

São Paulo
1999

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

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CRAVAÇÃO DE ÂNCORAS DE CARGA VERTICAL

PHILIP von PRITZELWITZ

PHILIP von PRITZELWITZ

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CRAVAÇÃO DE ÂNCORAS DE CARGA VERTICAL

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

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Edison Gonçalves

São Paulo
1999

A minha mãe, pelo carinho, amor e compreensão.

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador, Prof. Dr. Edison Gonçalves, meu maior incentivador, pela sempre, precisa e direta colaboração e por ter viabilizado técnica e financeiramente a realização deste trabalho.

Ao Eng. Anderson de Oliveira Fernandes, companheiro que tanto colaborou neste trabalho.

- ◆ Pág. vi, Lista de Figuras, onde se lê: "5.13-Arraste x Cisalhamento", leia-se: "5.13-Arraste x Resistência ao Cisalhamento".
- ◆ Pág. vi, Lista de Figuras, onde se lê: "5.14-Arraste x Cisalhamento", leia-se: "5.14-Arraste x Resistência ao Cisalhamento".
- ◆ Pág. vi, Lista de Figuras, onde se lê: "5.15-Arraste x Cisalhamento", leia-se: "5.15-Arraste x Resistência ao Cisalhamento".
- ◆ Pág. vi, Lista de Figuras, onde se lê: "5.16-Arraste x Cisalhamento", leia-se: "5.16-Arraste x Resistência ao Cisalhamento".
- ◆ Arraste x Resistência ao Cisalhamento".
- ◆ Pág. viii, Lista de Símbolos, onde se lê: " N_c =fator de capacidade de contato", leia-se: " N_c =fator de capacidade de carga".
- ◆ Pág. viii, Lista de Símbolos, onde se lê: " S_u =tensão de cisalhamento intacta", leia-se: " S_u =resistência de cisalhamento intacta".
- ◆ Pág. ix, Lista de Símbolos, retirar o símbolo: " S_u =tensão de cisalhamento moldada".
- ◆ Pág. ix, Lista de Símbolos, onde se lê: " U_{PC} =capacidade máxima de retenção da âncora", leia-se: " U_{PC} =capacidade máxima de retenção da âncora".
- ◆ Pág. 6, 2ª linha, onde se lê: "capacidade de retenção", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 7, 3ª linha, onde se lê: "capacidade de retenção", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 7, 3ª linha, onde se lê: "Cisalhamento do solo ... de cisalhamento", leia-se: "Resistência ao cisalhamento do solo ... de cisalhamento".
- ◆ Pág. 8, 3ª linha, onde se lê: "As linhas de amarração ... experiência", leia-se: "O estabelecimento das configurações básicas das linhas de amarração e da raboia da âncora é baseado nas operações práticas vivenciadas no mar".
- ◆ Pág. 13, 11ª linha, onde se lê "capacidade de retenção", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 15, 13ª linha, onde se lê: "capacidade de retenção", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 15, última linha, onde se lê: "tensão de cisalhamento", leia-se: "resistência ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 16, 3ª linha, onde se lê: "tensão de cisalhamento moldada", leia-se: "resistência ao cisalhamento remoldada".
- ◆ Pág. 16, 5ª linha, onde se lê: "as tensões de cisalhamento", leia-se: "as resistências ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 16, última linha, onde se lê: " N_c =fator de capacidade de contato", leia-se: " N_c =fator de capacidade de carga".
- ◆ Pág. 17, 1ª linha, onde se lê: " S_u =tensão de cisalhamento(não drenada)", leia-se: " S_u =resistência ao cisalhamento(não drenada)".
- ◆ Pág. 17, 3ª linha, onde se lê: "capacidade de contato", leia-se: "capacidade de carga".

ERRATA

Dissertação: "Análise Experimental da Cravação de Âncoras de Carga Vertical"

- ◆ Pág. 17, 4ª linha, onde se lê: "capacidade de contato", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 23, 4ª linha, onde se lê: "capacidade de contato", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 23, 5ª linha, onde se lê: "capacidade de contato", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 23, 14ª linha, onde se lê: "capacidade de contato", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 23, 17ª linha, onde se lê: "capacidade de contato e no modo de falha ... abaixo", leia-se: "capacidade de carga e no modo de ruptura ... abaixo".
- ◆ Pág. 23, penúltima linha, onde se lê: "tensão de cisalhamento", leia-se: "resistência ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 24, 1ª linha, onde se lê: "capacidade de contato", leia-se: "capacidade de carga".
- ◆ Pág. 24, equação (15), onde se lê: " $N_c = Q / (B \cdot S_u)$ ", leia-se: " $N_c = Q / (A_p \cdot S_u)$ ".
- ◆ Pág. 24, 6ª linhas, onde se lê: "B=largura da chapa da âncora", leia-se: "A_p=área projetada da pata da âncora".
- ◆ Pág. 40, 19ª linha, onde se lê: "capacidade máxima de retenção", leia-se: "capacidade máxima de carga".
- ◆ Pág. 42, Figura 5.2, onde se lê: "— CENO 1B", leia-se "— CENO 1B".
- ◆ Pág. 43, Figura 5.3, onde se lê: "— CENO 1B", leia-se "— CENO 1B".
- ◆ Pág. 44, Figura 5.4, onde se lê: "— CENO 1B", leia-se "— CENO 1B".
- ◆ Pág. 51, 6ª linha, onde se lê: "tensão de cisalhamento", leia-se: "resistência ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 55, 8ª linha, onde se lê: "tensões de cisalhamento", leia-se: "resistências ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 57, Figura 5.13, onde se lê: "cisalhamento (kPa)", leia-se: "resistência ao cisalhamento (kPa) e onde se lê: "Figura 5.13 – Arraste x Cisalhamento".
- ◆ Pág. 58, Figura 5.14, onde se lê: "cisalhamento (kPa)", leia-se: "resistência ao cisalhamento (kPa) e onde se lê: "Figura 5.14 – Arraste x Cisalhamento".
- ◆ Pág. 59, Figura 5.15, onde se lê: "cisalhamento (kPa)", leia-se: "resistência ao cisalhamento (kPa) e onde se lê: "Figura 5.15 – Arraste x Cisalhamento".
- ◆ Pág. 60, Figura 5.16, onde se lê: "cisalhamento (kPa)", leia-se: "resistência ao cisalhamento (kPa) e onde se lê: "Figura 5.16 – Arraste x Cisalhamento".
- ◆ Pág. 61, 5ª linha, onde se lê: "tensões de cisalhamento", leia-se: "resistências ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 61, 6ª linha, onde se lê: "tensão de cisalhamento", leia-se: "resistência ao cisalhamento".
- ◆ Pág. 62, 3ª linha, onde se lê: "módulo de elasticidade não linear", leia-se: "comportamento não linear".
- ◆ Pág. 63, 2ª linha, onde se lê: "capacidade de retenção", leia-se: "capacidade de carga".

SUMÁRIO

Dedicatória.....	i
Agradecimentos.....	ii
Sumário.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Símbolos.....	viii
Resumo.....	x
“Abstract”.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Algumas Características das Ancoras Oceânicas.....	5
1.3 Principais Parâmetros para o Projeto de Ancoras.....	6
1.4 Escopo do Trabalho.....	9
2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA CRAVAÇÃO.....	10
2.1 Aspectos Gerais e Definições.....	10
2.1.1 Meios de arrasto da âncora.....	10
2.1.2 Linhas de cravação.....	11
2.1.3 Ângulo de cravação.....	12
2.1.4 Força e distância de cravação.....	13
2.1.5 Trajetória da âncora.....	13
2.1.6 Forças atuantes na cravação.....	14
2.2 Metodologias de Cálculo da Cravação.....	15
2.2.1 Equilíbrio da linha.....	16
2.2.2 Equilíbrio da âncora.....	19
2.3 Cálculo da Cravação.....	24
3 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	26
3.1 Modelos de Âncora.....	26
3.2 Aparato Experimental do Tanque.....	29
3.3 Material.....	30
3.4 Sistema de Aquisição de Imagens.....	31
3.5 Procedimentos nos Ensaios de Cravação.....	31
3.6 Procedimentos nos Ensaios de Arrancamento.....	32
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	33
4.1 Ensaios de Cravação.....	33
4.2 Ensaios de Arrancamento.....	33

Dissertação em Engenharia de Minas, UFPA (1999)

64	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
62	6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES
51	5.2 Análise Quantitativa
39	5.1 Análise Qualitativa
30	5 ANÁLISE DOS RESULTADOS
	APÊNDICE 1 - RESULTADOS DO PROGRAMA "DIGIN"
	APÊNDICE 2 - TABELAS COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS
	APÊNDICE 3 - FIGURAS DA REFERÊNCIA [44]

1.1 - Ancora tipo Almirantado.....	2
1.2 - Representação Esquemática da Evolução dos Vários Tipos de Ancoras, [39].....	3
2.1 - Componentes das Forças Envolvidas na Cravação da Ancora.....	20
2.2 - Comparação dos Resultados do Programa DIGIN x Ensaios no Mar.....	25
3.1 - Modelo da Ancora CENO-ROF em Escala 1:50.....	27
3.2 - Modelo da Ancora STEVMANTA em Escala 1:50.....	28
3.3 - Modelo da Ancora DENLA em Escala 1:50.....	28
3.4 - Vista Geral do Tanque de Gel.....	30
4.1 - Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel – 350g.....	34
4.2 - Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel – 400g.....	35
4.3 - Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel – 450g.....	36
4.4 - Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel – 500g.....	37
5.1 - Ensaio em Gel.....	41
5.2 - Ensaio em Gel.....	42
5.3 - Ensaio em Gel.....	43
5.4 - Ensaio em Gel.....	44
5.5 - Ensaio Típico de Arrancamento em Gel.....	45
5.6 - Curva do Módulo de Elasticidade da Lama, [20].....	46
5.7 - Forças Atuantes no Processo de Cravação.....	47
5.8 - Comparativo do Aumento do Arrasto em Função da Força de Cravação.....	49
5.9 - Croquis da Mudança de Ângulo de Tractionamento.....	59

LISTA DE FIGURAS

5.10 - Variação do Coeficiente de Arrasto	53
5.11 - Comparativos de Ensaios no Mar e Gel (Ancora Bruce)	54
5.12 - Ensaio Vryhof Stevmanta	56
5.13 - Arraste x Cisalhamento	57
5.14 - Arraste x Cisalhamento	58
5.15 - Arraste x Cisalhamento	59
5.16 - Arraste x Cisalhamento	69

LISTA DE TABELAS

4.1 - Resultados da Força de Arrancamento para o Modelo Bruce em Gel	38
4.2 - Resultados da Força de Arrancamento para o Modelo Vryhof em Gel	38
4.3 - Resultados da Força de Arrancamento para o Modelo Ceno em Gel	38
5.1 - Variação de Arraste em Função da Lâmina d'Água	52

LISTA DE SIMBOLOS

b	área efetiva de contato da linha de ancoragem.
B	comprimento na direção da superfície em colapso.
B	largura da chapa da âncora (nota: conforme fórmula utilizada).
d	superfície efetiva da linha de ancoragem.
ds	comprimento do elemento.
$d\theta/ds$	avanço angular de um elemento da linha.
DT/ds	perda de tensão na linha.
f	grau de mobilização.
f_a	fator de adesão.
f_s	fator de correção de forma.
F	atrito unitário.
H	poder de retenção (formulação clássica).
L	comprimento normal à direção da superfície em colapso.
L_w	braço de momento do olhal ao centro de gravidade.
Q	carga de colapso.
Q	resistência normal (conforma fórmula).
q	resistência normal da linha de ancoragem.
N_c	fator de capacidade de contato.
R_h	componente horizontal das forças de reação na âncora.
R_m	momento das forças de reação.
R_v	componente vertical das forças de reação na âncora na condição de colapso.
S	comprimento do segmento de linha.
S_u	tensão de cisalhamento intacta.

S_{ur}	tensão de cisalhamento moldada.
T	tensão na linha de ancoragem.
t	força de tração do cabo.
T_h	componente horizontal da força na linha ou no olhal da âncora, conforme o caso.
T_n	componente normal de t.
T_v	componente vertical da força no olhal da âncora.
UPC	capacidade máxima de retenção da âncora.
W	peso submerso da linha de ancoragem por unidade de comprimento.
w	peso submerso do segmento de linha.
AL	comprimento de linha no fundo do mar.
AT	perda de tensão na linha.
AX	projecção horizontal do segmento de linha.
AZ	projecção vertical do segmento de linha.
θ	orientação do elemento de linha de ancoragem.
θ_0	ângulo da linha de ancoragem no início do segmento.
θ_1	ângulo da linha de ancoragem no final do segmento.
μ	coeficiente de atrito equivalente, sendo um fator de condições do solo e penetração da linha no fundo.
σ	tensão mobilizada.

A fenomenologia do comportamento cinemático e dinâmico de âncoras de arrasto de carga vertical na operação de cravamento é analisada neste trabalho. Foram realizados vários ensaios em laboratório em mais de um modelo de âncora e comparados com testes em mar.

Os resultados obtidos foram analisados e utilizados no estabelecimento de algumas regras fundamentais da operação de cravamento de onde procurou-se obter um correlacionamento com fatores geométricos da âncora e as condições do solo. A comparação destes dados com a teoria e com modelo numérico computacional demonstra as deficiências do estado atual de conhecimento do fenômeno e as limitações das extrapolações viáveis como instrumento em projeto preliminar.

RESUMO

The phenomenology of cinematic and dynamic behavior of vertical load anchors in embedment are analyzed in this paper . Laboratory experiments in more than one anchor model were performed. The obtained data were analyzed to determine some fundamental rules in embedment operation and when possible correlating anchor geometric factors and mud conditions. These data comparison with the theory and an existing behavior estimating program try to show what can be obtained as preliminary data for project, the actual lack of knowledge and possible extrapolations.

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

As mais antigas âncoras consistiam de uma grande pedra, cestos de pedra, sacos de areia ou toras cheias de chumbo. Essas eram as âncoras dos gregos antigos: seguravam a embarcação apenas por seu peso e pelo seu atrito com o fundo. Quando o ferro foi introduzido na fabricação, as âncoras passaram a ter uma forma mais complexa com garras para sua melhor fixação no solo marinho.

Até o começo do século XIX as âncoras não tinham um bom desempenho, devido à não utilização de solda e a má qualidade do ferro fundido, não permitindo a construção de âncoras com geometria adequada. Geralmente as âncoras partiam-se na coroa quando tracionadas mais fortemente pela embarcação e quando estando bem cravadas ao fundo.

Em 1813, PERLING, um funcionário num estaleiro em Plymouth, introduziu os braços curvos nas patas e o Comitê do Almirantado aprovou seu uso pela armada inglesa, ficando essa âncora conhecida como tipo "Almirantado". A Figura 1.1 apresenta, esquematicamente, as definições principais desse tipo de âncora, que ainda hoje é usada em pequenas embarcações. A necessidade de suportar carregamentos cada vez mais crescentes, os aspectos práticos de manuseio e a minimização do peso das âncoras fizeram com que surgissem a partir da âncora "Almirantado" várias derivações e tipos novos de âncoras (Figura 1.2-A). O maior problema da âncora tipo "Almirantado" consiste no fato de que a travessa é perpendicular às garras, dificultando seu

Figura 1.1 - Ancora Tipo "Almirantado"

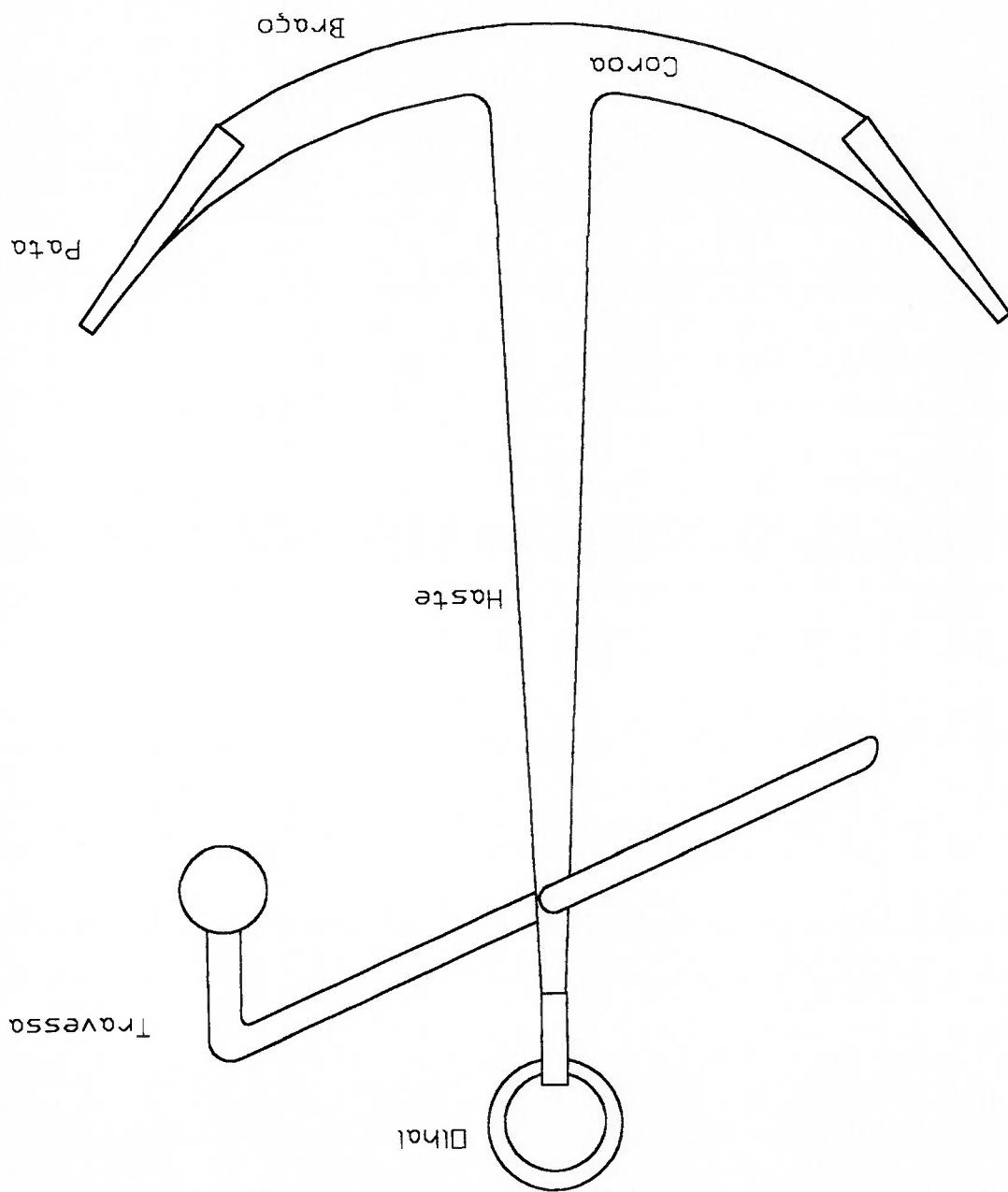
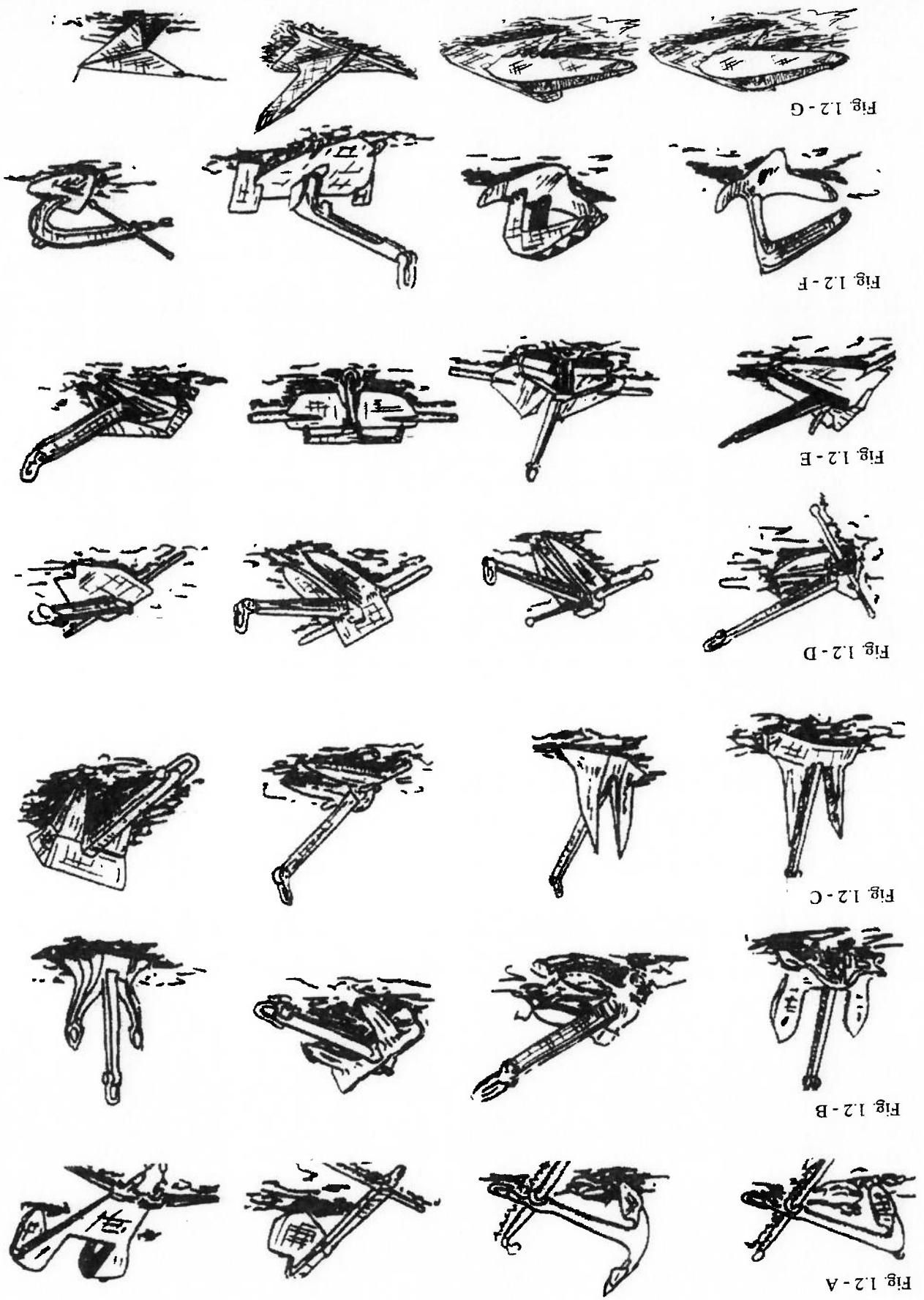


