do posicionamento inicial da âncora, não ocorrendo nestes casos a fase de giro inicial.

### **5.1.2 Ensaios Experimentais x Resultados em Mar**

São confrontadas, para a âncora **STEV MANTA**, as trajetórias obtidas nos experimentos com as trajetórias apresentadas em mar nos testes em escala real. Como os experimentos em tanque de prova foram realizados com um modelo em escala 1:20, os valores de arrasto e profundidade obtidos nestes testes foram extrapolados para a escala real através de sua multiplicação pelo fator de correção de escala (que é de 20 vezes), de modo a



se compatibilizar as dimensões em escala 1:20 dos ensaios em tanque de prova com as dimensões em escala 1:1 dos testes em mar.

Neste ponto, é importante ressaltar que o fator de correção de escala foi aplicado sem um estudo prévio da influência da escala no processo de cravação. A análise que se segue, portanto, será feita apenas a título de uma primeira abordagem do assunto, sem intenção de provar que a extrapolação de resultados dos testes em laboratório para a escala real pode ser feita simplesmente multiplicando-se os resultados por 20, no que concerne a extrapolação das trajetórias.

Neste âmbito, caso a intenção fosse a de realmente levantar os fatores que influenciam na extrapolação de resultados de uma escala para outra, torna-se necessário um conhecimento mais aprofundado das propriedades do solo presente no laboratório, bem como a realização de testes em diferentes escalas. Vale ainda ressaltar que o cálculo dos adimensionais pertinentes passa, antes de tudo, em se levantar os parâmetros do solo e da âncora que efetivamente influenciam na extrapolação das trajetórias.

De qualquer forma, dada a ausência conhecimento com relação aos fatores que influenciam na extrapolação das trajetórias de cravação de âncoras, será adotado, neste trabalho, a título de uma primeira abordagem comparativa dos resultados, apenas o fator de correção de escala, cujo valor é de 20 vezes, tendo-se sempre em mente as considerações acima colocadas.

Assim, para a âncora **STEV MANTA**, as trajetórias experimentais descritas pelo centro de gravidade da pata do modelo em escala 1:20 serão então confrontadas com as trajetórias descritas pelo centro de gravidade do modelo em escala real ensaiado no mar.

Novamente, ao serem sobrepostas, sem critério prévio, as trajetórias descritas pelo modelo experimental com as trajetórias apresentadas nos testes em mar - FIGURA 5.6 - pode-se crer que não existe consonância entre os resultados para a fase inicial de penetração (numa profundidade inferior a 6 metros).

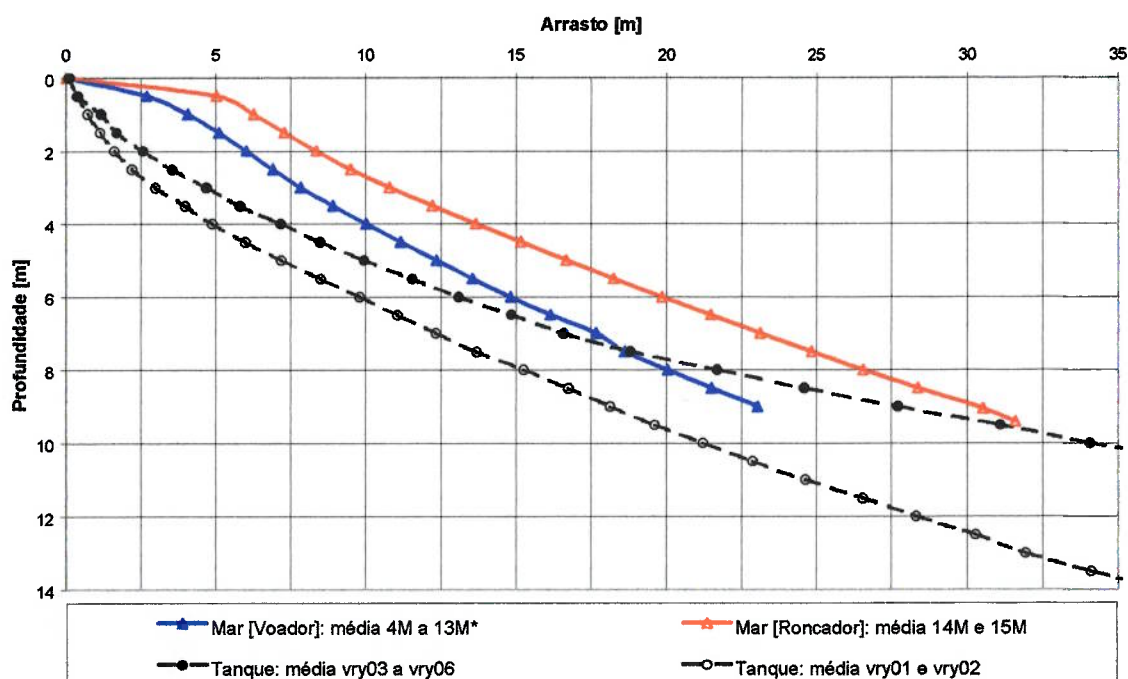


FIGURA 5.6 - **STEV MANTA**: Resultados experimentais x Resultados no MAR<sup>[1]</sup>  
- valores absolutos em escala 1:1.

Contudo, a discrepância quanto à fase inicial de penetração (de 0 a 6 metros na FIGURA 5.6), pode ser explicada, de maneira análoga ao anteriormente registrado no confronto das simulações numérico-computacionais com os testes em mar, através da interpretação do que de fato ocorre no mar - já ilustrado na FIGURA 5.3 (a) - e o que de fato ocorreu na época da realização dos experimentos em laboratório.

No período de realização dos ensaios experimentais - fevereiro de 1999 -, o modelo em escala 1:20 era posicionado no tanque de prova, com a pata já

completamente dentro da lama e inclinada, formando um ângulo com relação à superfície do solo, conforme já ilustrado na FIGURA 5.3 (b). Além disto, na época em questão, a camada de solo superficial apresentava resistências ao cisalhamento muito baixas (item 3.5.2 desta dissertação). Em adição a isto, o sistema de localização planar do modelo de âncora (item 3.4.2 e 3.5.1 desta dissertação), conectado à pata da âncora através de cabos, transmitia a estes esforços (inferiores a 0,5 kgf), que, apesar de insignificantes quando comparados com a magnitude dos esforços atingidos ao término da cravação, eram relevantes quanto ao posicionamento da âncora no que tange à definição de sua posição inicial de penetração, atuando de maneira a aumentar o ângulo de inclinação que a pata da mesma já formava com o solo.

Assim, o método de posicionamento do modelo de âncora (executados conforme os procedimentos de ensaios definidos em conjunto com o CENOSUSP e PETROBRAS na época em questão<sup>[17]</sup>), aliado à baixa resistência mecânica do solo em sua camada superficial, em conjunto com os esforços transmitidos pelo sistema de localização planar à pata do modelo de âncora em escala 1:20 (vide capítulo 3 - FIGURA 3.16), faziam com que o estado inicial de cravação estivesse definido conforme ilustrado na FIGURA 5.3 (b).

No mar, conforme já visto, o estado inicial fica definido pela iminência do primeiro movimento da pata da âncora, estando a pata ainda na posição horizontal sobre a superfície do leito marinho - FIGURA 5.3 (a). Assim, toda a parte inicial da trajetória, que de fato acontece no mar entre os dois estados: horizontal fora do solo, até o inclinado dentro do solo (fase inicial de giro), não ocorreu nos testes desenvolvidos em laboratório, devido às razões citadas.

Porém, desconsiderando-se a fase inicial de giro, conforme realizado na análise das trajetórias numérico-computacionais, e impondo que a profundidade mínima de equivalência de estados é de 6 metros, vemos que os resultados obtidos para a âncora **STEV MANTA** passam a ter uma melhor consonância de trajetórias, conforme mostra a FIGURA 5.7. Nesta figura, todos os arrastos são medidos a partir da profundidade de corte, a seis metros da superfície (30 cm da superfície na escala 1:20), com arrasto relativo inicial nulo.

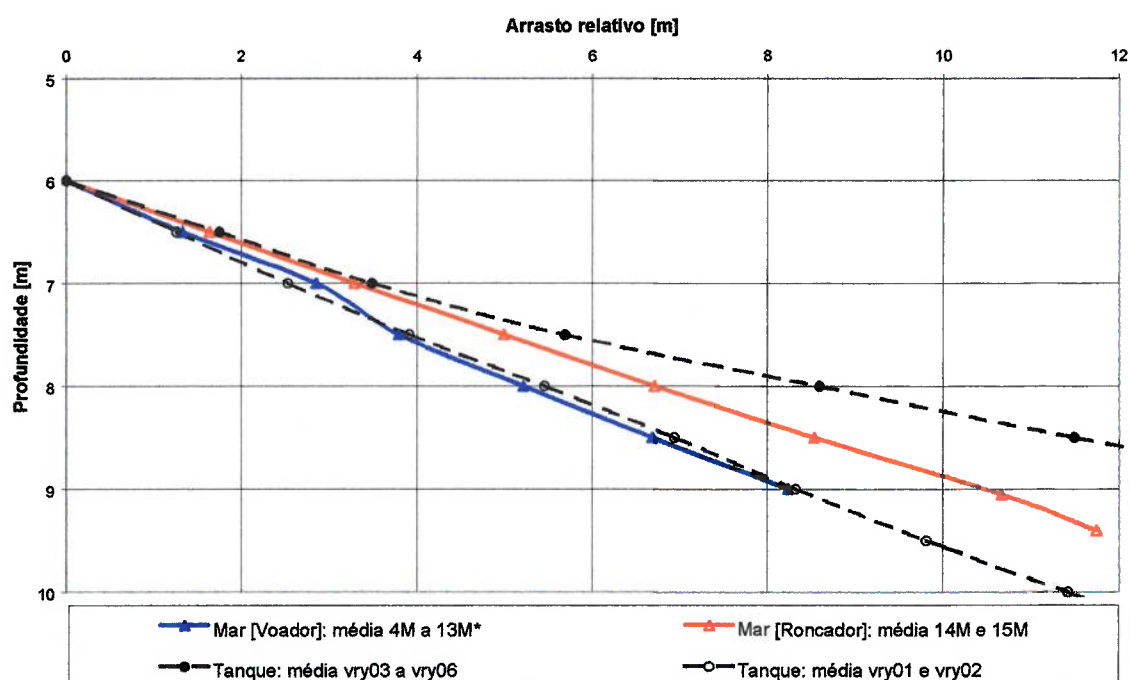


FIGURA 5.7 - **STEV MANTA**: Resultados experimentais x Resultados no MAR<sup>[1]</sup>  
- valores relativos em escala 1:1.

### 5.1.3 Ensaios Experimentais x Simulações x Resultados em Mar

De modo a consolidar o confronto dos resultados, são apresentados nas FIGURAS 5.8 e 5.9, para a âncora **STEV MANTA**, a sobreposição das trajetórias apresentadas nos ensaios em tanque de prova (extrapolados para a escala 1:1), nas simulações numérico-computacionais e nos testes em mar.

Nelas podemos observar, ao analisarmos as trajetórias potencialmente similares da FIGURA 5.9, que os ensaios experimentais desenvolvidos com a âncora **STEV MANTA** foram os que apresentaram trajetórias mais próximas das trajetórias descritas em mar com âncoras em escala real.

Novamente, é importante ressaltar que a extrapolação dos ensaios experimentais realizados em escala 1:20 para a escala 1:1 foi feita aplicando-se um fator de correção de escala de 20 vezes. A metodologia correta seria, a partir do conhecimento dos adimensionais pertinentes, realizar-se então a extrapolação dos resultados. Porém, dada a ausência de pesquisas que evidenciem os parâmetros relevantes na extrapolação de trajetórias de cravações de âncoras em diferentes escalas (necessários para o levantamento dos adimensionais), a extrapolação será feita, a título de uma primeira abordagem do assunto, unicamente a partir do fator de correção de escala, sem intenção de provar que a extrapolação de resultados dos testes em laboratório para a escala real pode ser feita simplesmente multiplicando-se os resultados por 20, no que concerne a extrapolação das trajetórias, conforme já dito anteriormente.

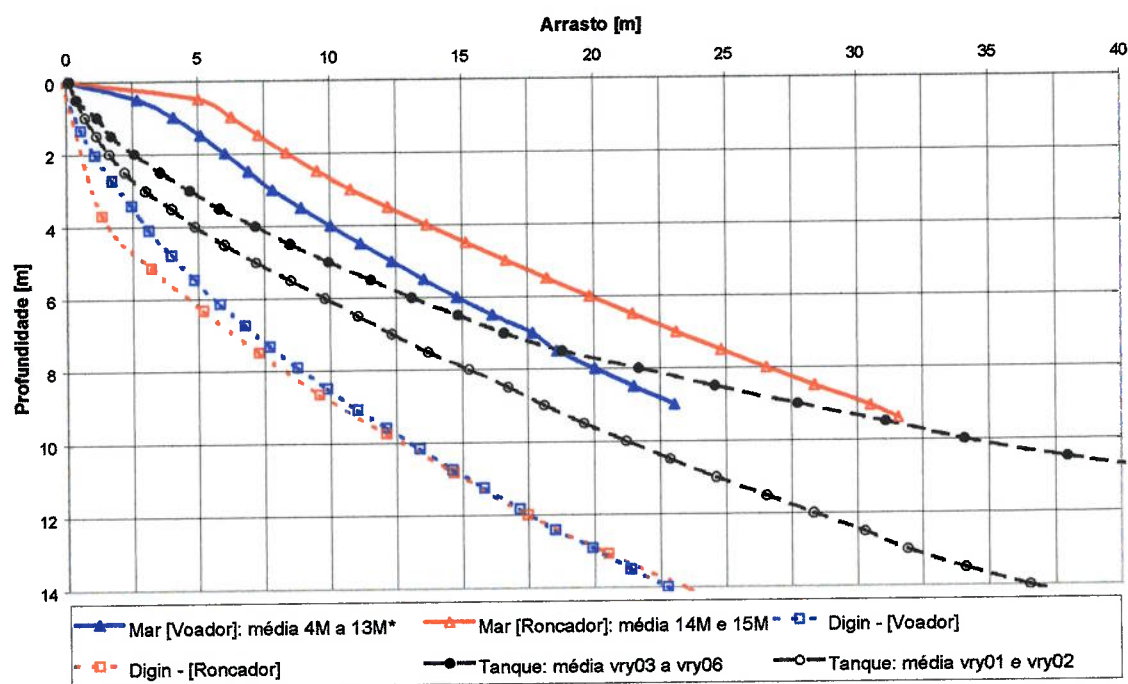


FIGURA 5.8 - STEVMANTA: Tanque de prova x Simulações no Digin x Mar<sup>[1]</sup> - valores absolutos em escala 1:1.