Figura 1.2 – Representação Esquemática da Evolução dos Vários Tipos de Ancoras. [39]



recolhimento (estiva) e obrigando assim a estiva no convés. Posteriormente, com a evolução da âncora tipo "Almirantado" veio a âncora "Martin" que tinha a travessa paralela às garras, sendo elas ligadas por um eixo passante à coroa (braço). Havia batentes que limitavam o ângulo de giro em cerca de 40 graus em ambas as direções de giro. Os testes com a âncora "Martin" iniciaram-se em 1885 e em 1903 foi adotada por toda a marinha inglesa.

A evolução seguinte foi a "Stockless" (Patente), Figuras 1.2-B e 1.2-C, que tinha praticamente a mesma forma de garra da âncora "Martin". O efeito de não tomar dado pela travessa é obtido pelo prolongamento lateral dos braços. A facilidade de recolhimento da âncora pelo escovém foi a razão da aplicação generalizada da mesma.

A partir da âncora "Patente" várias outras foram desenvolvidas como a "Danforth" e a "Snug", Figuras 1.2-D e 1.2-E, que se caracterizavam por um possuir peso menor e maior capacidade de ancoragem.

Navios de pesquisa que ancoram em águas profundas têm âncoras especialmente projetadas (cujas inovações foram aplicadas posteriormente para âncoras de plataformas oceânicas) para uma melhor retenção e com o menor comprimento de cabo possível. Normalmente são um fólio especialmente projetado para se cravar no fundo. Também se usa uma LWT (âncora de baixo peso em relação ao seu poder de garra) com 10 a 20m de corrente e um peso extra fixo à corrente.

O poder de retenção em relação aos vários tipos de âncoras é mostrado abaixo:

- Tipo "Cogumelo": $H = 2.5W$
- "Stockless" (comercial): $H = 4.7W$
- "Stockless" (uso militar): $H = 7.1$ a $9.1W$
- "Danforth": $H = 16$ a $21W$

As âncoras oceânicas são normalmente do tipo LWT ("light weight") e seu peso é determinado pelas condições de fundo e necessidades de tração, (Figuras 1.2-F e 1.2-G). São geralmente modificadas com acréscimo na área de garras e do comprimento da haste ("shank"). O aspecto de uma âncora oceânica é geralmente muito diferente da tradicional em função dos requisitos especiais para seu projeto. A âncora naval se diferencia da âncora oceânica (ou de fixação de plataformas oceânicas) por dois pontos principais: a primeira atua como uma garra junto à superfície e a segunda como uma placa plana a uma determinada profundidade. A primeira é de instalação e remoção rápida e é usada em períodos pequenos (fundo); enquanto a segunda é utilizada por períodos de seis meses a vinte anos, sendo sua instalação mais demorada, e assistida por um barco especializado ("Anchor Handling Supply Vessel"). Normalmente são instaladas de duas a quatro âncoras em cada extremidade de navio sondas (embarcações para prospeção de petróleo), em plataformas auto-elevatórias ("jack-up") apenas uma âncora de temporal e em plataformas semi-submersíveis duas a três por coluna (elemento estrutural de conexão do conves com os flutuadores). Os cabos normalmente saem abaixo da linha d'água de modo a melhorar a eficiência da âncora (influência da catenária). Na operação em águas profundas (grandes lâminas de água, mais de 400m) o

1.2 Algumas Características das Âncoras Oceânicas

W = peso da âncora (toneladas).

H = poder de retenção.

onde:

- "LWT": $H = 83(W)^{0.818}$

projeto de uma âncora de carga vertical pode resistir a cargas verticais de até 100 vezes o seu peso e a capacidade de retenção deve ser boa para qualquer tipo de solo marinho.

O projeto de amarração (“mooring”) e das âncoras de uma plataforma é extremamente complexo, sendo feito com auxílio de modelos. São também complexas as definições dos tipos de solo marinho e do ponto de conexão dos cabos com a plataforma que tem grande influência na eficiência da âncora.

1.3 Principais Parâmetros para o Projeto de Âncoras

Existem vários atributos em uma âncora que são cruciais para garantir uma ótima performance. Os principais são:

- A âncora deve ter um alto poder de retenção, como resultado da área de pata e projeto da haste (ou cabresto) em combinação com penetração e tipo de solo.
- O projeto deve ser de tal monta que permita a âncora resistir às grandes solicitações a ela impostas e que seja de fácil manuseio e recuperação.
- A penetração depende de seu formato e projeto. Partes que obstruam a cravação devem ser evitadas dentro do possível.
- Uma boa estabilidade que facilite sua cravação e consequentemente seu poder de retenção. Estabilizadores eficientes são parte muito importante no projeto de uma âncora.
- Hastes vazadas permitem passagem ao solo, facilitando a cravação.
- A área da pata (“fluke”) é restrita pelo projeto estrutural.

• Os esforços relativos diminuem proporcionalmente ao acréscimo de peso da

âncora.

• A área da pata é um dos fatores determinantes da capacidade de retenção. É

importante comparar as áreas de pata de diferentes tipos de âncoras. Uma boa relação área de pata e peso caracteriza uma boa âncora operacionalmente, em razão do poder de retenção ser diretamente proporcional à área da pata.

• O poder de retenção de uma âncora é proporcional à área da pata e sua

penetração. Observa-se que a área da pata é limitada pela resistência à penetração e também pelo tipo geométrico da âncora e a amarra (ou cabo).

A penetração decrescente causada pela amarra (fenômeno de catenária inversa) é

parcialmente compensado pelo poder de retenção da amarra.

O poder de retenção é uma combinação dos seguintes parâmetros:

• Peso da âncora.

• Peso do solo participante.

• Cisalhamento do solo em suas linhas de cisalhamento.

• Atrito do solo e a superfície da pata.

O ângulo entre a pata e a haste é um dos fatores que determinam a penetração no

solo. Para âncoras de haste fixa usa-se um ângulo variando de 32 a 50 graus conforme o

tipo de solo. Por exemplo, em lama mole um ângulo de 50 graus é o que melhor se

aplica. Se uma âncora é usada com ângulo incorreto influencia negativamente a sua

performance de operação e cravação. Em solos duros, uma âncora com um ângulo de 32

graus propiciará maior poder de retenção. Em solos duros, um ângulo de 50 graus irá

prejudicar a operação e a âncora tenderá a “dançar”, chegando até a tombar. Se usada

em lama, uma âncora com 32 graus, não penetrará suficientemente ou terá uma grande distância de cravação.

As linhas de amarração e cauda é a configuração básica e está baseada na experiência. Um trecho de cabo perto do olhal minimiza os efeitos da catenária inversa dentro da lama (causada pelo atrito) que restringe a capacidade de cravamento da âncora, a uma seção de peso (amarra), criando uma divisão entre a catenária na água e a catenária na lama. Consegue-se, então, a manutenção de uma força horizontal (ou quase) ideal para a operação de cravamento. A cauda não deve ser muito grande, dando a direcionabilidade desejada na água e não criando atrito excessivo no cravamento

Os dispositivos de mudança de ângulo e a utilização de pinos de cisalhamento para a mudança de ângulo entre cravação e operação apresenta uma facilidade no projeto, mas também grandes dificuldades na seleção do mesmo, operacionalmente, principalmente quando não se trabalha em cisalhamento puro.

A idéia de um gatilho está sendo desenvolvida e estudada, devendo ser a peça confiável para influenciar o mínimo possível o processo de cravação.

A resistência estrutural das âncoras está sujeita a uma variedade de cargas para as mais diversas situações, que incluem:

- Testes de certificação que resultarão na aprovação da mesma pela Sociedade Classificadora.

- Durante penetração no solo a areia e lama não apresentam grandes problemas. As cargas são bem distribuídas em toda a superfície e na operação de recuperação também. Em solos duros ou com pedras, as cargas poderão ser aplicadas em pontos discretos onde as tensões serão muito altas.

- As forças laterais podem criar esforços na haste que pode vir a não suportar.

• Durante o manuseio devem ser estudadas as cargas que possam ocorrer durante a estiva, e as causadas pela linha de amarração e guinchos.

• Na sua recuperação cuidados devem ser tomados quanto à utilização de guinchos muito potentes e a operação de içamento no AHV (embarcação para manuseio de âncoras).

• Uma má escolha de manilha poderá criar esforços muito altos no olhal.

Cargas laterais sempre foram o calcanhar de “Águiles” das âncoras “Bruce” com haste, como a flambagem localizada nas âncoras “Stepvris”. Na âncora “Denla” isso se repete (vide acidente com haste no report da Bruce Anchor, [8]), tanto que a haste foi modificada e reforçada. Porém, por esse problema e por uma concentração de cargas em uma única região a opção do projeto é por quatro tirantes onde temos uma melhor distribuição de cargas e escapa-se dos problemas de cargas laterais na haste.

1.4 Escopo do Trabalho

Apresenta-se no capítulo 2 um resumo dos principais mecanismos que influem na cravação.

No capítulo 3 apresentam-se o tanque de gel, os modelos utilizados, o gel, o sistema de aquisição de imagens e a especificação dos ensaios em gel.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e no capítulo 5 a análise desses resultados.

E, finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações mais importantes deste estudo.

2. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA CRAVAÇÃO

2.1 Aspectos Gerais e Definições

Âncoras de carga vertical têm como uma de suas principais vantagens seu baixo custo de instalação. Isto quer dizer que a operação de cravação é operacionalmente mais econômica que a instalação de uma âncora de sucção (ancoragem realizada por tubulão cravado auxiliado por uma bomba de vácuo). A operação de cravação consiste basicamente em pousar a âncora no fundo do mar e iniciar-se o arrasto da mesma por meio de uma embarcação até que a âncora atinja a profundidade de operação. Os principais fenômenos que ocorrem durante a operação de cravação serão descritos abaixo e algumas teorias e formulações do problema também.

2.1.1 Meios de arrasto da âncora

A âncora de carga vertical é basicamente uma placa plana cravada no fundo do mar. Para sua cravação, é arrastada por meio de um cabo pela embarcação. A conexão desse cabo com a "placa" (que é a pata) pode ser feita por dois meios: haste ou cabresto. A haste é semelhante à da âncora tradicional, sendo um elemento estrutural rígido angulado com a pata e com um olhal para conexão com o cabo de arraste.

A principal vantagem da haste é que, como uma estrutura rígida, transmite além de forças, também momentos, melhorando o seu desempenho na cravação. Apresenta porém uma série de desvantagens, abaixo descritas, e a opção por um cabresto é mais atraente:

- Pouca resistência da haste a cargas laterais.

- Aplicação cargas em um único ponto da estrutura.

- Facilitar ângulos de banda ("roll") na operação de cravação.

O cabresto é composto por vários cabos (normalmente quatro) formando as arestas de uma pirâmide de base retangular conectados à pata por manilhas e unidos na sua parte superior por uma chapa delta.

As desvantagens do cabresto são:

- Só transmite forças e não momentos.

- Para se variar o ângulo de cravação é necessário mudar sua configuração.
- Normalmente trocam-se os cabos de vante.

- Gera esforços de compressão no plano da pata.

As vantagens do cabresto são:

- Não sofre com cargas laterais.

- Aplicação da carga em vários pontos da estrutura.

- Ao se iniciar a rolagem ("roll") cria um momento restaurador diminuindo os efeito de ângulos de banda.

- Com a possibilidade de se localizar diferentemente os olhais permite maior flexibilidade em como transmitir-se as forças do cabo à pata.

2.1.2 Linha de cravação

A linha de cravação pode ser dividida em três trechos básicos:

- Linha de penetração: que é um trecho em cabo de aço que fica dentro da lama.

- Linha de peso: um trecho de amarras que serve de peso para a criação da catenária (é interessante que a âncora seja tracionada o mais horizontalmente possível).
- Linha de conexão: um trecho final de cabo de aço ou políester que liga as amarras a embarcação.

A escolha da linha de conexão e da linha de peso além das necessidades das mecânicas das mesmas se dá para que se tenha no momento de maior necessidade de força de cravação a força praticamente na horizontal no fundo do mar, maximizando com isso a força de tração da embarcação. Isso ocorre pela linha de peso forçar um aumento da catenária do cabo. Na prática esse ângulo no final da cravação é sempre inferior a 8 graus.

A linha de penetração é ligada ao último elo da amarra e seu comprimento é determinado pelo ângulo que tem com os cabos do cabresto no final da cravação, devendo-se analisar o efeito da catenária inversa pelo atrito da lama quando da determinação de seu comprimento e diâmetro.

A determinação da configuração ótima da linha é feita com auxílio de programas específicos (como o PREA).

2.1.3 Ângulo de cravação

O ângulo de cravação é formado pela pata e o cabo de cravação (isto é, a direção da aplicação da força de cravação) podendo haver pequenas diferenças do mesmo usando-se haste ou cabresto em razão do ponto de aplicação da força e o baricentro da pata.

Giro: é a fase inicial do processo. Ao ser tracionada a âncora apoiada no solo marinho tesam-se os cabos traseiros do cabresto, criando um momento que a faz girar apoiada pelas pontas que lentamente vão se cravando. Esse momento é compensado gradativamente pela reação da lama nas pontas até se atingir o equilíbrio dos momentos passando-se para a fase seguinte. Sua trajetória é muito variável dependendo muito da posição de assentamento da âncora no fundo do mar e das condições superficiais do

cravação e horizontalização.

A trajetória da âncora durante a cravação pode ser dividida em três partes: giro,

2.1.5 Trajetória da âncora

sua profundidade de cravação.

Na prática âncoras eficientes têm como força máxima de cravação 50% da sua capacidade de retenção e uma corrida de cravação aproximadamente 3 vezes maior que

2.1.4 Força e distância de cravação

maior distância de arraste, diminuindo a precisão da instalação.

uso de embarcações de maior potência e no outro extremo ângulos pequenos exigem porém outros fatores que influem no processo, por exemplo, ângulos grandes obrigam o profundidade de cravação e ao mesmo tempo uma maior força de arraste. Existem

Ângulos maiores implicam em menor distância de arraste para uma mesma em argilas moles.

função do tipo de solo. Para solos arenosos é cerca de 30 graus, atingindo até 50 graus Desde as âncoras de alta capacidade (“high holding”) esse ângulo é fixado em

solo. Nessa fase pode ocorrer o tombamento ("tipping") da âncora ou o deslizamento da mesma sem ocorrer a cravação.

Cravação: é a fase posterior ao giro. A âncora percorre uma trajetória praticamente retilínea, com a transferência gradual da carga dos cabos traseiros para os dianteiros. Fase muito similar de operação, não dependendo da posição inicial da mesma. Nessa fase é que ocorrem os problemas de banda. No final é que se dá normalmente a mudança da angulação dos cabos da posição de cravamento para a de retenção por meio da quebra de um pino de cisalhamento ou de algum desarme mecânico (gatilho).

Horizontalização: fase final, quase nunca alcançada na prática, por não se ter nenhum interesse na mesma. Pode ocorrer em testes, tanto em laboratório como no mar, em função do alinhamento do cabo principal com o dianteiro do cabresto criando um momento que horizontaliza a âncora.

2.1.6 Forças atuantes na cravação

As forças atuantes podem ser divididas em dois grupos: forças na linha e forças

na pata.

A força de tração aplicada pelo rebocador tem uma pequena redução ao passar pelo rolo de popa. Posteriormente, existe o atrito das amarras no fundo do mar (que diminuem com o cravamento da âncora), depois o atrito da linha de penetração na lama que cria a catenária invertida. Chegando ao olhal da placa delta divide-se nos cabos do cabresto onde temos também o atrito com a lama chegando então à pata.

Na pata podemos decompor a força atuante em duas direções: paralela e normal à pata. As forças normais à pata são normalmente equilibradas pela lama no regime

elástico. As forças paralelas à pata são as que realmente atuam no processo e devem vencer as forças resistentes ao cravamento.