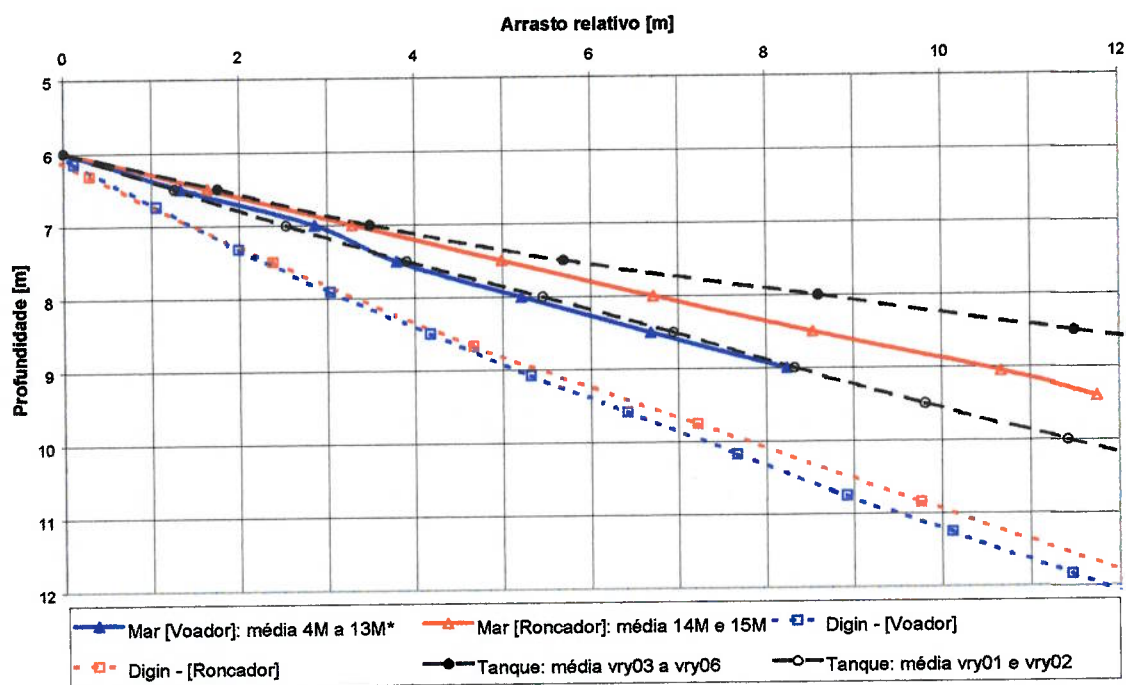


FIGURA 5.9 - STEVMANTA: Tanque de prova x Simulações no Digin x Mar<sup>[1]</sup> - valores relativos em escala 1:1.

## **5.2 Influência dos Parâmetros Estudados na Cravação**

Será realizada, neste item, a análise dos resultados obtidos nas simulações numérico-computacionais e nos experimentos em tanque de prova, com relação ao modelo de âncora **CENO-ROF** estudado. Para efeitos de interpretação do cálculo numérico em computador, e dos experimentos em tanque de prova, as análises que se seguem são passíveis somente de um enfoque qualitativo, dado que ainda não existem resultados de testes realizados em mar, com este modelo de âncora, passíveis de comparação com os resultados deste trabalho.

### **5.2.1 Influência do Ângulo de Ataque**

A primeira série de simulações revelou a influência e importância do ângulo de ataque de uma VLA em seu processo de cravação, apresentando comportamentos distintos para cada ângulo simulado, conforme as evidências já constatadas em mar nos testes com a âncora **DENLA MK3**. Foi verificada a ocorrência do fenômeno de horizontalização da trajetória, fenômeno este no qual a âncora passa a descrever, a partir de uma determinada profundidade, função da configuração de ângulo de ataque adotada, uma trajetória horizontal, onde a profundidade é mantida constante. Foi verificado também que configurações com maiores ângulos de ataque aumentam os esforços presentes na linha de cravação.

Já a primeira série de experimentos, não foi capaz de evidenciar a influência do ângulo de ataque na cravação, uma vez que foram ensaiadas três diferentes configurações de cabresto, apresentando todas elas trajetórias e esforços similares, quando não contra o bom senso, como nos resultados

apresentados na FIGURA 3.20, onde a configuração de âncora com o maior ângulo de ataque foi a que apresentou os esforços mais baixos dentre todas as configurações ensaiadas.

Assim, devido às considerações já realizadas no capítulo 3 no que tange à compreensão dos resultados experimentais, as análises e conclusões aqui inferidas, com relação à influência do ângulo de ataque na cravação, estão fundamentadas nos resultados da primeira série de simulações numéricas com a âncora **CENO-ROF** em conjunto com os resultados apresentados em mar pela âncora **DENLA MK3**. Estas simulações e testes em mar revelaram que, menores ângulos de ataque significam maiores distâncias horizontais percorridas pela âncora (maiores arrastos), para uma mesma profundidade de referência de penetração. Menores ângulos de ataque acarretam também menores esforços na linha de cravação, e conseqüentemente, exigem um menor esforço do rebocador. Por sua vez, maiores ângulos de ataque significam maiores esforços na linha de cravação, e menores distâncias de arrasto a serem percorridas pela âncora, conforme nos mostram as FIGURAS 2.26, 2.27 e 5.4.

Maiores ângulos de ataque também acarretam, para uma mesma profundidade de referência de penetração, maiores inclinações assumidas pela linha de cravação em seu ponto de conexão com a âncora - FIGURA 2.28 - bem como maiores ângulos de orientação da pata da âncora - FIGURA 2.29 -. Para menores ângulos de ataque, o comportamento é o inverso do acima mencionado, conforme mostram as figuras supracitadas.



### **5.2.2 Influência do Apêndice de Ré**

A segunda série de simulações revelou a influência do apêndice de ré na cravação da VLA CENO-ROF. Embora este tipo de apêndice também tenha a função de proporcionar maior estabilidade à cravação destes corpos, o programa DIGIN não consegue avaliar esta influência, uma vez que sempre realiza a cravação em duas dimensões (ou seja, ela sempre se processa no plano vertical-longitudinal, conforme já citado no capítulo 2).

Porém, no que tange às variáveis que o programa se propõe a analisar, a segunda série de simulações revelou que a presença de peças que obstruam a cravação aumenta os esforços na linha de cravação, para uma mesma profundidade de referência - FIGURA 2.34 -. Isto ficou demonstrado para todas as cravações nas quais o apêndice esteve presente.

Novamente, ficou também demonstrado que quanto menor for o arrasto apresentado por uma âncora, tanto maiores serão as inclinações e esforços presentes na linha de cravação - FIGURAS 2.33, 2.34 e 2.35 -. Nas figuras, o apêndice de ré 04 foi o que apresentou os menores arrastos e os maiores esforços de cravação, para uma mesma profundidade analisada.

A segunda série de experimentos conseguiu mostrar, apesar das dificuldades impostas pelo solo à realização dos testes e interpretação de seus resultados, que a presença do apêndice de ré 04 aumenta os esforços necessários à cravação da âncora - FIGURA 3.26, quando comparados com os esforços apresentados pela configuração sem apêndices, resultados estes de comum acordo com os obtidos nas simulações. A configuração com apêndices também apresentou os menores valores de arrasto, para uma mesma profundidade analisada - FIGURA 3.25.

Ainda com relação à segunda série de experimentos, a evolução do ângulo de inclinação da linha de cravação - FIGURA 3.27 - se mostrou praticamente idêntica à anteriormente observada na primeira série de experimentos - FIGURA 3.22 -. Isto porque, conforme já explicado anteriormente no ítem 3.7.1 deste trabalho, a partir de uma certa profundidade o fuso impede a evolução do ângulo de inclinação da linha de cravação, fazendo com que este fique limitado ao valor de oito graus, conforme nos mostram as FIGURAS 3.22 - série E1 - e 3.27 - série E2 -. Ou seja, a partir da profundidade de atuação do fuso, as FIGURAS 3.22 e 3.27 têm pouco a acrescentar no que tange à análise do desempenho do modelo de âncora, uma vez que a evolução dos valores de inclinação da linha de cravação se tornou constante ao longo do ganho de profundidade da âncora, devido à imposição do sistema de controle e posicionamento do fuso.

Com relação à velocidade desempenhada pelo modelo de âncora, as FIGURAS 3.24 - série E1 - e 3.29 - série E2 - mostram resultados similares, se mantendo constante (apesar das oscilações devido a imprecisões do sistema de medição) entre 2 e 3 cm/s. Este valor é controlado pelo programa VLAPOS, similarmente ao que acontece em mar, onde o rebocador impõe uma velocidade de deslocamento constante ao longo de toda a cravação, onde a força empreendida pelo sistema de propulsão da embarcação é tal que proporcione seu deslocamento a velocidade constante.

### **5.2.3 Influência da Linha de Cravação**

A terceira série de simulações analisou a influência da linha de cravação. A série 3.1 mostrou que fore-runners compostos por amarras

aumentam os esforços presentes na linha de cravação, para uma mesma profundidade de penetração da âncora - FIGURA 2.38 -. Fore-runners de amarras também aumentam a relação entre o arrasto e a profundidade, podendo antecipar a profundidade de horizontalização da trajetória - FIGURA 2.37 -. A antecipação do fenômeno de horizontalização significa se antecipar a profundidade na qual o ângulo de orientação da pata da âncora é nulo - FIGURA 2.40 (a) -.

As amarras, por oferecerem uma maior resistência à penetração, também aumentam a inclinação da linha de cravação no ponto de conexão com a âncora - FIGURA 2.39 -. Já o ângulo de inclinação da linha de cravação sobre o leito marinho foi intencionalmente, nesta série de simulações, estimulado a se manter nulo - FIGURA 2.41 -. Estimulado no sentido de que seu valor não pode ser efetivamente restringido ao se especificar as condições de cravação no arquivo de entrada do **DIGIN**. Então, como mantê-lo nulo?

A solução é se aumentar o comprimento da linha de cravação do trecho #2 (vide item 2.2.3 deste trabalho), de modo que o peso próprio da linha se encarregue de manter este ângulo nulo.

Mas qual a necessidade de se mantê-lo nulo nestas simulações?

Caso escolhido um comprimento de linha de cravação muito pequeno, a inclinação da linha de cravação sobre o leito marinho poderia mascarar os resultados, dificultando sua interpretação, uma vez que o que está sendo analisado é justamente o efeito do fore-runner dentro do solo, e não seu efeito em conjunto com os efeitos resultantes do redirecionamento dos esforços provocados pelas modificações geométricas da catenária suspensa ao longo de toda a cravação. Assim, como pode ser observado na FIGURA 2.41, a

inclinação da linha de cravação ao tocar o leito marinho foi nula ao longo de toda a cravação.

Já a série S3.2 de simulações avalia justamente o que não se quis avaliar na série S3.1, ou seja, o efeito da inclinação da linha de cravação sobre o leito marinho. A FIGURA 2.42 mostra que a redução do comprimento da linha de cravação, ou seja, o conseqüente aumento do ângulo de inclinação desta sobre o leito marinho - FIGURA 2.46 - antecipa a profundidade de horizontalização da âncora, sem ter qualquer influência na taxa de crescimento dos esforços - FIGURA 2.43 -. Esta série mostra claramente como a linha de cravação pode alterar a trajetória de uma âncora, bastando para isto observar em conjunto as FIGURAS 2.42, 2.44 e 2.46.

#### **5.2.4 Influência do Solo**

A série de simulações S4 avalia a influência de vários tipos de solo, através da variação de suas propriedades ao longo da profundidade. Nelas, pode-se observar claramente que a taxa de variação da resistência ao cisalhamento do solo tem forte influência na trajetória das âncoras - FIGURAS 2.49 (a), (b) e (c) -.

A análise destas figuras também mostra que a simples alternância da equação que define a resistência ao cisalhamento do solo não necessariamente altera a trajetória da âncora. Para isto basta observarmos que todas as cravações realizadas em solos com perfis lineares de resistência ao cisalhamento (solos diferentes porém com variações lineares) apresentaram as mesmas trajetórias - FIGURA 2.49 (a). O mesmo aconteceu com as trajetórias das cravações realizadas em solo com resistência ao cisalhamento

constante - ilustradas na mesma figura. Ou seja, a trajetória não é dependente da resistência ao cisalhamento em si, mas sim da taxa de variação dessa resistência ao longo da profundidade, pois é essa variação que irá fundamentalmente modificar o centro de pressão da âncora e seus esforços resultantes, atuando de maneira única na composição dos momentos em torno da conexão da âncora com a linha de cravação. Dessa composição, em conjunto com o esforço proveniente da linha de cravação, depende a trajetória da âncora, que se dá pela alternância de estados de equilíbrio e desequilíbrio (vide explicações mais detalhadas no item 2.4.4 desta dissertação).

Com relação aos esforços na linha de cravação, as FIGURA 2.50 (a), (b) e (c) mostram que, estes sim, dependem muito mais do valor da resistência ao cisalhamento do solo na profundidade que se encontra a âncora, do que de sua taxa de variação nesta mesma profundidade. Prova contundente deste raciocínio provém da observação em conjunto das FIGURAS 2.47 e 2.50 (c). A FIGURA 2.47 mostra que todos os perfis de cisalhamento apresentam o mesmo valor (de 55kPa) à profundidade de 25 metros, apesar de evoluírem de forma completamente diferente até este valor. A FIGURA 2.50 (c) mostra que, para a profundidade de 25.5 metros, as cravações realizadas nestes mesmos tipos de solo apresentam o valor praticamente idêntico de 2500 kN para o valor do esforço presente na linha de cravação (inclusive a cravação feita em solo com perfil logarítmico, que horizontalizou sua trajetória aos 21 metros de profundidade, onde  $SU(21m) = 52,5 \text{ kPa}$ ).

Com relação à evolução do ângulo de orientação da pata da âncora - FIGURAS 2.51 (a), (b) e (c), cabem as mesmas considerações tecidas anteriormente para a evolução das trajetórias. Ou seja, o ângulo de orientação

da pata da âncora depende essencialmente da taxa de variação da resistência ao cisalhamento do solo na profundidade em que se encontra a âncora, em conjunto com os esforços provindos da linha de cravação.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados das simulações e experimentos desenvolvidos neste trabalho permitem um conhecimento mais apurado do que de fato ocorre dentro do solo, no que tange à evolução das variáveis apresentadas. Através da análise crítica dos resultados, tornou-se possível explicar e compreender a influência dos parâmetros estudados na cravação das âncoras de carregamento vertical.