O peso e o empuxo que agem também no processo, são facilmente identificáveis e se decompõem nas mesmas direções. São, porém, de menor importância para a análise pois tratamos de 5t de peso em relação a forças de até 300t.

Forças resistentes ao cravamento seriam as do efeito de ponta da âncora e do atrito de sua superfície. Existe um fenômeno também que é o de descolamento da camada limite na popa. A determinação experimental de tais forças, o efeito do atrito por abrasão ou viscoso e a influência nos fatores de escala é o que se procura obter nos ensaios.

2.2 Metodologias de Cálculo da Cravação

Na literatura existem vários trabalhos sobre o comportamento de âncoras oceânicas. São em sua maioria sobre âncoras de alta capacidade de retenção e estudam mais profundamente o fenômeno de retenção. Alguns trabalhos da Western Australia University abordam o fenômeno de cravamento. A Sociedade Classificadora Det Norske Veritas (DNV) em conjunto com fabricantes e operadores desenvolveu um programa de computador, em FORTRAN, para avaliar o desempenho de âncoras chamado "DIGIN". Aplica-se a fase inicial do projeto da âncora como ferramenta de estimativa de forças e trajetórias. A maior aplicação é porém antes de uma operação de cravação de âncoras obter-se os parâmetros necessários para o planejamento da operação. O enfoque teórico do programa engloba praticamente todas as pesquisas sobre o comportamento da âncora no cravamento. A metodologia de cálculo da trajetória e das forças de cravação, com relação aos aspectos concernentes ao solo, considera a tensão

de cisalhamento Intacta em algumas profundidades é um dos parâmetros a serem fornecidos para a análise, sendo feita uma interpolação linear entre elas para as diversas profundidades intermediárias. A tensão de cisalhamento moldada (ou amolgada) é usada para descrição da adesão/atrito entre solo e partes da âncora.

Uma vez tendo-se as tensões de cisalhamento do solo em função da profundidade de cravação, a metodologia de cálculo da cravação é baseada no equilíbrio das forças nos vários segmentos da linha de amarração (cuja configuração é um dado de entrada) e na pata da âncora. Os dados de entrada restantes do programa são: profundidade de cravamento desejada, características geométricas da âncora e procedimento de cravação (comprimento fixo de linha ou ponto fixo de arraste).

2.2.1 Equilíbrio da linha

No equilíbrio da linha temos as seguintes etapas:

- i) Divide-se a linha em segmentos iguais para a parte em catenária (na água) e outros menores para a parte enterrada (solo). Os segmentos podem ser classificados por tipo de linha: amarra, cabo de aço ou linha de polipropileno, com suas características próprias de elasticidade, peso e descrição geométrica.
- ii) O equilíbrio da parte enterrada e a resistência normal da linha de ancoragem é dado por:

$$q = N_c \cdot S_u$$

(1)

onde:

N_c = fator de capacidade de contato.

De modo a se levar em conta para efeito de profundidade de cravação no fator de capacidade de contato, um acréscimo linear é aplicado em função da profundidade. O fator de capacidade de contato é dado com um valor de referência ao nível do solo marinho e aumenta com a profundidade até com um máximo valor constante com a profundidade. Simplificando, até uma certa profundidade, a interface água lama tem influência no N_c e a partir dessa dada profundidade não há mais influência. De um modo geral as profundidades de cravação sempre são acima desta profundidade.

O atrito unitário é calculado para a linha de ancoragem pela seguinte fórmula:

$$F = f_a \cdot S_u \quad (2)$$

onde f_a é o fator de adesão.

A perda da tensão de linha é calculada em um comprimento de elemento pela seguinte fórmula:

$$dT/ds = -F \cdot d \cdot W \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3)$$

onde;

θ = orientação do elemento da linha de ancoragem ($\theta=0$ para um elemento

horizontal).

W = peso submerso da linha de ancoragem por unidade de comprimento.

F = atrito unitário.

d = superfície efetiva da linha de ancoragem.

ds = comprimento do elemento.

ds = comprimento do elemento.

O avanço angular de um elemento da linha de ancoragem ao próximo é resolvido por iterações pela seguinte fórmula:

$$d\theta/ds = (q \cdot b \cdot W \cdot \cos(\theta)) / T \quad (4)$$

onde:

T = tensão na linha de ancoragem.

q = resistência normal.

b = área efetiva de contato da linha de ancoragem.

iii) Equilíbrio da linha de ancoragem suspensa

Cada segmento de linha suspensa pode ser definido pelas seguintes fórmulas:

$$\theta_1 = \arctan(\tan \theta_0 + S \cdot W / T_h) \quad (5)$$

$$\Delta Z = T_h / W (\sec \theta_1 - \sec \theta_0) \quad (6)$$

$$\Delta X = T_h / W \ln [\tan(45 + \theta_1/2) / \tan(45 + \theta_0/2)] \quad (7)$$

onde:

S = comprimento de segmento de linha.

T_h = componente horizontal da força na linha ou no olhal da âncora.

ΔZ = projeção vertical do segmento de linha.

ΔX = projeção horizontal do segmento de linha.

θ₀ = ângulo da linha de ancoragem no início do segmento.

θ₁ = ângulo da linha de ancoragem no final do segmento.

Assume-se que o solo ao redor da âncora está em constante colapso e que a direção de penetração pode ser assumida como a direção da âncora. O princípio deste modo (modo de condição de colapso na pata), tem três incógnitas: tensão, direção da âncora e direção de penetração. Sendo resolvido pelo equilíbrio de forças em z, forças em x e de momentos. Para dada profundidade do olhal da âncora a tensão é variada

a) Modo de colapso da pata

equilíbrio interno da âncora pode ser calculado de dois modos distintos:

Figura 2.1 apresenta as componentes das forças envolvidas na cravação da âncora. O equilíbrio de forças e momentos em duas direções são a base dos cálculos. A

2.2.2 Equilíbrio da âncora

iterativamente e de acordo com as condições de contorno do problema.

v) O equilíbrio da linha de ancoragem em sua totalidade é calculado

ΔL = comprimento de linha no fundo do mar.

penetração da linha no fundo.

μ = coeficiente de atrito equivalente, sendo um fator de condições do solo e

onde:

$$\Delta T = \mu \cdot W \cdot \Delta L \quad (8)$$

na linha pode ser calculada pela seguinte fórmula:

de ancoragem pela sua resistência ao escorregamento. A correspondente perda de tensão

A linha de ancoragem no fundo do mar contribuirá para o equilíbrio do sistema

iv) Linha de ancoragem no fundo do mar

sistematicamente, sendo calculada para o ponto onde a linha começa a enterrar ("dip down point"). A força resultante na linha de ancoragem e sua direção relativa ao olhal podem ser calculadas e para cada tensão calculada a âncora é girada sistematicamente. A orientação da âncora é definida como sendo a orientação da pata e os limites de giro são a vertical e a horizontal. Normalmente para uma dada orientação, uma série de direção de penetrações são investigadas sistematicamente. Para todas as direções de penetração, o equilíbrio horizontal é dado pela equação:

$$T_h - R_h = 0 \tag{9}$$

onde R_h é a componente horizontal das forças de reação na âncora na condição de colapso.

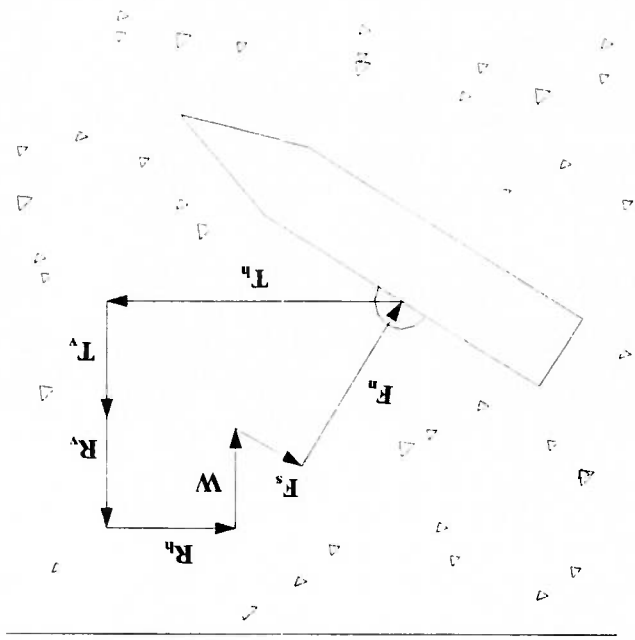


Figura 2.1 – Componentes das Forças Envolvidas na Cravação da Âncora

Nos cálculos considera-se que todas as âncoras levam o solo à condição de colapso com reações comparáveis com a direção da âncora e a resistência à penetração. Variando a direção da âncora, o equilíbrio horizontal para uma dada direção de penetração é encontrado para certas direções de para. Entre esses, acha-se o que tenha equilíbrio vertical dado pela equação:

$$T_v - R_v - W = 0 \quad (10)$$

onde:

T_v = componente vertical da força no olhal da âncora.

R_v = componente vertical das forças de reação na âncora na condição de

colapso.

Variando a tensão na linha, os equilíbrios vertical e horizontal são encontrados

para as várias tensões. Entre esses procura-se aquele que dá o equilíbrio de momentos

no olhal da âncora, dado pela expressão:

$$R_m - W \cdot L_w = 0 \quad (11)$$

onde:

R_m = momento das forças de reação.

L_w = braço de momento do olhal ao centro de gravidade.

Quando o equilíbrio para essas três equações é encontrado, uma solução possível

é dada. Caso contrário, uma solução pode ser definida por outro método.

b) Modo pata com restrições

A âncora por definição penetra na direção da pata. Isto significa que os esforços normais contra a pata durante a penetração são menores que os necessários para o colapso do solo para cargas de momento. Comparado com o modo descrito anteriormente, a desconhecida direção de penetração é trocada por uma distribuição de tensões que dá a menor força de tensão na linha imersa na lama.

Para uma dada tensão de linha (T_v , T_h) a uma dada profundidade, a resistência aos membros não paralelos à pata são calculados como se o solo ao redor do mesmo estivesse em colapso. A resistência de escorregamento ao longo da pata na direção de penetração é conhecida como resistência ao escorregamento limite. Isso deixa a força normal resultante nos elementos da pata e seu braço como as únicas incógnitas. A tensão pode ser variada enquanto que a força resultante seja normal à pata. A cada ângulo de orientação da âncora é encontrado o braço para a força normal (F_n), obtendo-se o equilíbrio de momentos. E então checado se essa força normal e seu braço podem ser substituídos por uma real distribuição de tensões nos elementos da pata. Isso é feito variando-se o ângulo de pata e o centro local de giro da pata até a condição de colapso dando uma certa distribuição de esforços.

E, então, possível obter-se o equilíbrio com uma certa distribuição de esforços normais para as várias orientações de âncora. A orientação com a mínima tensão de linha é escolhida.

As tensões de contato na âncora são determinadas a partir de dados empíricos e de modelos teóricos. A expressão geral para as tensões agindo normalmente a um elemento é a seguinte:

$$\sigma = f \cdot N_c \cdot S_u$$

(12)

onde:

σ = tensão mobilizada.

F = grau de mobilização.

A capacidade de contato para um elemento afeta vários fatores para uma forma

específica. O fator de capacidade de retenção (N_c) pode variar conforme o formato da âncora. A referência [19] propõe a seguinte formulação:

$$N_c = (N_c)_0 \cdot f_s \quad (13)$$

donde:

$$f_s = 1.0 + 0.19 B/L \quad (14)$$

onde:

f_s = fator de correção de forma.

B = comprimento na direção da superfície da superfície em colapso.

L = comprimento normal à direção da superfície em colapso.

Outros efeitos relativos a capacidade de contato podem ser obtidos por meio do Método dos de Elementos Finitos.

Parâmetros e situações que podem ter efeito significativo nos fatores da capacidade de contato e no modo de falha estão discriminados abaixo:

- Variação do ângulo entre elemento e direção de penetração.

- Profundidade de cravamento.

- Direção do elemento.

- Distância de mobilização para tensões normais.

- Incremento linear na tensão de cisalhamento.

- Estratificação.

Os fatores de capacidade de contato são calculados a partir de curvas de carga de

deslocamento usando a seguinte fórmula:

$$N_c = Q / (B \cdot S_u) \quad (15)$$

onde:

Q = carga de colapso.

B = largura da chapa da âncora.

2.3 Cálculo da Cravação

Foram calculadas diversas cravações por meio do programa DIGIN, para várias

finalidades. Apresentamos um dos resultados obtidos utilizando uma âncora Denla

(Bruce Anchor Ltd.) com área de pata de 10 m².

Para o cálculo foi assumida a seguinte hipótese: comprimento de cabo constante.

O ângulo da haste com a pata, linha de cravação e solo idênticos ao ensaio de mar

realizado pela Petrobras e Bruce Anchor [7]. A figura 2.2 mostra os resultados desse

cálculo comparativamente aos do teste real em mar.

Podemos observar a boa aproximação obtida pelo programa, havendo apenas

uma diferença na fase inicial de giro. Normalmente os resultados tendem a ser

conservativos em profundidades acima de 15m.

No Apêndice I é apresentada uma saída completa dos resultados de cálculo com

o programa "DIGIN".

P27 teste 6 Denla 29/12/97

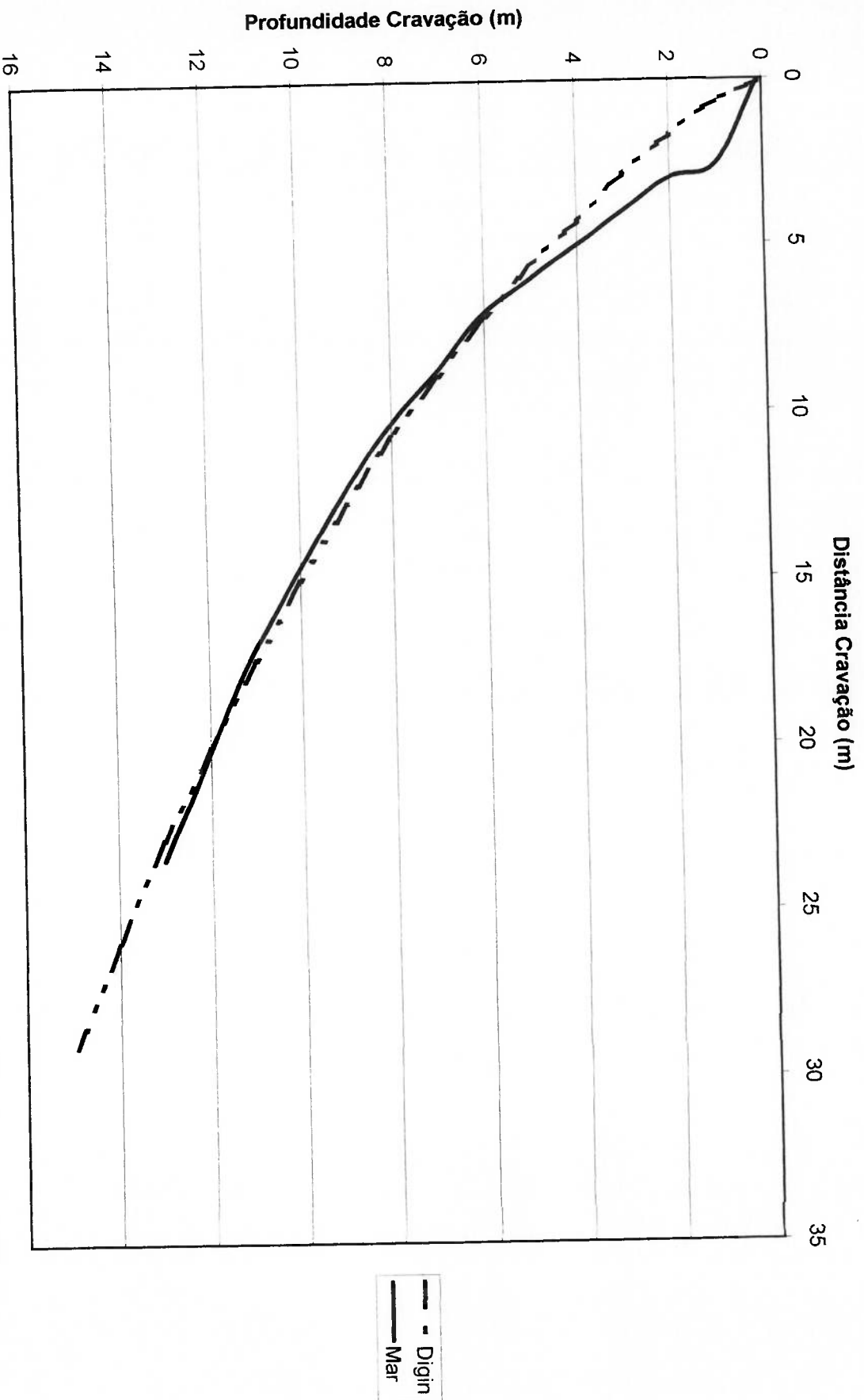


Figura 2.2 – Comparação de Resultados do Programa DIGIN x Ensaios no Mar

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A fim de avaliar-se experimentalmente o desempenho de âncoras são realizados ensaios em modelos de âncoras em escala reduzida. Este capítulo apresenta detalhes dos modelos de âncoras, do aparato experimental, do material utilizado como meio para simular o solo e dos procedimentos de ensaios em tanque de gel.

3.1 Modelos de Âncora

Foram construídos três modelos de âncoras na escala 1:50 para serem ensaiadas no tanque com gel. Dois desses modelos se referem a âncoras já fabricadas comercialmente, a DENLA Anchor fabricada pela Bruce Anchor Limited e a STEVMANTA Anchor fabricada pela Vryhof Ankers B. V. O terceiro modelo, a CENO-ROF, é uma nova âncora em desenvolvimento, projetada pelo CENO/USP. A confecção de todos os modelos, principalmente das âncoras já existentes, foi feita de forma rigorosa, respeitando-se os detalhes dimensionais das mesmas.

As principais características dos modelos são:

- Escala: 1:50.
- Chapamento: chapa de alumínio de espessura de 1 mm.
- Conformação das chapas: a frio.
- União das chapas: cola para metais Loctite 319.
- Acabamento: massa plástica automotiva e tinta alquídica.
- Conexão com a linha principal: 4 olhais de alumínio para os modelos CENO-ROF e STEVMANTA ou haste rígida para o modelo DENLA.