No que tange à veracidade dos resultados apresentados, seu confronto com os resultados em mar mostrou que os experimentos e simulações conduzidos neste trabalho permitem representar de maneira adequada, pelo menos qualitativamente, a realidade observada nos testes em campo, no que tange à evolução das trajetórias das âncoras.

Os experimentos realizados no tanque de interação solo-estrutura do CENO-USP mostraram que, feitas as devidas ressalvas com relação ao método de redirecionamento da linha de cravação, e à falta de homogeneidade do solo em face à realidade observada no mar, constituem uma importante ferramenta, não somente no sentido de investigar o fenômeno da cravação, mas também, no sentido de avaliar e desenvolver novas geometrias de âncoras.

Quanto às simulações desenvolvidas, estas se mostraram uma ferramenta rápida e barata no que tange à compreensão do fenômeno da cravação. Através da análise dos parâmetros estudados, pode-se conhecer e compreender a fenomenologia da cravação, estabelecendo um passo importante no processo contínuo do desenvolver do conhecimento científico.

Neste contexto, como principal aspecto conclusivo digno de nota, enfatize-se que, quanto ao aspecto quantitativo, as trajetórias apresentadas pelo programa de computador divergem menos das apresentadas em mar, quando não se leva em conta a fase do giro inicial da âncora. Considerado o modo pelo qual é matematicamente integrado o equilíbrio, ainda não é possível simular em computador a maneira pela qual a âncora passa do estado de repouso horizontal, sobre o solo, para o estado de início de cravação, já estando ela imersa na lama. Nisso reside uma boa possibilidade para investigações futuras, em termos de melhorar o desempenho do modelo computacional.

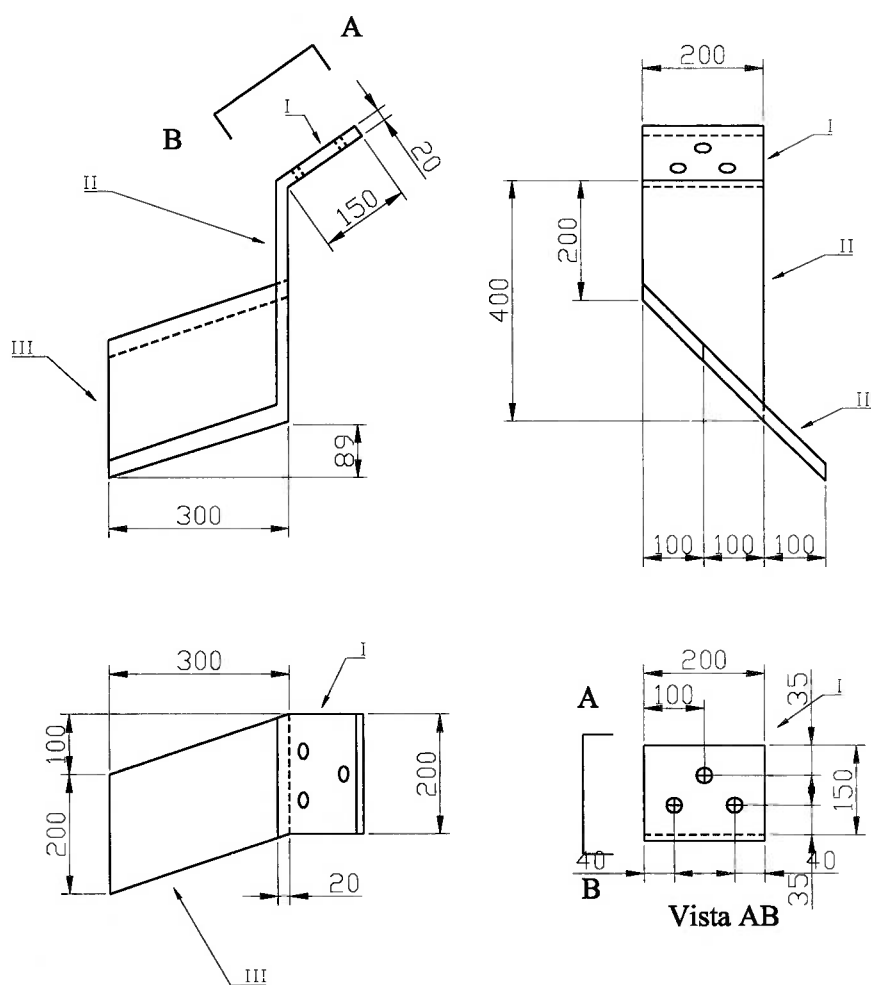


## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRUCE ANCHOR LTD.. *"Report on Bruce Anchor Tracking System hire to PETROBRAS for tracking (i) Bruce Denla & (ii) Vryhof Stevmanta anchors offshore Brazil"*. Bruce Anchor Ltd., Isle of Man, 1997.
- [2] ENGINEERS AUSTRALIA PTY LIMITED. *"Oil and Gas Floating Facility to be Anchored in 390m-deep Timor Sea"*, EA Geomechanics, [WWW], <<http://www.engaustr.com.au/>>, December 1998.
- [3] Dr.TECHN.OLAV OLSEN A.S.. *"Snorre Suction Anchors"*. [WWW], <<http://www.olavolsen.no/>>, Dr. Techn. Olav Olsen a.s 1999.
- [4] VRYHOF ANKERS B.V.. *"Vryhof Anchor Manual 2000"*. Vryhof anchors b. v., Krimpen a/d Yssel, The Netherlands 2000.
- [5] VRYHOF ANKERS B.V.. *"Stevpris MK5 Anchor"*. Vryhof, Krimpen a/d Yssel, 1998.
- [6] VRYHOF ANKERS B.V. [WWW], <<http://www.vryhof.com/>>.
- [7] MARTINS, R. M., BRINATTI, H. L., ANDRADE, R. M.A.. *"Comparative study of the conventional and taut-leg mooring systems"*. DEN-EPUSP, OMAE 1997/ ASME 1997, São Paulo, 1997.
- [8] VRYHOF ANKERS B.V.. *"Stevmanta Anchor"*. Vryhof, Krimpen a/d Yssel, 1998.
- [9] HACHICH, W., PINTO, C. S. e outros. *"Fundações: Teoria e Prática"*. Pini, 2a. edição, 1998.
- [10] FERNANDES, A. O., TESTA, G. R., DIAS, C. A. N., GONÇALVES, E.. *"VLA Anchor Project"*, 10th International and Polar Engineering Conference , Seattle USA, 2000.
- [11] BRUCE ANCHOR LTD.. [WWW], <<http://www.bruceanchor.co.uk/>>

- [12] GONÇALVES, E., DIAS, C. A. N., FERNANDES, A. O., TESTA, G. R.. "Projeto Parametrizado de Âncora de Carga Vertical", CILAMCE, São Paulo, 1999.
- [13] DET NORSKE VERITAS. "Report no. 96-3637". DIGIN ver. 5.3. DNV, Hovik, 1998.
- [14] NEUBECKER, S. R. ; RANDOLPH, M. F. "Performance of drag anchor and chain systems in cohesive soil". Marine-Georesources-and-Geotechnology. v 14 n 2 Apr-Jun 1996, p 77-96
- [15] AUTOCAD R14. [WWW], <<http://www.autodesk.com/>>. AutoDesk, Inc. ©1982-1997.
- [16] PRITZELWITZ, P. Von. "Ensaio Experimentais para avaliação da cravação de âncoras". Dissertação de mestrado apresentada a EP-USP, São Paulo, 1999.
- [17] CENO-USP. Relatório CENO RT nº02/351: "Infra-Estrutura Laboratorial e Especificação Preliminar dos Ensaio". CENO-USP, São Paulo, 1998.
- [18] CENO-USP. Relatório CENO RT nº01/351: "Definição das Bases do Projeto e da Concepção da Âncora". CENO-USP, São Paulo, 1998.
- [19] CENO-USP. Relatório CENO RT nº03-F6/351: "Ensaio com Modelos Reduzidos em Tanque de Gel e Tanque de Lama". CENO-USP, São Paulo, 1998.