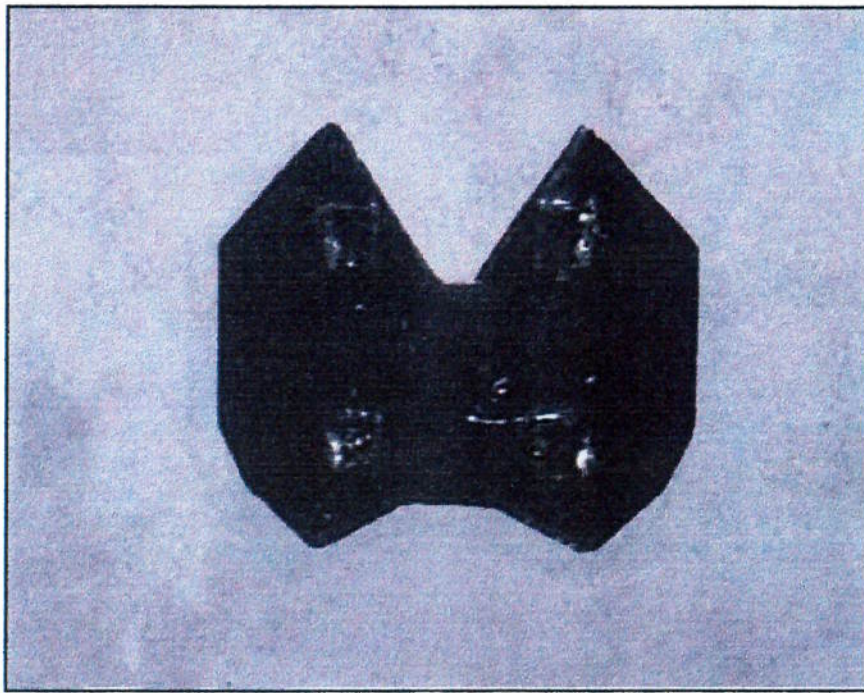


Figura 3.1 – Modelo da Ancora CENO-ROF em Escala 1:50

âncoras CENO-ROF, STEVMANTA e DENLA.

As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 mostram, respectivamente, fotos dos modelos das

- Chapa delta: alumínio.
- Cabresto (CENO-ROF e STEVMANTA): cabo de fibra de carbono.

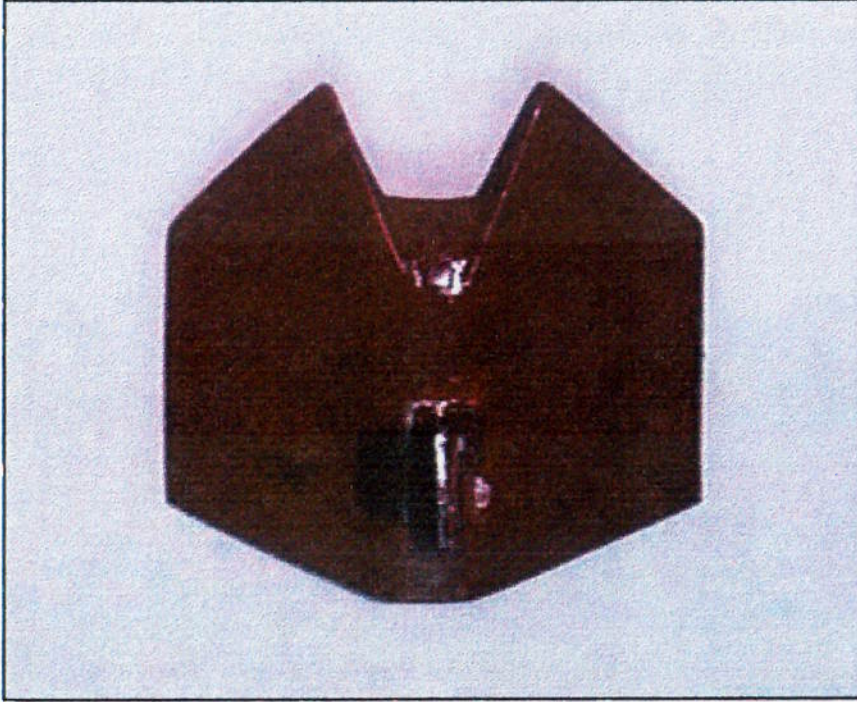


Figura 3.3 – Modelo da Ancora DENLA em Escala 1:50

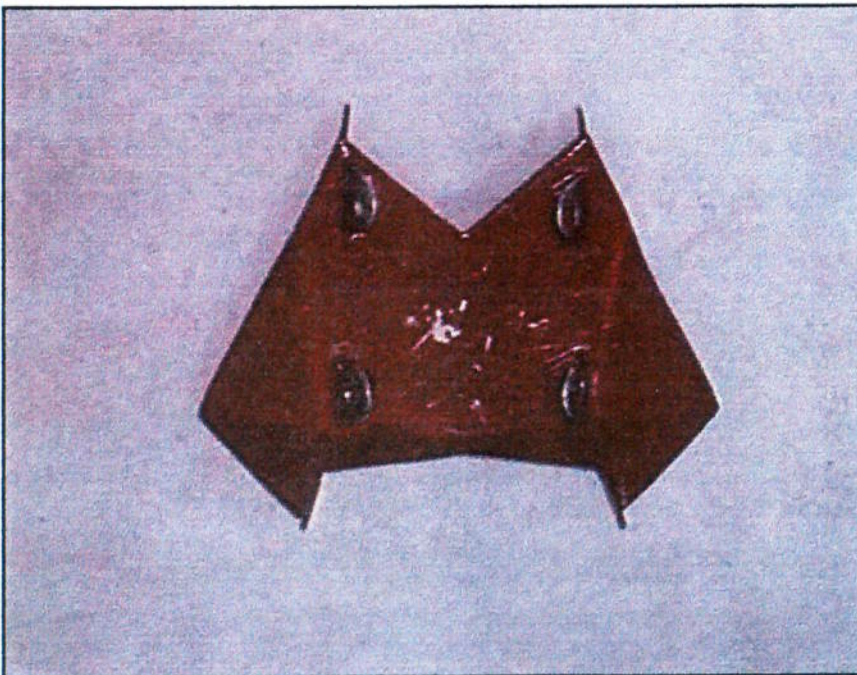


Figura 3.2 – Modelo da Ancora STEVMANTA em Escala 1:50

3.2 Aparato Experimental do Tanque

O tanque de gel é geralmente o primeiro ensaio realizado com modelos no desenvolvimento de uma nova âncora. Usado pelos principais fabricantes e centros de pesquisa, pouco existe na literatura sobre o mesmo. Isso deve-se ao fato de ser um procedimento da fase inicial do projeto de uma âncora. Uma publicação da Universidade de Houston, [44], mostra o ensaio comparativo das âncoras Denla (Bruce) e Stevanta (Vryhof) em um tanque de gel. Tem a vantagem da fácil visualização das operações, porém o gel não representa com acuidade o efeito da lama no processo, tanto que os valores obtidos no teste são apenas comparativos entre os modelos. Os tanques dos fabricantes são pequenos e sem dispositivos especiais. Os ensaios com modelos reduzidos de âncoras podem trazer informações valiosas sobre o comportamento das mesmas em operações de cravação e arrancamento. A construção de um tanque de ensaios com gel, visa constatar a exequibilidade técnica da âncora e de seus mecanismos, e também realizar comparações entre os principais parâmetros de performance das âncoras. O tanque de ensaios com gel permite a obtenção de informações que auxiliarão nos ensaios em tanque com lama. A utilização de um gel transparente como meio, permite a visualização e caracterização dos processos de cravação e arrancamento, de uma forma qualitativa e comparativa.

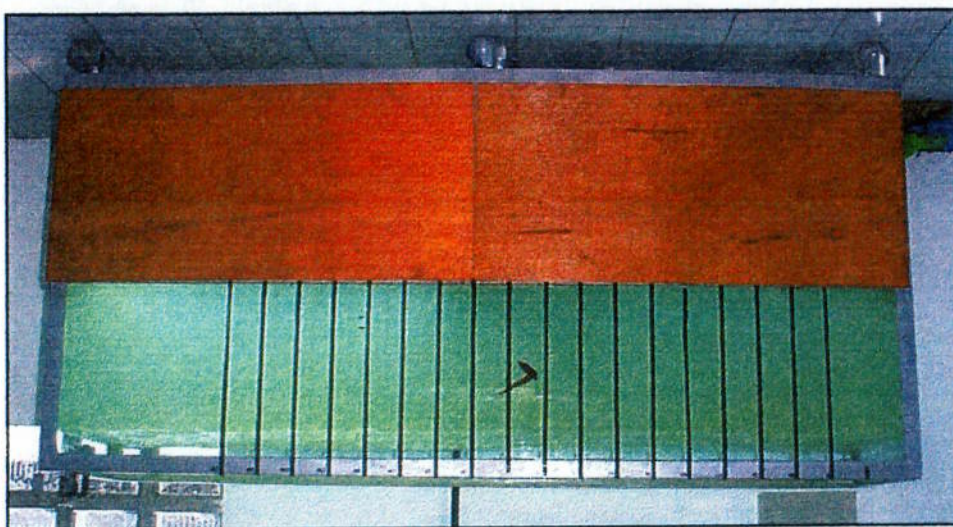
O tanque de ensaios com gel é uma caixa com paredes de vidro (tipo aquário) que é suportada por uma estrutura metálica soldada, sobre rodas. As dimensões internas do tanque são:

- Comprimento: 2500 mm
- Altura: 600 mm.

O CARBOPOL 940 foi o escolhido para a fabricação do gel transparente e utilizado no tanque de ensaios. Essa escolha foi baseada na boa transparência e

3.3 Material

Figura 3.4 – Vista Geral do Tanque de Gel.



tanque.

Acoplados ao tanque de ensaios, são utilizados outros dispositivos, como um conjunto de polias, pesos e porta pesos e um sistema de iluminação. O conjunto de polias usado serve para guiar o cabo principal preso aos modelos de âncoras durante os processos de cravação e arrancamento. Os pesos e porta pesos são utilizados para aplicação das cargas no processo de cravação e arrancamento. O sistema de iluminação é usado como auxílio para as medições da posição dos modelos e à visualização da imagem dos mesmos dentro do tanque de gel. A Figura 3.4 mostra a vista geral do

- Largura: 600 mm.

estabilidade desse composto. O CARBOPOL 940 é um polímero de alta performance largamente usado na indústria de produtos cosméticos.

Após a realização de vários testes sobre a proporção mais adequada dos componentes para a fabricação do gel, foi escolhida a mistura que contém 98,5% de água destilada, 0,5% de CARBOPOL 940 e 1% de solução de hidróxido de sódio (18%). As porcentagens são em relação ao peso total da mistura.

3.4 Sistema de Aquisição de Imagens

O recurso da filmagem foi utilizado nos ensaios dos modelos de âncoras. O método de aquisição das imagens utiliza uma vídeo-filmadora SONY-CCD-V3 conectada a uma placa de captura de vídeo, HINI vídeo, associada a um microcomputador Pentium 166 MHz-Blastar. Desta forma pode-se gravar imagens dos ensaios no microcomputador, armazená-las em arquivos e explorar os recursos de programas de tratamentos de imagens para uma melhor visualização do processo de cravação.

3.5 Procedimentos dos Ensaios de Cravação

Como já citado na introdução, os ensaios no tanque de gel têm como finalidade propiciar uma melhor visualização e compreensão do comportamento dos modelos de âncoras em gel e com isso comparar as performances desses modelos de uma forma qualitativa.

Os ensaios no tanque com gel serão realizados para se analisar o processo de cravação dos modelos de âncoras, no qual muitas variáveis são importantes. O ensaio

No ensaio de arrancamento, o modelo de âncora é colocado numa determinada profundidade no interior do tanque de gel. O ângulo de ataque entre a pata do modelo e a superfície é imposto com o auxílio de um suporte acoplado ao tanque. Em seguida, aplica-se o carregamento pela adição sucessiva de pesos até que ocorra o arrancamento. Para cada acréscimo de peso avalia-se o deslocamento do modelo de âncora no gel. Os ensaios serão repetidos para os três modelos em diversas condições de arrancamento, ângulo e profundidade.

3.6 Procedimentos dos Ensaios de Arrancamento

Iniciado o ensaio, o modelo de âncora começa o movimento de cravação. Ao passar pelas linhas verticais da tela sua posição é marcada, por meio de uma caneta especial no vidro do tanque, tomando-se como referência a proa do modelo, sendo o tempo decorrido registrado. Ao final do ensaio mede-se com uma trena a profundidade que o modelo de âncora atingiu em cada posição, e com isso poder-se-á verificar a trajetória do modelo ensaiado e comparar com os outros modelos nas mesmas condições de carregamento. Pode-se então obter resultados comparativos de distância percorrida no arrasto e profundidade de cravação, que são importantes parâmetros operacionais das âncoras. Os ensaios serão então repetidos para os três modelos de âncoras em diversas condições de carregamento diferentes.

tanque possui marcas verticais (feitas com fita adesiva) a cada 10 cm ao longo de seu comprimento, formando assim uma tela de referência ("grid"). Oposta ao conjunto de polias. Coloca-se então um peso de valor especificado no porta pesos com isso tracionando o cabo, de modo a provocar a cravação do modelo no gel. O modelo de âncora é colocado e colocá-lo no tanque na extremidade

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de cravação e arrancamento para os três modelos distintos de âncoras.

4.1 Ensaios de Cravação

Os modelos ensaiados no tanque de gel foram os da BRUCE, VRYHOF e CENO-ROF, todos na escala 1:50, conforme a referência [12].

Os ensaios de cravação foram realizados com os modelos da BRUCE, CENO-ROF e VRYHOF. O modelo CENO-ROF possui duas versões de cabresto (CENOA/B). A versão chamada de CENO-A possui comprimento de cabo de ré de 108mm e cabo de vante de 69mm, e a versão chamada de CENO-B possui comprimento de cabo de ré de 108mm e cabo de vante de 73mm.

As Figuras 4.1 a 4.4 apresentam os resultados obtidos nos ensaios.

4.2 Ensaios de Arrancamento

Neste item são apresentados os resultados experimentais dos ensaios de arrancamento para os modelos ensaiados nas diferentes condições de ângulo de ataque e profundidade. Os resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 4.1 a 4.3.