**APÊNDICE 1**  
**Apêndices de Ré da âncora CENO-ROF**



FURAÇÃO  $\varnothing=1/2"$

MATERIAL: EH-36

I : CHAPA DE FIXAÇÃO NA PATA

II : CHAPA VERTICAL

III: CHAPA DIRECIONADORA

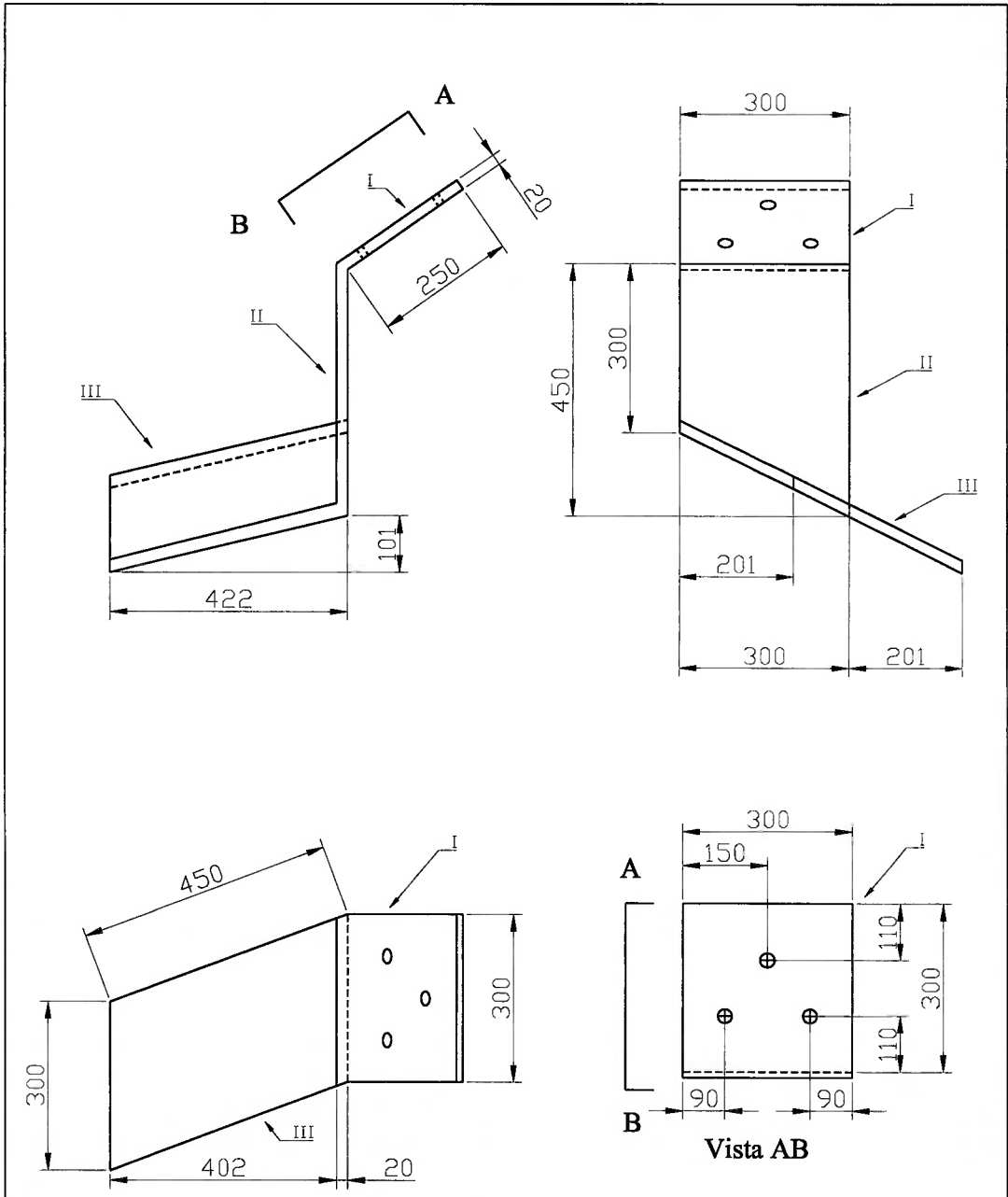
Dimensões em mm  
(Protótipo na escala 1:1)

Desenho nº: AP03

Data: 11/05/99

Título: Âncora CENO-ROF: Vistas em detalhe do apêndice de ré (versão 1).

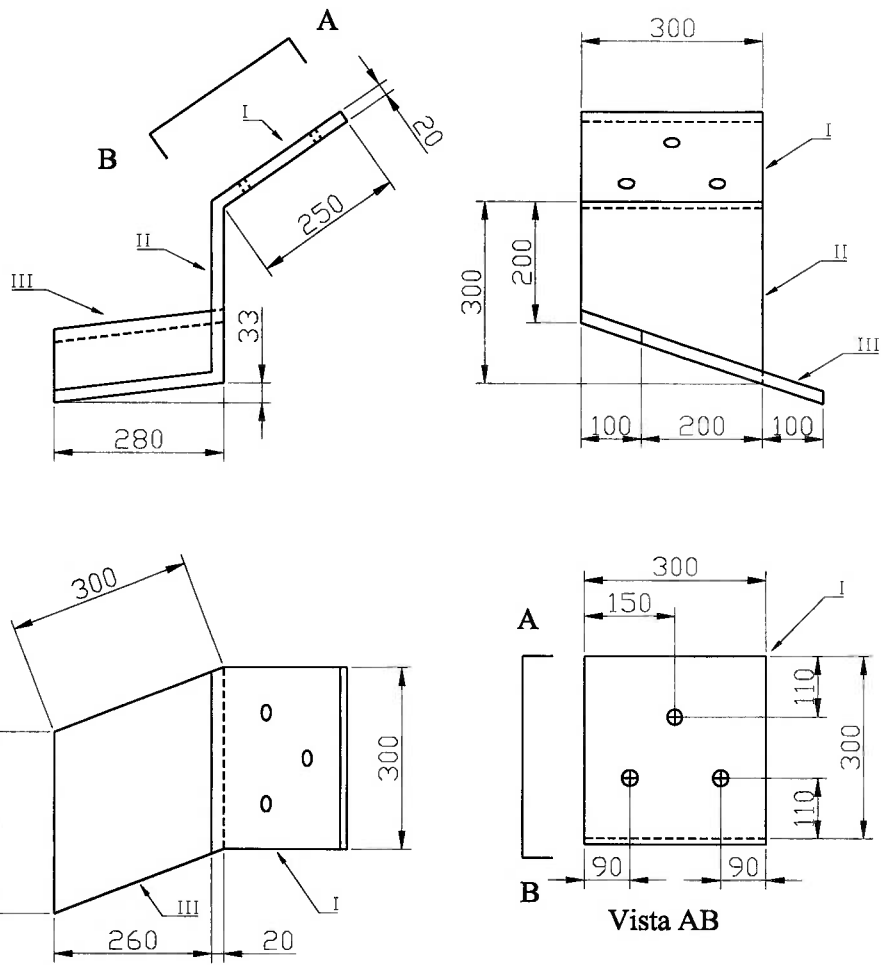
**CENO**  
**U S P**



FURAÇÃO Ø=1/2"  
 MATERIAL: EH-36  
 I : CHAPA DE FIXAÇÃO NA PATA  
 II : CHAPA VERTICAL  
 III: CHAPA DIRECIONADORA

Dimensões em mm  
 (Protótipo na escala 1:1)

|  |                |                                 |
|--|----------------|---------------------------------|
| Desenho n°: AP04   | Data: 11/05/99 | <b>CENO</b><br><hr/> <b>USP</b> |
| Título: Âncora CENO-ROF: Vistas em detalhe do apêndice de ré (versão 2). |                |                                 |