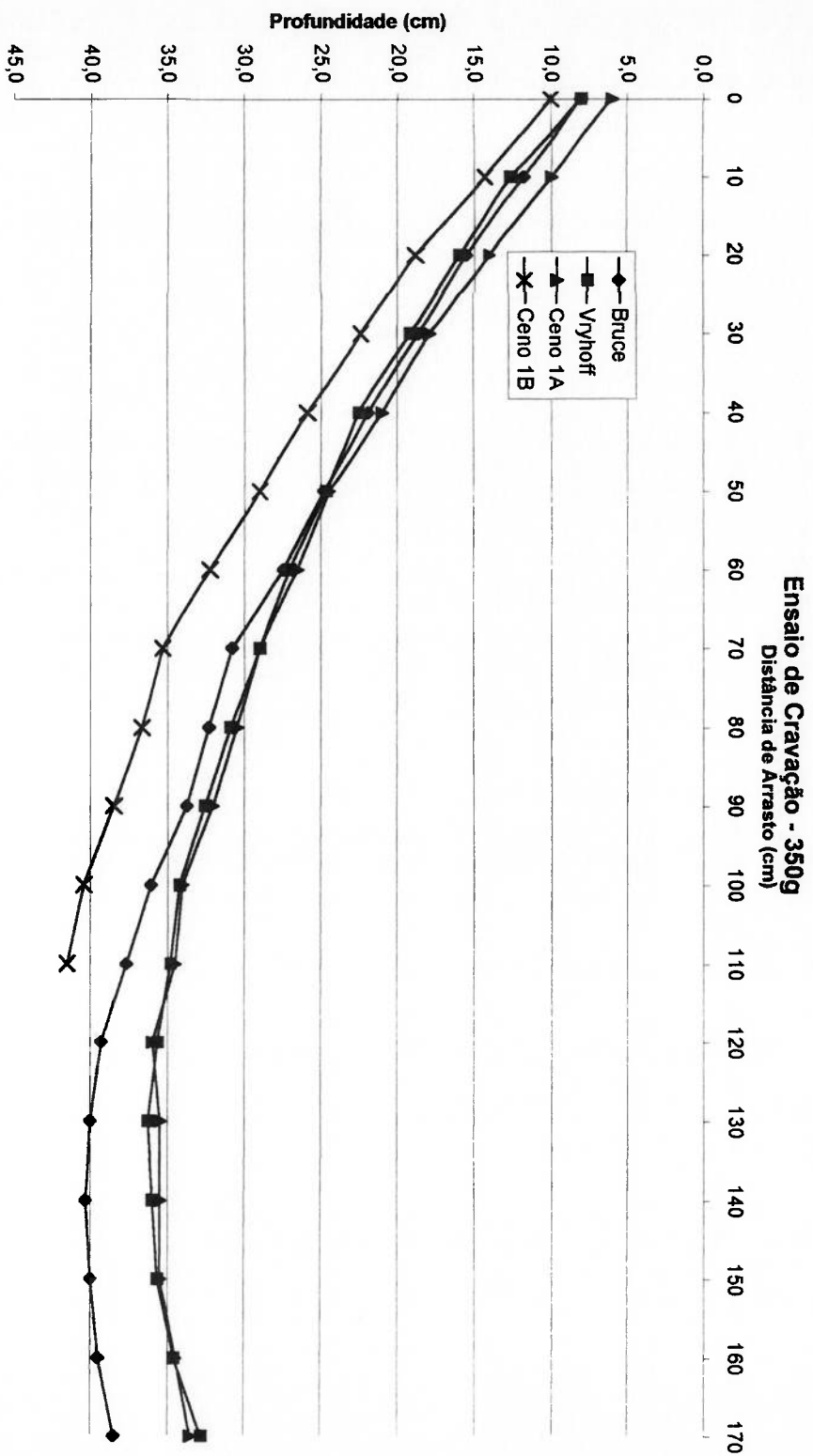


Figura 4.1 – Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel - 350g

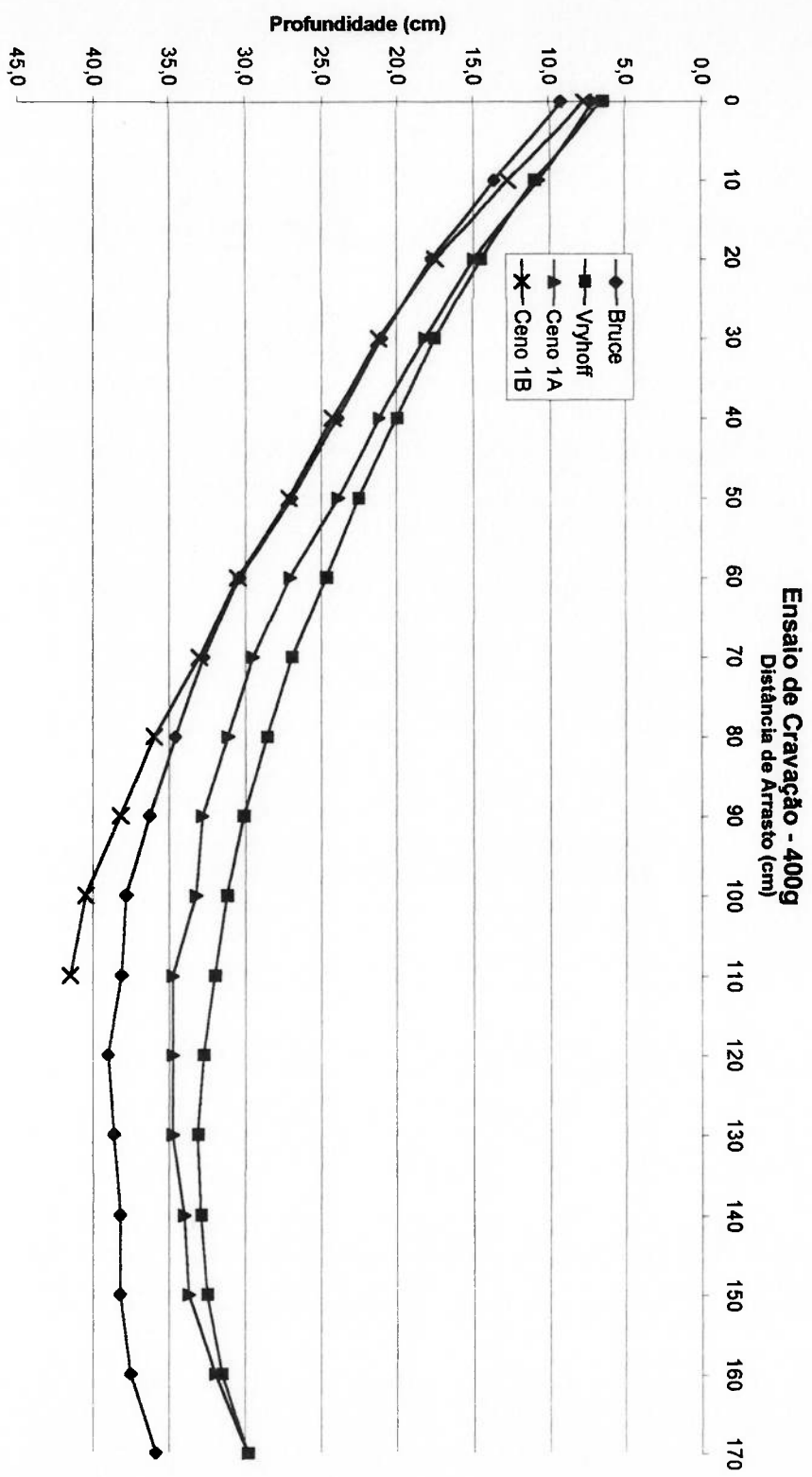


Figura 4.2 – Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel - 400g

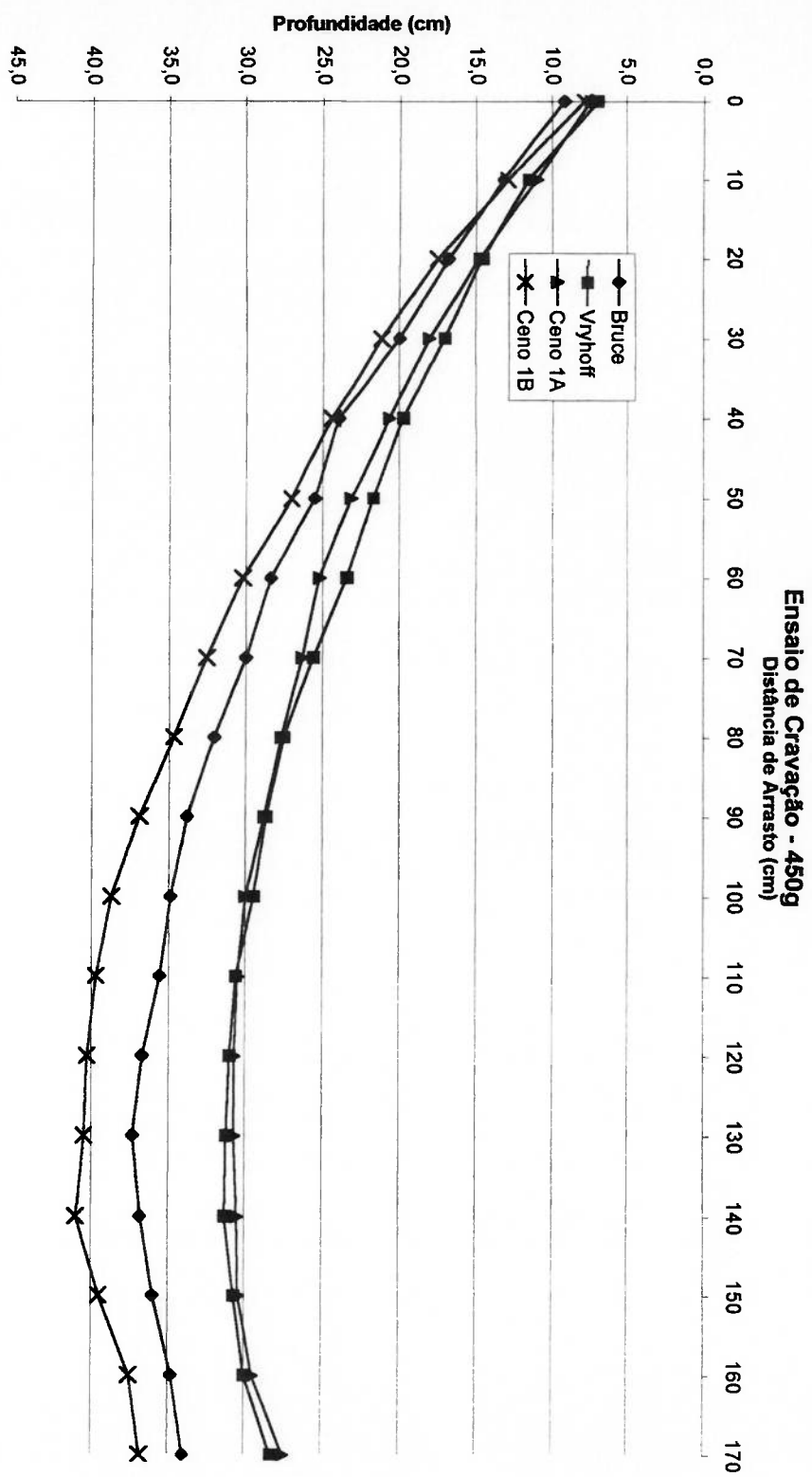


Figura 4.3 – Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel - 450g

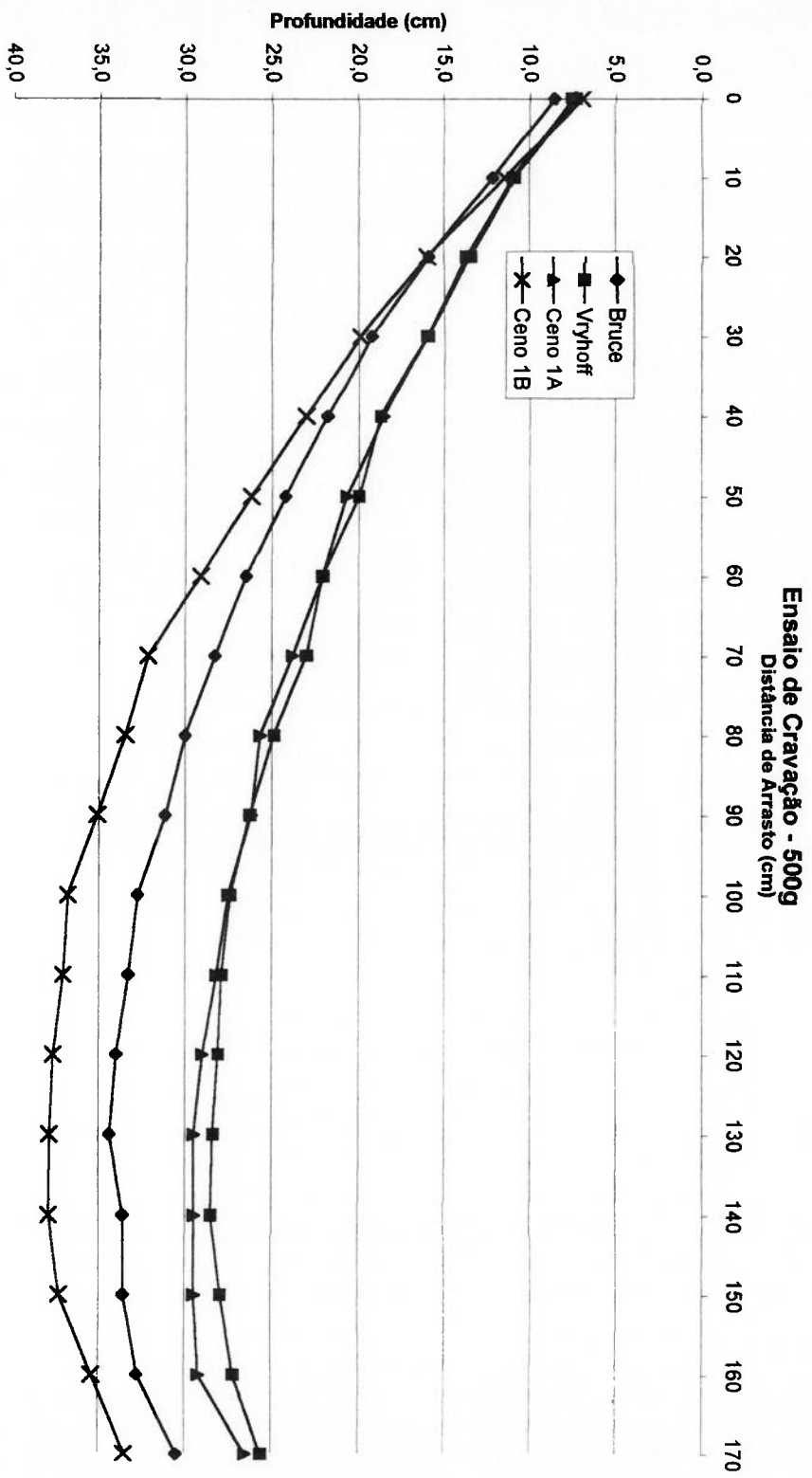


Figura 4.4 – Gráfico Comparativo dos Ensaios de Cravação em Gel - 500g

		30	750
		60	750
		90	750
Ceno	Angulo (graus)	Ensaio 1	Carregamento (g)
		Ensaio 2	Carregamento (g)

Tabela 4.3 – Resultados de Força de Arrancamento para Modelo CENO em Gel

		30	450
		60	500
		90	650
VRyhOF	Angulo (graus)	Ensaio 1	Carregamento (g)
		Ensaio 2	Carregamento (g)

Tabela 4.2 – Resultados de Força de Arrancamento para o Modelo VRyhOF em Gel

		30	700
		60	750
		90	750
BRUCE	Angulo (graus)	Ensaio 1	Carregamento (g)
		Ensaio 2	Carregamento (g)

Tabela 4.1 – Resultados de Força de Arrancamento para o Modelo BRUCE em Gel

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Análise Qualitativa

O desenvolvimento desses ensaios permite inferir as seguintes conclusões comparativas dos modelos e de caráter geral:

- i) Os ensaios de cravação e arrancamento com modelos reduzidos em tanque de gel trouxeram importantes informações sobre o desempenho dos modelos. Com esses ensaios pôde-se caracterizar de uma forma qualitativa a trajetória e profundidade máxima atingidas pelos modelos (comportamento cinemático), e as forças de cravação e arrancamento, com isto, obtiveram-se dados relevantes para uma comparação entre os modelos ensaiados. Nos resultados obtidos dos ensaios com modelo CENO-ROF, VRYHOF e BRUCE [12], constatou-se que o modelo CENO-ROF possui um comportamento equivalente aos modelos VRYHOF e BRUCE.

- ii) Os ensaios realizados com modelos de âncora CENO-ROF nas escalas 1:50 demonstraram a adequabilidade do projeto, definindo, portanto, as características do modelo de âncora na escala 1:20 e 1:3, a ser ensaiado em tanque de lama e no mar, respectivamente.

Nos ensaios de cravação foi constatada uma grande semelhança entre as trajetórias dos modelos.

Verificou-se que o modelo CENO-B possui uma melhor performance entre os modelos ensaiados em relação a profundidade de cravação. Em seguida vieram os modelos BRUCE, VRYHOF e CENO-A, estes dois últimos praticamente com o mesmo

Usando a Figura 5.7 e analisando as forças normais à pata temos: Força T_n - componente normal à pata da força exercida pelo cabo de tração, podendo ser aplicada em um ponto (âncora com haste) ou ser considerada como a resultante normal das forças aplicadas nos olhais. A força T (força de tração do cabo) é da ordem de 0,4 a 0,7 a capacidade máxima de retenção da âncora (UPC)). Sabendo-se que $T_n > T$ e $0,4 \text{ UPC} < T < 0,7 \text{ UPC}$ e sendo UPC a carga de colapso do meio podemos dizer que T gera tensões no meio abaixo da carga de colapso. Exceção das regiões de ponta e próximas à superfície da pata (onde as tensões da carga tangencial se fazem mais presentes) esta-se em regime elástico (Modo da Pata com Restrições). Porém, nos ensaios realizados em gel usou-se sempre uma carga constante, próximas à carga de UPC em alguns casos podendo então

real pode ser feita por se tratar de meios de comportamento elástico semelhantes. Em um ensaio de arrancamento típico temos uma curva força x deslocamento como exposto na Figura 5.5. Fazendo-se as conversões necessárias essa poderia ser a curva do módulo de elasticidade do gel. Na Figura 5.6 temos a curva para a lama onde se vê o comportamento multilinear semelhante. Então, uma análise de trajetória entre o modelo e o multilinear.

arrancamento pode-se avaliar o módulo de elasticidade do gel e sua característica questão, pode mostrar o comportamento do gel como meio, isto é, por meio de ensaios de A análise dos ensaios de arrancamento, apesar de não ser o assunto do estudo em Outras análises podem ser feitas e algumas conclusões interessantes foram obtidas:

o modelo VRYHOF utilizou um maior tempo para a cravação. Já para a realização do ensaio o modelo CENO-A gastou um menor tempo para a cravação. Já modelos, para as mesmas condições de carregamento. Em relação ao tempo decorrido desempenho. As Figuras 5.1 a 5.4 mostram os gráficos comparativos entre os