FURAÇÃO Ø=1/2"

MATERIAL: EH-36

I : CHAPA DE FIXAÇÃO NA PATA

II : CHAPA VERTICAL

III: CHAPA DIRECIONADORA

Dimensões em mm  
(Protótipo na escala 1:1)

Desenho nº: AP05

Data: 11/05/99

Título: Âncora CENO-ROF: Vistas em detalhe do apêndice de ré (versão 3).

**CENO**  
**U S P**

**APÊNDICE 2**  
**Características Técnicas da Argila MTN-325**



COMÉRCIO E REPRESENTAÇÕES LTDA.  
COM. REPRES. E INDUSTRIALIZAÇÃO POR TERCEIROS DE MINÉRIOS E ABRASIVOS

Nº 0352/97/P

Produto/Minério:- ANGITA CAOLINÍTICA

(Silicato hidratado de Alumínio) -

Procedencia: - Lavras/Ijací-MG - Brasil.

N/Ref.: MVN-200 e MVN-325 ✓  
(MVN-200)

Análise química típica:- (já seca ao sol) -

|  |         |
|--|---------|
| SiO <sub>2</sub> - (sílica) .....                | 44,00 % |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (alumina) .....   | 38,00   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ferro total) ... | 1,85    |
| TiO <sub>2</sub> (titânio) .....                 | 1,22    |
| CaO (cálcio) .....                               | 0,27    |
| MgO (magnésio) .....                             | 0,42    |
| Na <sub>2</sub> O (sódio) .....                  | 0,02    |
| K <sub>2</sub> O (potássio) .....                | 0,75    |
| P.F. à 900°C .....                               | 13,47   |

Outras características:-

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Dureza em escala Mohs -          | 2 a 2,5  |
| Refratariedade simples -         | aprox. 1.450°C.  |
| Densidade real - seca -          | aprox. <del>2,9</del> gr/cm <sup>3</sup> - 1,5 a 1,6               |
| Densidade aparente moída -       | aprox. <del>2,9</del> gr/cm <sup>3</sup> - (malha 200) - 0,6 a 0,8 |
| Côr após queimada à 1160°C -     | creme. (malha 325) - 0,4 a 0,6                                     |
| Porosidade aparente -            | 20,0 %   |
| Absorção d'água -                | 10,30 %  |
| Partículas abaixo de 5 microns - | aprox. 67,00 %.  |
| pH .....                         | de 5 a 6 (ácido)   |

Granulometria:- Seca ao sol, destorroada, moída em moinhos Raymond, classificada em malhas 200 e 325 com resíduos de 3,0% e 4,5%, respectivamente.

Embalagem:- Sacos de papel kraft multifolhados, costurados, contendo respectivamente: malha 200= 30 kgst., e malha 325= 25 kgst., líquido. Também poderá ser fornecido em big-bags de até 1000 kgst., fornecido pelo cliente.

Código fiscal - 25.08.30.0000

São Paulo, 03 de junho de 1997

MINAVOLO Comércio e Representações Ltda.

JUAREZ A. DE OLIVEIRA  
Gerente Comercial

/Ju.



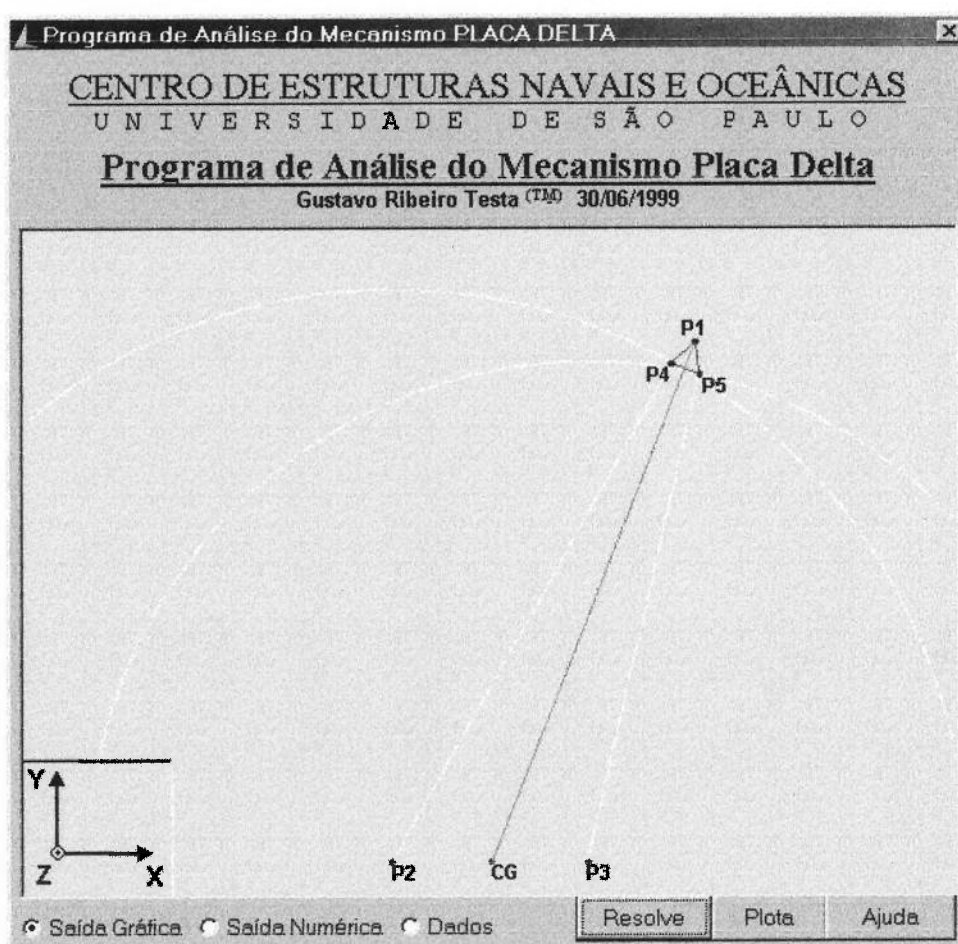
**APÊNDICE 3**  
**Programa Delta Plate Solver**