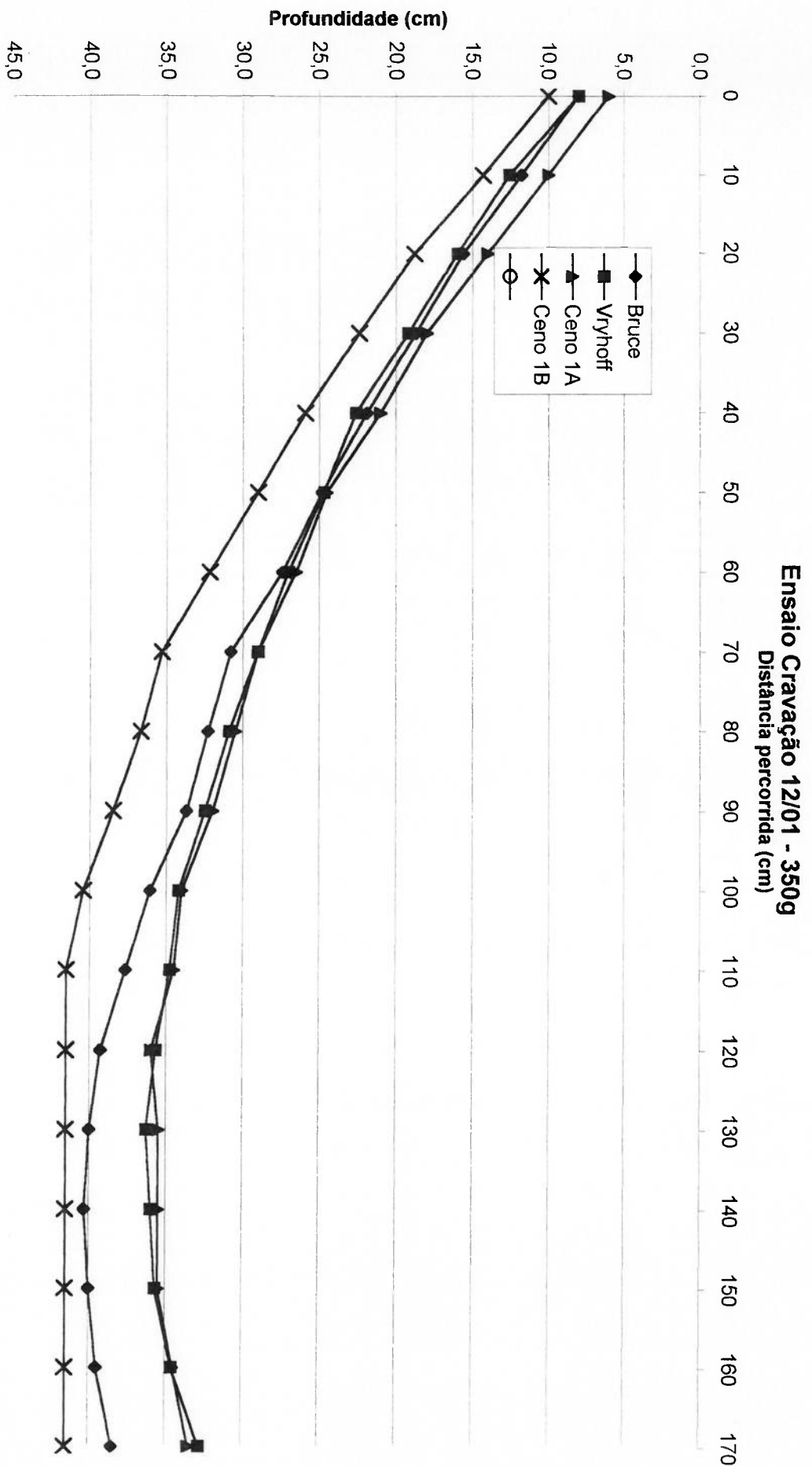


Figura 5.1 – Ensaio em Gel

Ensaio Cravação 12/01 - 350g

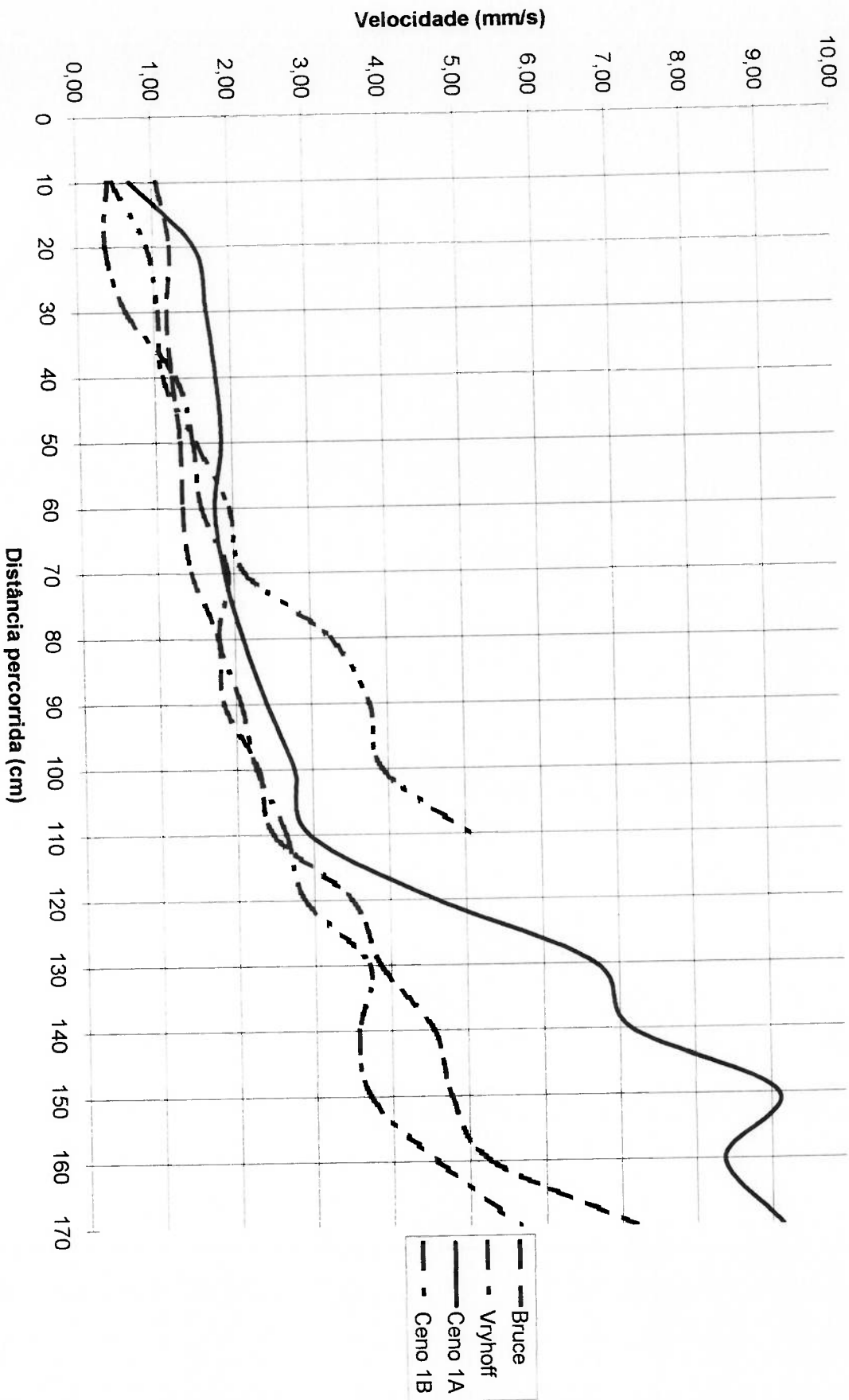


Figura 5.2 – Ensaio em Gel

Ensaio Cravação 12/01 - 350g

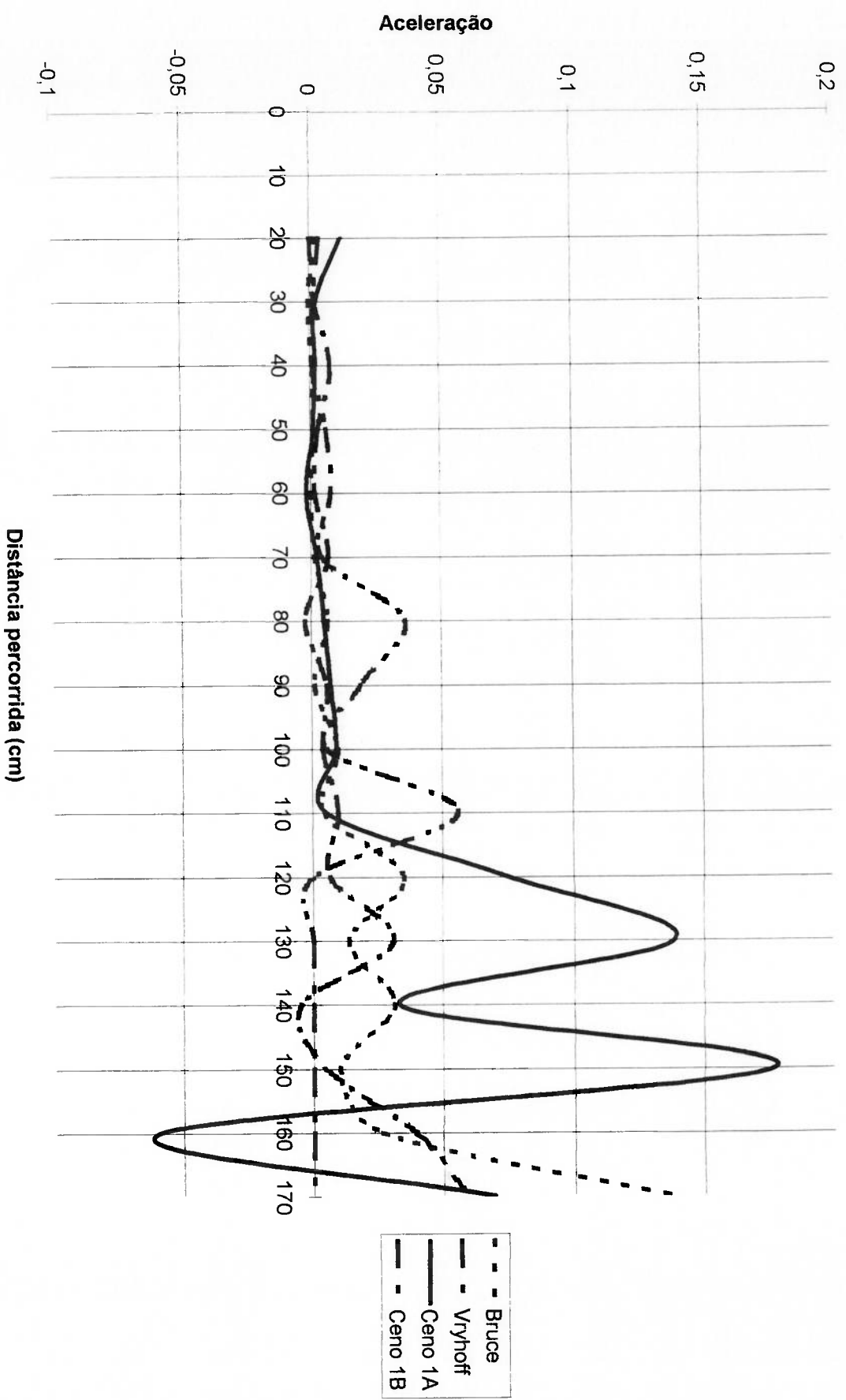


Figura 5.3 – Ensaio em Gel

Ensaio Cravação 12/01 - 350g

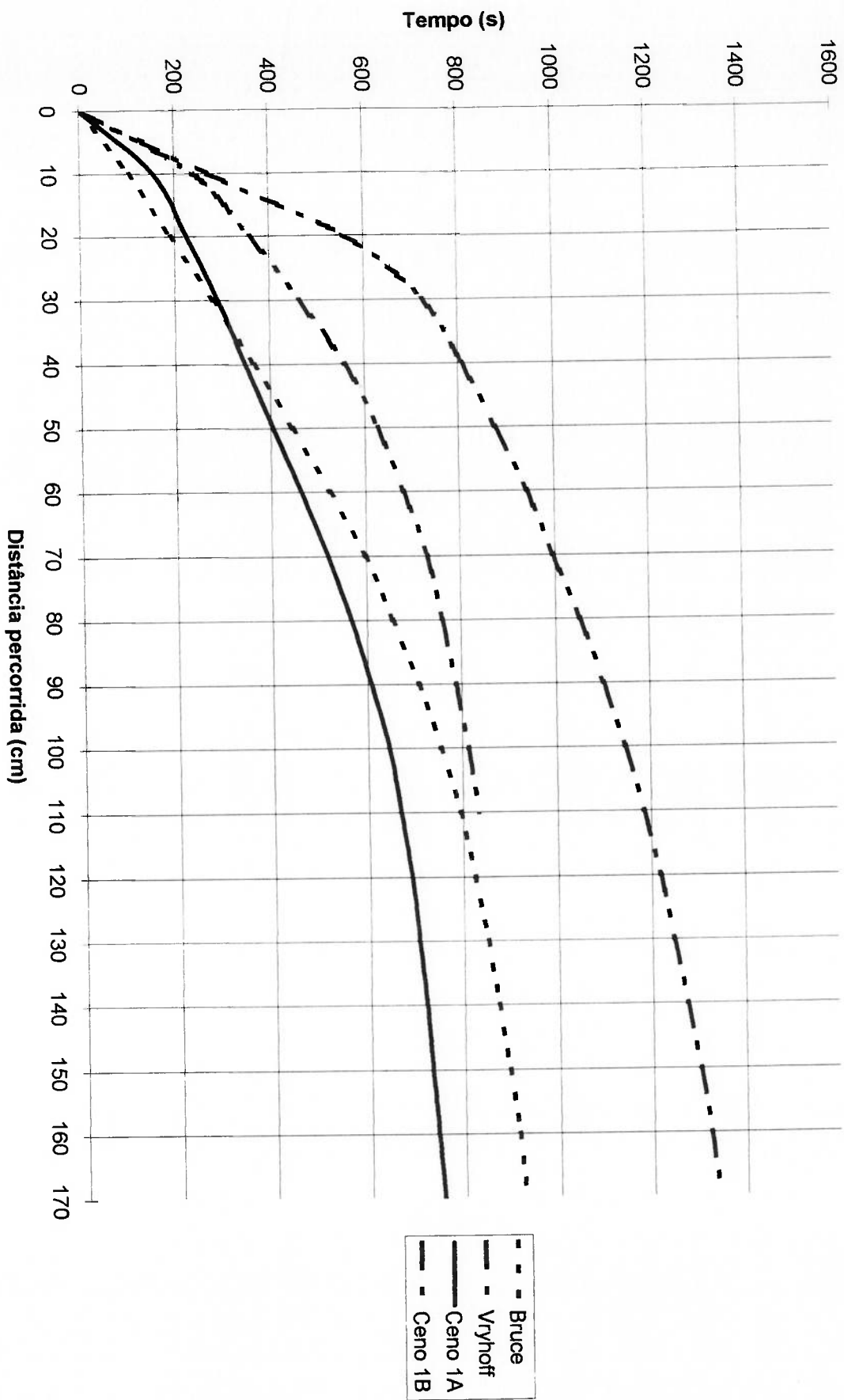


Figura 5.4 – Ensaio em Gel

Pull-Out Bruce a 90 graus (Média)

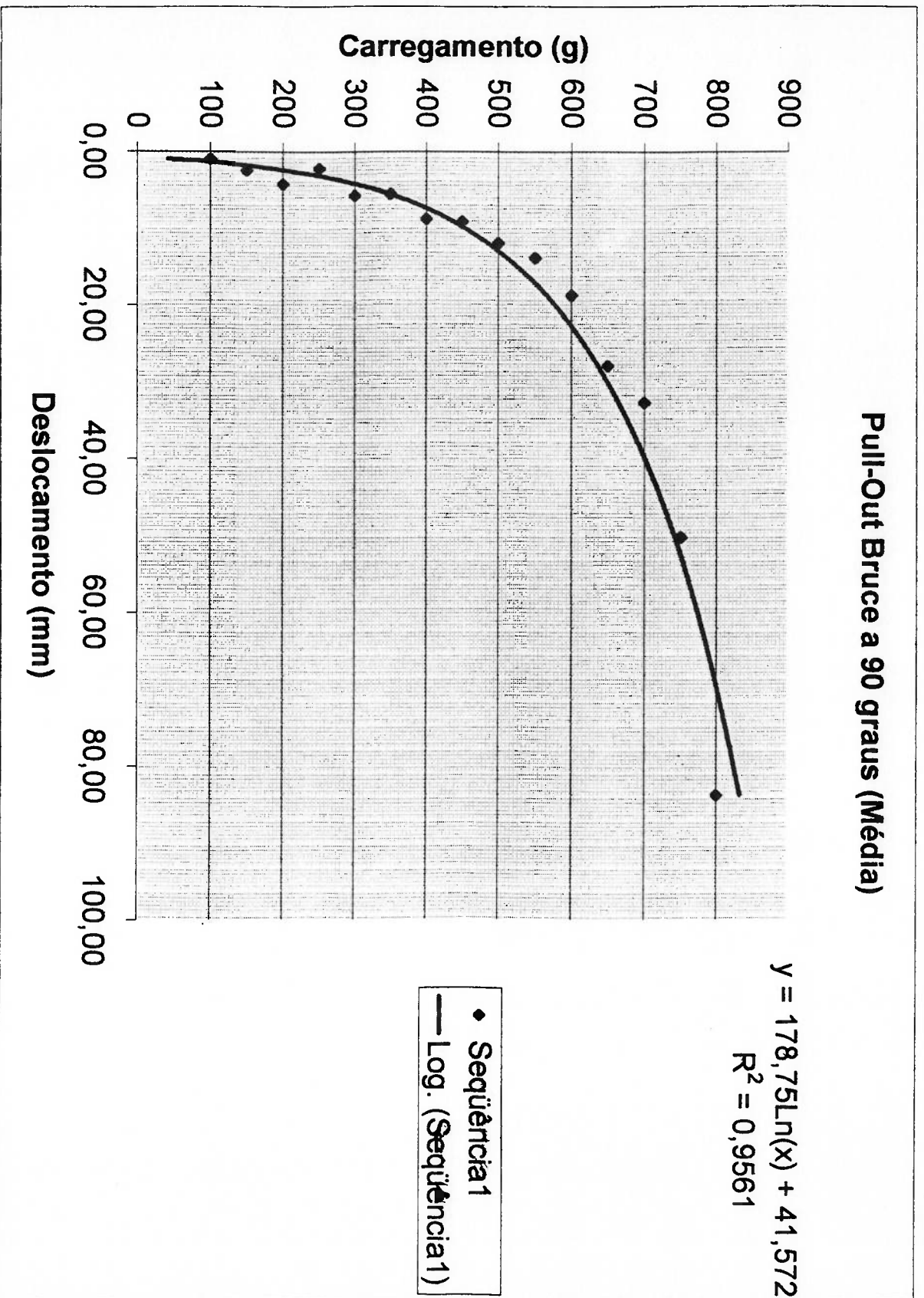


Figura 5.5 – Ensaio Típico de Arrancamento em Gel

Figura 5.6 – Curva do Módulo de Elasticidade da Lama, [20]

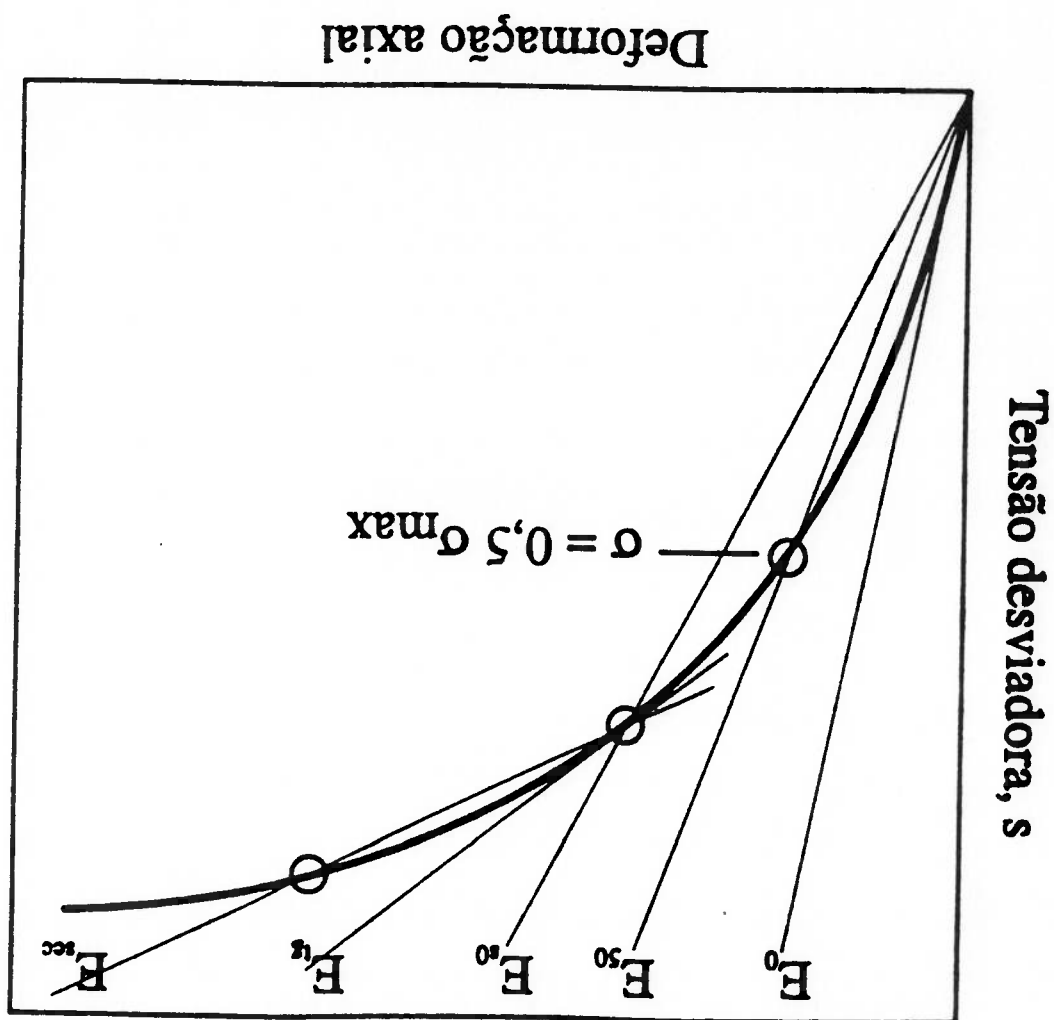
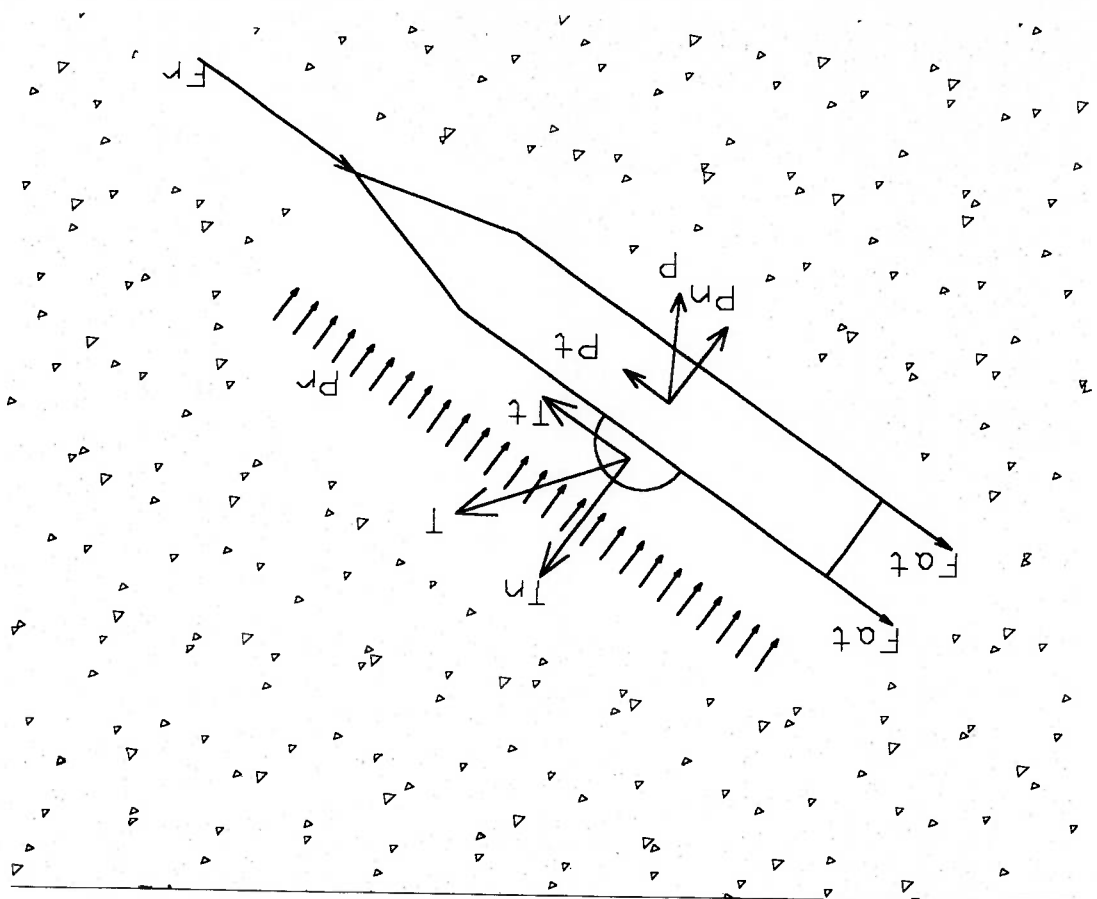


Figura 5.7 – Forças Atuantes no Processo de Cravação



uma área considerável da pata causar tensões acima das elásticas ao meio e consequentemente variando a trajetória. Então, crescendo-se T temos um maior T_n e um maior deslocamento. Está demonstrado claramente nos gráficos comparativos de cravação dos ensaios em gel que para uma mesma âncora com cargas crescentes temos um aumento do arrasto da mesma juntamente com um aumento de sua velocidade (Figura 5.8).

A transparência do gel trouxe além da visualização da trajetória, várias informações sobre o comportamento dos cabos e do processo de giro. O comportamento dos cabos é o seguinte: no início, os de ré são tensionados e conforme o giro, os cabos de vante são gradativamente tracionados finalizando o processo de giro (inclusive a inversão da concavidade da trajetória nessa região). Posteriormente, agem em conjuntos os cabos (cravação) e a seguir inicia-se a horizontalização que é notada pela perda de tensão no cabo de ré e o aumento na do cabo de vante.

O cabo de tracionamento pode ser considerado como de comprimento constante (no mar), pois conectado ao trecho da linha de peso (que é calculada de modo que no fim da cravação o último elo permaneça no solo "ou próximo"), implica que com o aumento de profundidade de cravação o ângulo de tracionamento da âncora aumenta (Figura 5.9).

Ainda com relação a Figura 5.9 vemos a catenária invertida (que também pode ser observada no gel), que juntamente com o ângulo θ forçam a horizontalização, pois a força atuante na âncora não fica mais alinhada com o eixo da haste (eixo imaginário do cabresto).

Comparativo Ensaio Bruce

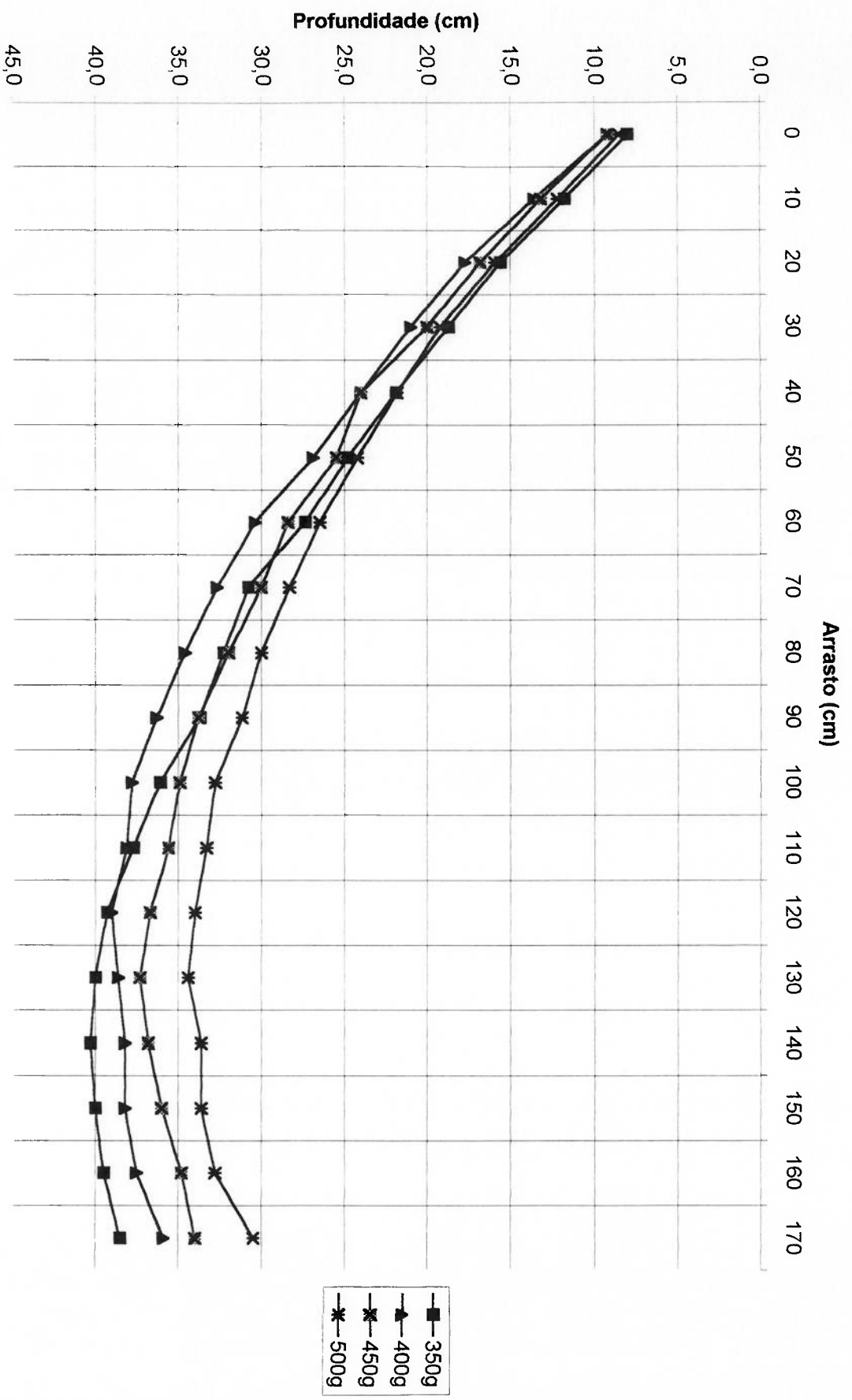


Figura 5.8 – Comparativo do Aumento do Arrasto em Função da Força de Cravação

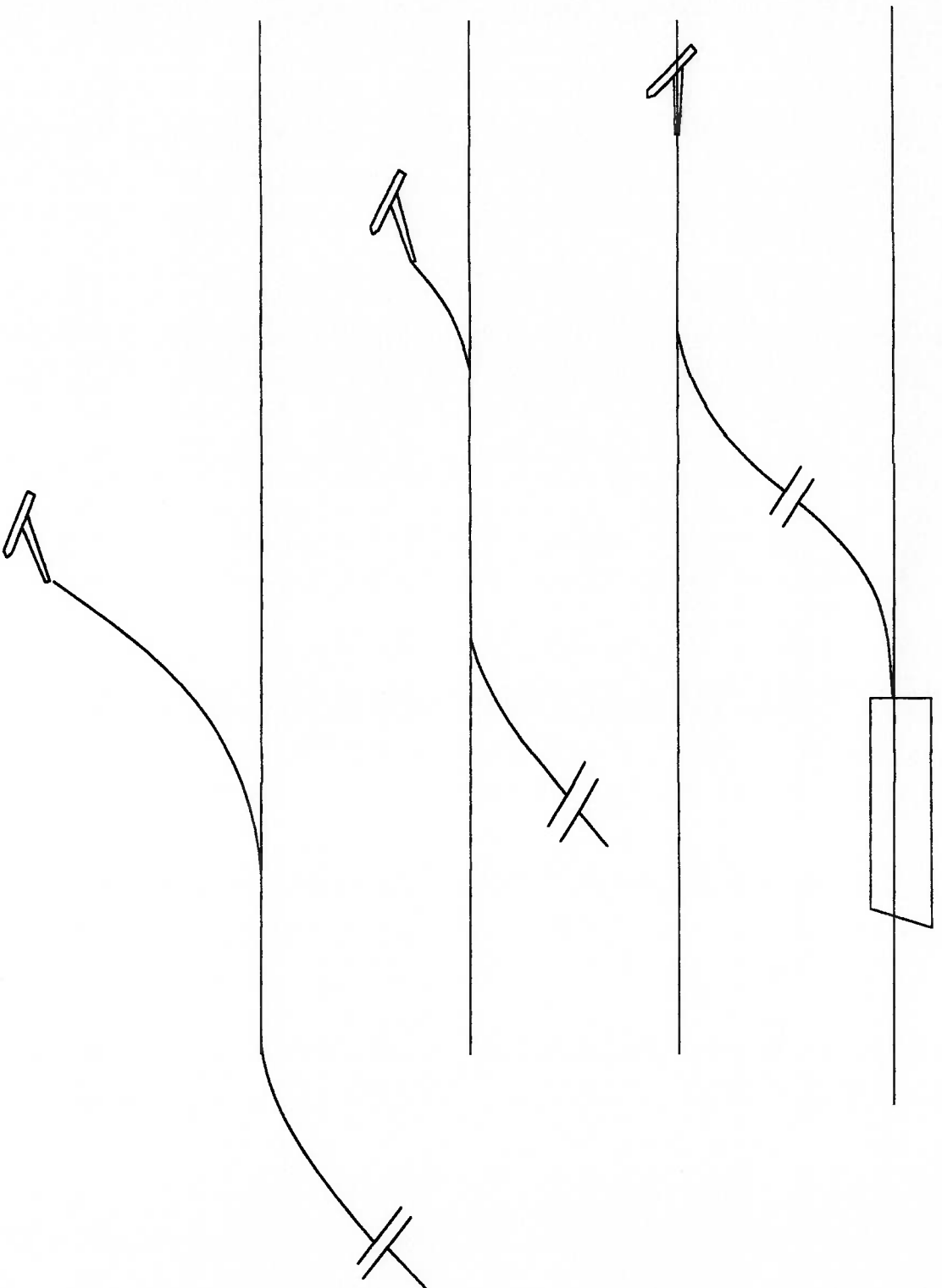


Figura 5.9 – Croquis da Mudança de Ângulo de Tracionamento

5.2 Análise Quantitativa

Sempre procura-se obter o máximo de informações em um ensaio. A ideia de obter-se valores quantitativos em um ensaio em gel é atraente por serem ensaios simples e o custo da infra-estrutura baixo. Nos ensaios realizados em gel tensionou-se o cabo com uma força constante através do porta pesos, porém, no mar tais ensaios são realizados com uma velocidade constante e com a força variável. No mar temos a tensão de cisalhamento da lama variando com a profundidade e no tanque de gel ela é constante. Então, inicialmente, podemos concluir que é impossível correlacionar forças de cravação ao longo da trajetória entre os ensaios de mar e tanque de gel. Uma agravante para o problema é que as propriedades mecânicas do gel são bem inferiores à da lama e mesmo que pudéssemos correlacioná-las, qual seria a influência nas forças de um meio de atrito viscoso com outro de atrito abrasivo? Como feito anteriormente, pode-se comparar as forças entre modelos, suas velocidades e acelerações durante um ensaio. Conclui-se que um modelo apresenta uma melhor performance que o outro, sabendo-se que os valores para o gel não podem ser extrapolados para a realidade, [20]. Extrapolar-se valores de trajetória ou do coeficiente de arrasto (“drag coefficient”) e distância de arrasto sobre profundidade de cravação, é mais uma possibilidade do tanque de gel.

A operação em mar é realizada com grandes lâminas d'água e os ensaios sem nenhuma. A influência da lâmina d'água no processo de cravação é algo a ser verificado. Sabemos de antemão que o peso da linha suspensa influenciara na tensão do cabo no guincho. Porém, se a linha se horizontalizar no fundo do mar o efeito da

Nota: Muitos valores não se têm em ensaios de mar ou mesmo não puderam ser realizados no tanque de gel. Para se obter esses valores a serem utilizados, usou-se o programa DIGIN do DNV, [19].

lâmina d'água não causará reflexos na configuração dentro da lama. Verificado tal efeito com o programa DIGIN, apresentamos os resultados de uma corrida com lâmina de 50 e 500m para uma mesma âncora e configurações de cabo que garantam sua horizontalização (várias configurações de cabo e o estudo de sua catenária foram realizados com o programa PREA da Petrobrás).

Tabela 5.1 – Variação de Arrasto em Função da Lâmina d'Água

Profundidade	0.1	
500m arrasto	1.0	1
50m arrasto	2.4	2
	4.2	3
	6.3	4
	8.9	5
	12.1	6
	16.0	7
	20.7	8
	-	

O coeficiente de arraste não é um valor constante para uma dada âncora, mas varia com a profundidade de cravação. Pode-se interpretar tal afirmativa da seguinte maneira: na fase inicial de giro o ângulo de ataque ainda é pequeno, crescendo gradativamente até a âncora atingir a fase de cravação. Nessa fase o coeficiente atinge seu mínimo, sendo praticamente constante e depois cresce novamente até atingir a fase de horizontalização por efeito da catenária invertida. A Figura 5.10 mostra tal efeito (dados obtidos nos teste em gel).

Nos ensaios em gel as cargas maiores aumentaram o arrasto pelos motivos explanados anteriormente e tal fato pode facilmente (ver-se na figura 5.11), onde compararam-se corrigindo-se as escalas, os ensaios em gel com varios testes realizados no mar. As curvas são semelhantes porém as do gel são como as do mar somadas com um

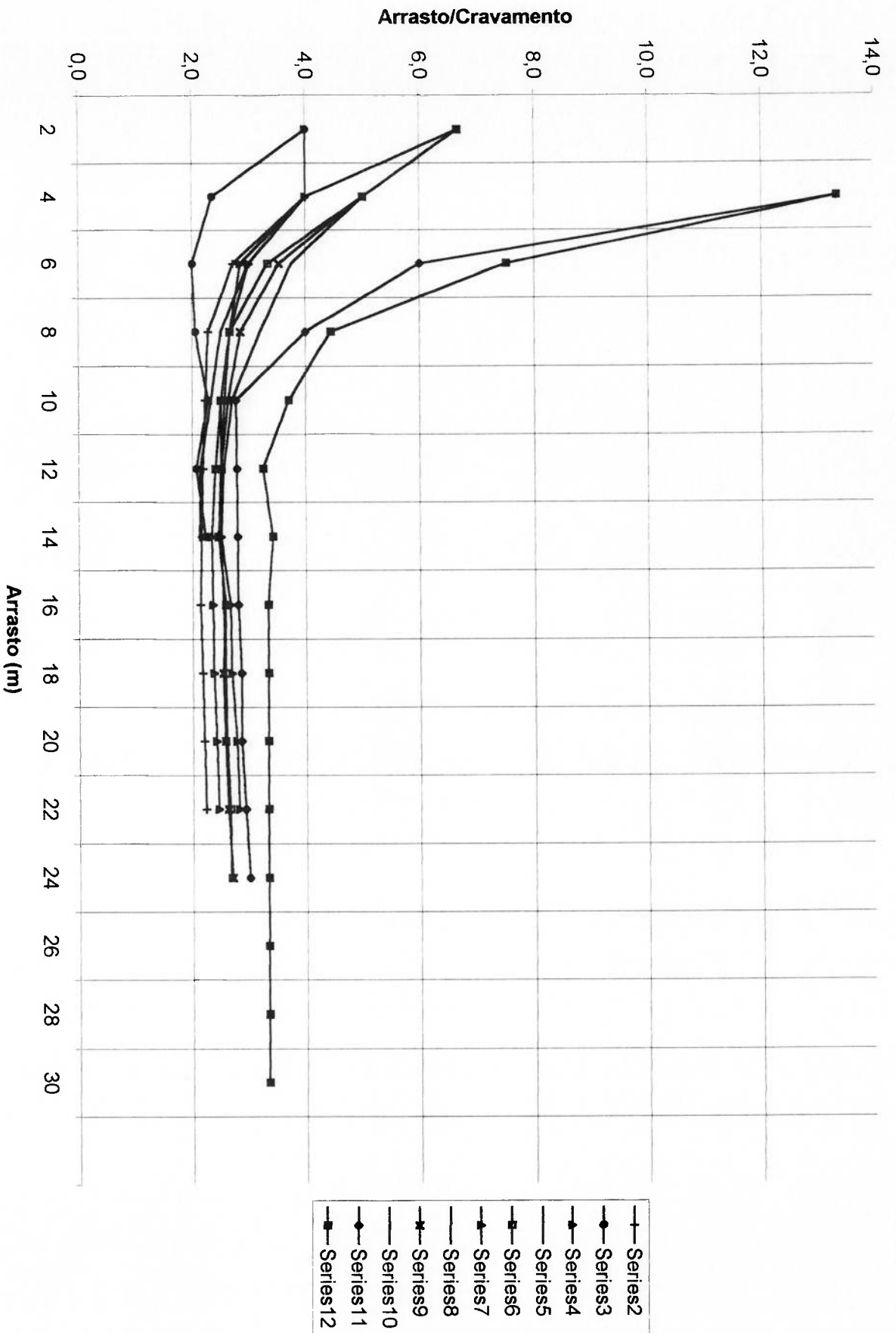


Figura 5.10 – Variação do Coeficiente de Arrasto

Comparação Ensaio Mar x Media Gel

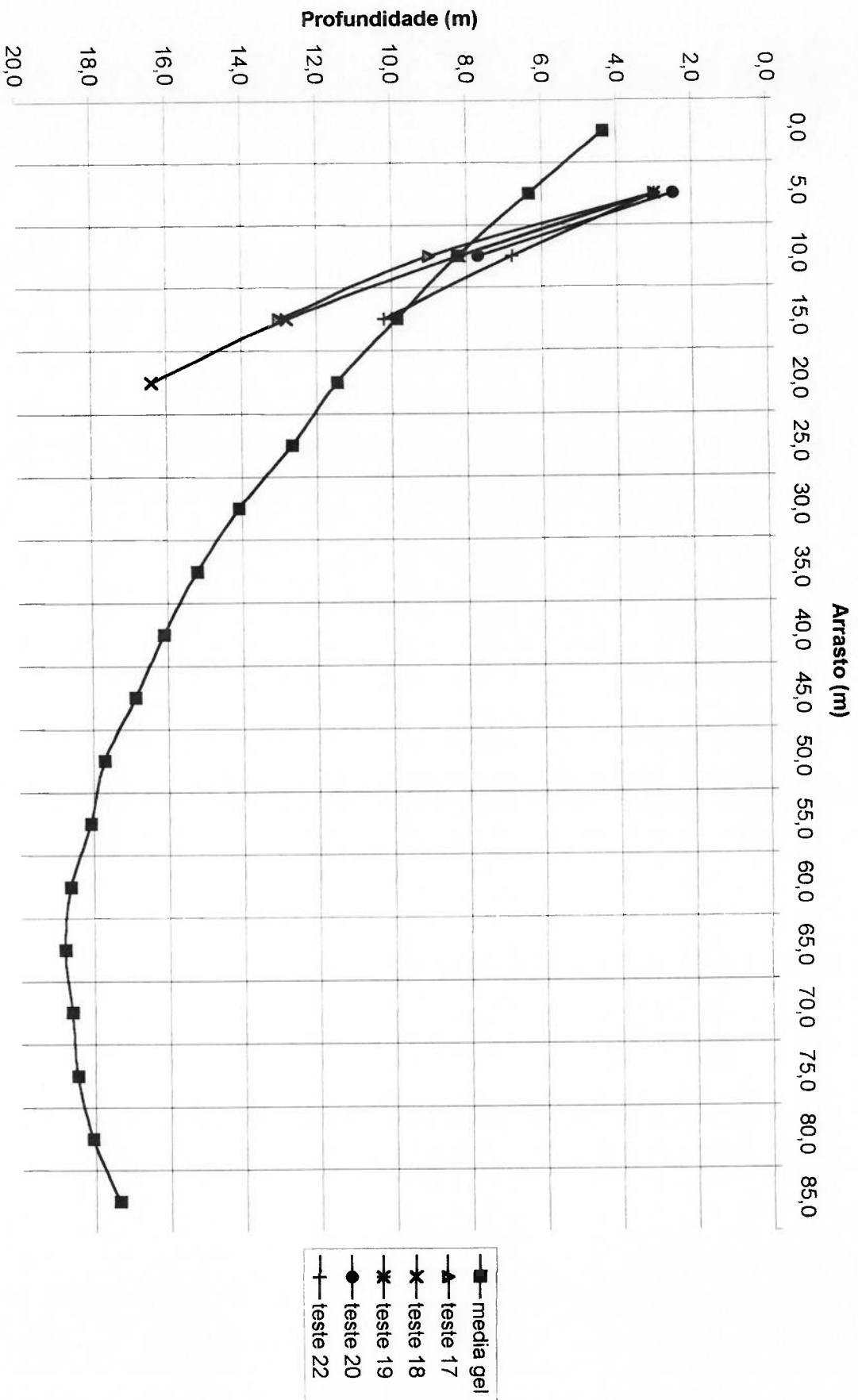


Figura 5.11 – Comparativo de Ensaio no Mar e Gel (Âncora Bruce)

“arrancamento” na horizontal. Inicialmente foram realizados alguns testes em gel (ensaios abandonados pela demora em sua execução). A Figura 5.12 apresenta os resultados destes testes comparativos com os testes realizados em mar, em Campos, RJ, de uma âncora Vryhof, [7].