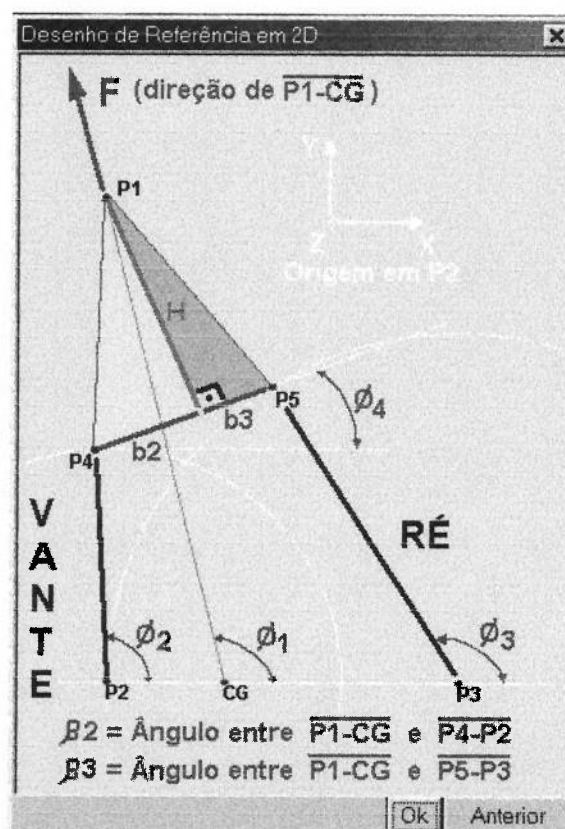
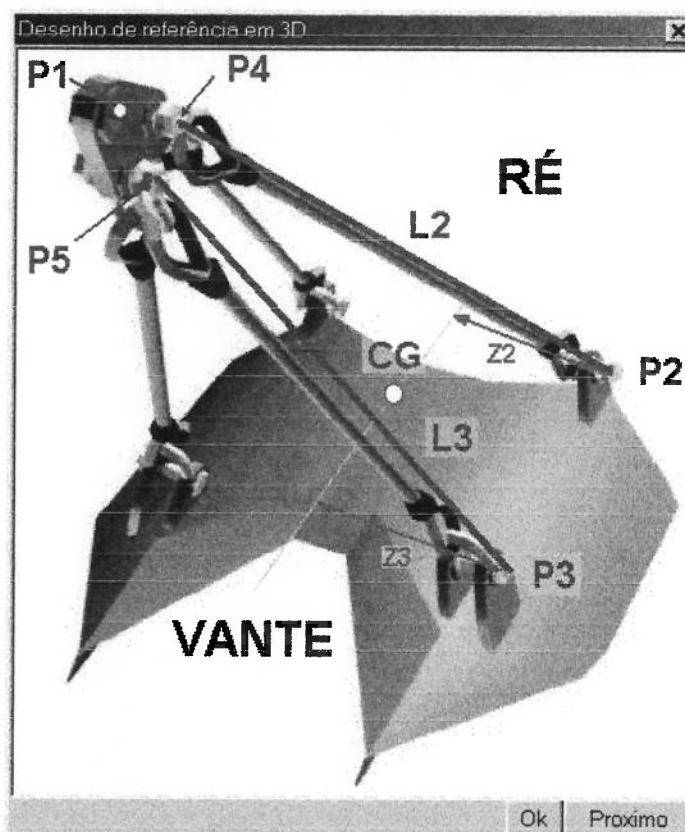
Como saída, o programa calcula:

- A configuração geométrica de equilíbrio do mecanismo (Cravação e Arrancamento)
- Saída Gráfica e Saída Numérica (arquivo texto)
  - Reações nos olhais (componentes X, Y e Z);
  - Reações na Placa Delta;
  - Forças nos tirantes;
  - Configuração geométrica da posição de equilíbrio.

**Saída Gráfica:**



**Telas de Ajuda:**



**ENTRADA NUMÉRICA ("IN-1.txt")**

Configurações quanto a geometria e forças:

-----  
 Força:  
 551.02  
 Placa Delta - BASE:  
 150            150  
 Placa Delta - ALTURA:  
 300  
 Olhal de ré - no. 2 - X2=0;Y2=0 (Z):  
 1000  
 Olhal de vante - no. 3 - (X;Y;Z):  
 1960            0            1000  
 Centro de Gravidade em Z=0 (X;Y):  
 1000            0  
 comprimento dos cabos de ré - L2:  
 5800  
 comprimento dos cabos de vante - L3:  
 5100

Configurações das interações numéricas

-----  
 Passo:  
 2  
 Epsolon  
 14

**SAÍDA NUMÉRICA ("OUT-1.txt")**

.....  
 Análise do mecanismo PLACA DELTA

»» DELTA PLATE:

~~~~~

b2 = 150 <Dist. entre P4 e intersec. entre H e P1-P4>  
 b3 = 150 <Dist. entre P5 e intersec. entre H e P1-P5>  
 B = 300 <Dist. entre furos da base (B = b2 + b3)>  
 H = 300 <Altura 'H' do triangulo de base 'B'>

»» Comprimento dos cabos (3D):

~~~~~

12 = 5800 <cabo de RÉ>  
 13 = 5100 <cabo de VANTE>

»» Cordenadas dos olhais e CG:

~~~~~

P2 = (0 ; 0 ; 1000) <olhal de RÉ>  
 P3 = (1960 ; 0 ; 1000) <olhal de VANTE>  
 CG = (1000 ; 0)

»» FORÇA:

~~~~~

força = 551,02

»» Convergencia:

-----  
 Passo refinado = 0,000000000000001  
 Epsilon = 0,000000000000001

RESULTADOS:

»» Forças calculadas (<2D> plano Z=0):

-----  
 T2 = 288,22231821672  
 T3 = 268,477399225724  
 T2per = 39,6341281776347  
 T3per = 39,6341281776888  
 T2axi = 285,484221283452  
 T3axi = 265,535778716548

»» Distâncias calculadas (<2D> plano Z=0):

-----  
 d1-6 = 101,940554643264  
 d1-7 = 109,437677302874

»» Coordenadas (X,Y) dos Pontos calculados (<2D> plano Z=0):

-----  
 P1 = (3048,88267666104 ; 5206,53541423347)  
 P4 = (2803,26681120413 ; 4978,12165231038)  
 P5 = (3084,24416692538 ; 4872,9944647141)  
 P6 = (2960,05722538824 ; 5256,55456943586)  
 P7 = (3155,51919063616 ; 5181,93340007444)

»» Angulos Calculados em GRAUS (<2D> plano Z=0):

-----  
 Ø1 = 68,5193046515 <ang. LINHA DE ANCORAGEM (1)>  
 Ø2 = 60,6153825538 <ang. CABO de RÉ (2) >  
 Ø3 = 77,0086542967 <ang. CABO de VANTE (3) >  
 Ø4 = -21,4371159764 <ang. BASE do DELTA PLATE >  
 ß2 = 7,9039220978  
 ß3 = 8,4893496452

»» Forças calculadas nos CABOS (3D):

-----  
 F2 (3D) = 146,302089839581 <cabos de RÉ (2) >  
 F3 (3D) = 136,896097123069 <cabos de VANTE (3)>

»» Forças calculadas nos OLHAIS (3D):

» Olhais de RÉ (P2):

-----  
 R2x = 70,7109987684658  
 R2y = 125,570620898047  
 R2z = 25,2244982482035

» Olhais de VANTE (P3):

-----  
 R3x = 30,1773801304825  
 R3y = 130,80273010229  
 R3z = 26,8423719849155

## APÊNDICE 4

## Resultados das Simulações e Experimentos em CD-ROOM

| Diretório | Conteúdo   |
|-----------|--|
| SIM-ANC   | Definição numérica dos modelos de âncoras <b>CENO-ROF</b> , <b>DENLA MK3</b> e <b>STEV MANTA</b> do capítulo 2 |
| SIM-RES   | Resultados numéricos das simulações desenvolvidas no capítulo 2  |
| EXP-RES   | Resultados numéricos dos experimentos desenvolvidos no capítulo 3  |