Neste ponto chega-se as seguintes conclusões: testes em gel com carga constante são apenas qualitativos Os testes quase estáticos podem se pensar em extrapolar. Como corrigir as diferentes tensões de cisalhamento, sendo uniformes no tanque e variando linearmente no mar?

A partir de dados gerados pelo programa DIGIN, plotados por profundidade, obtêm-se regressões lineares simples e polinomiais com bons coeficiente de correlação, (Figuras 5.13 a 5.16)

Porém, ao querer-se uma regressão correlacionando o coeficiente de arrasto, profundidade e cisalhamento, os resultados não foram satisfatórios. Experimentaram-se funções do tipo:

$$z = A + B \cdot x + C \cdot y$$

$$z = A \cdot x \cdot B \cdot y \cdot C$$

$$z = A + B \cdot x + C \cdot \frac{x}{y}$$

$$z = A + B \cdot x + C \cdot x \cdot y$$

$$z = A + B \cdot x + C \cdot x^2 + D \cdot x^3 + E \cdot y + F \cdot y^2 + G \cdot y^3$$

$$z = A + y \cdot (B \cdot x + C \cdot x^2 + D \cdot x^3)$$

Os resultados obtidos não foram satisfatórios e os erros nos melhores ajustes ficou na ordem de 20%.

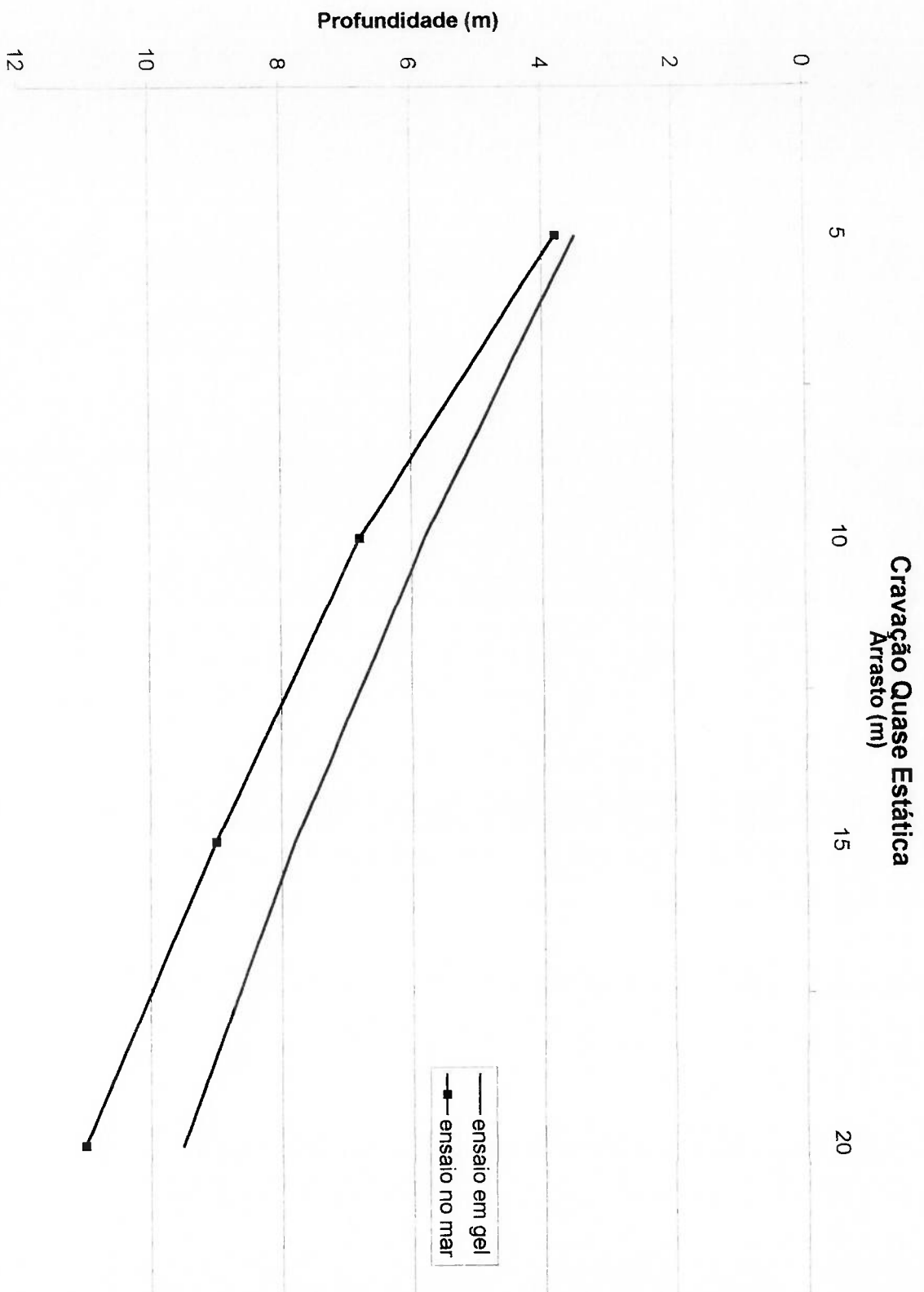


Figura 5.12 – Ensaio com a Âncora Vryhof Stevmanta

Cravação a 10m

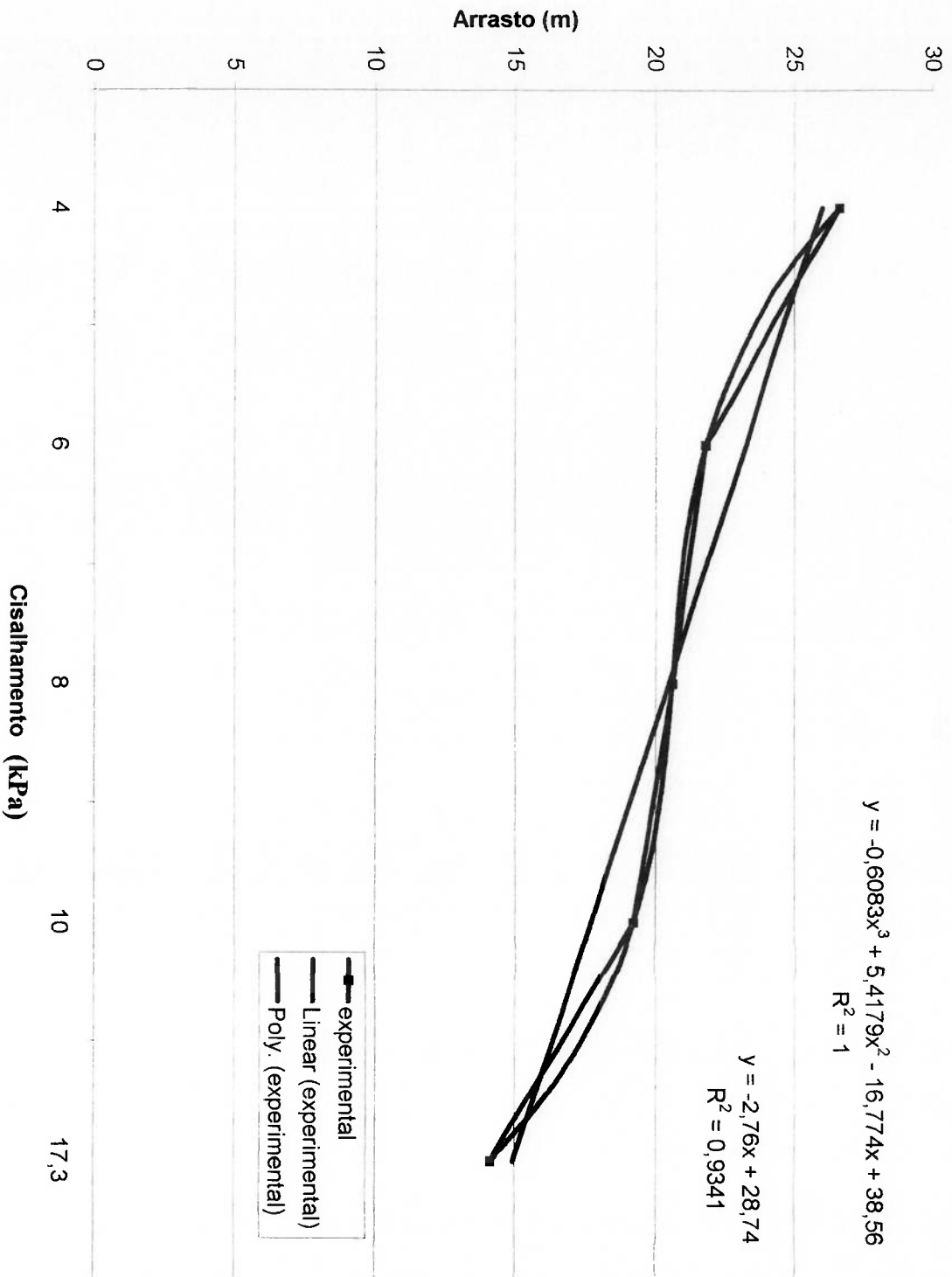


Figura 5.13 – Arraste x Cisalhamento

Cravação 9m

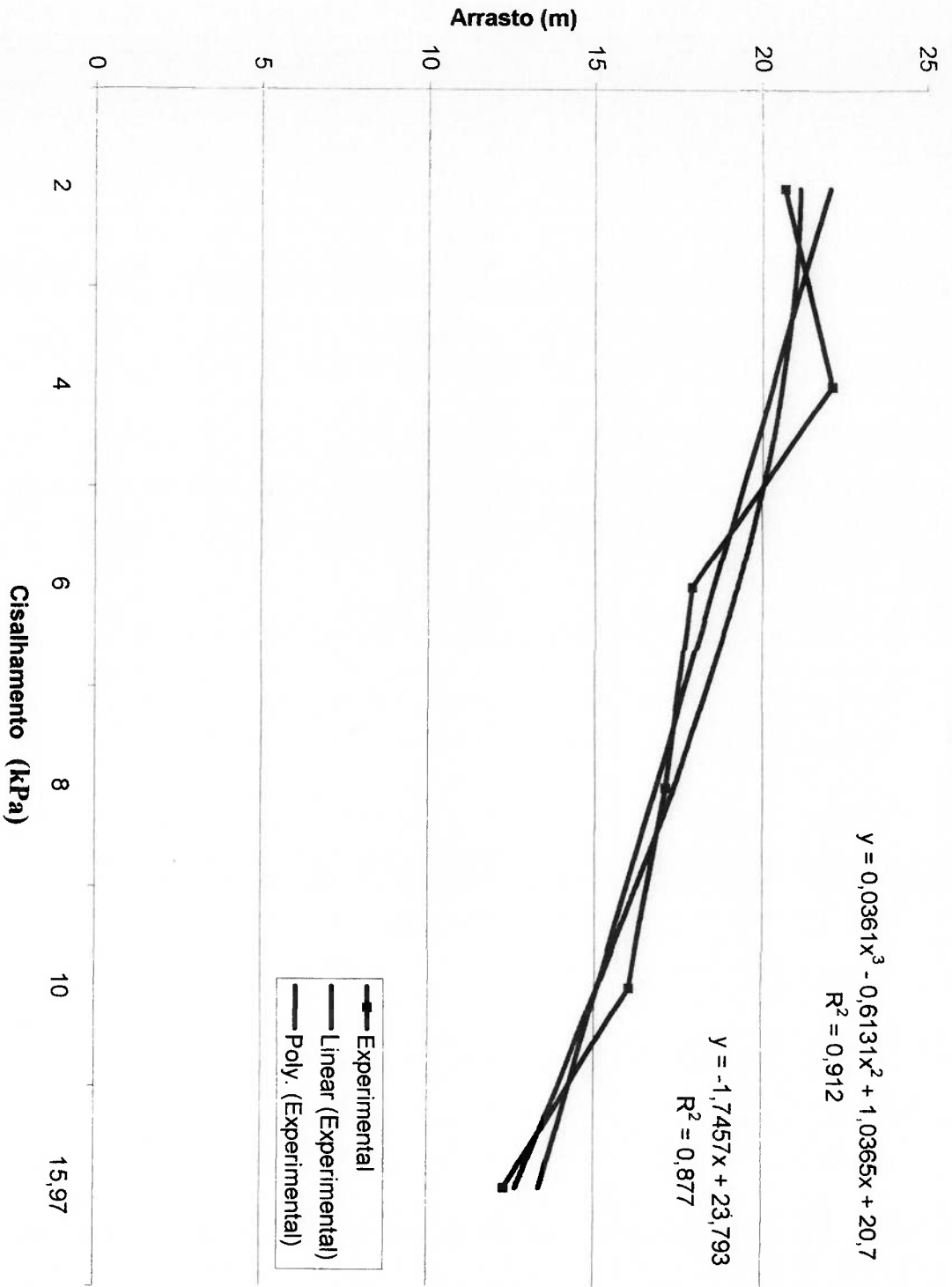


Figura 5.14 -- Arraste x Cisalhamento

Cravação a 8m

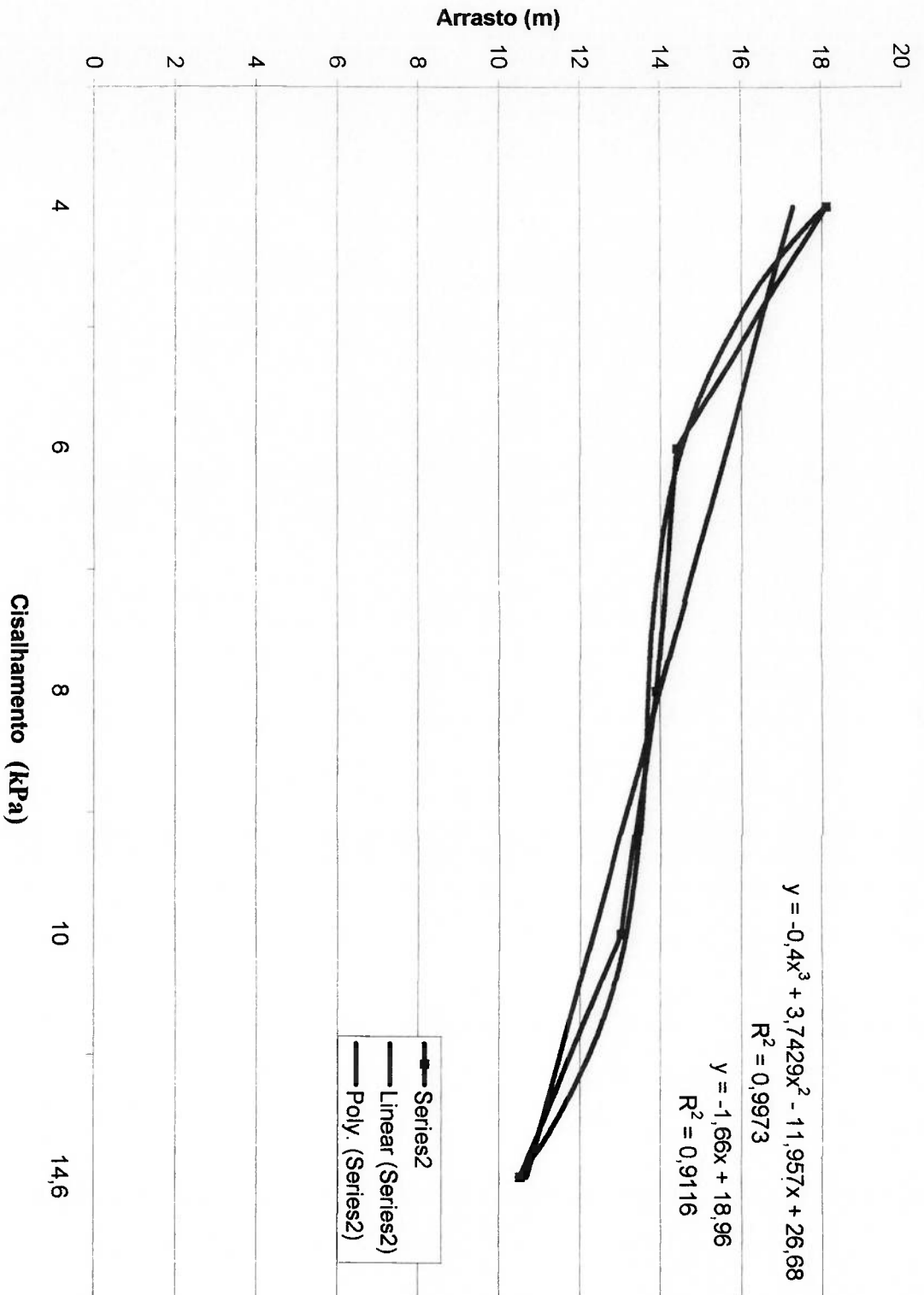


Figura 5.15 – Arraste x Cisalhamento

Cravação a 6m

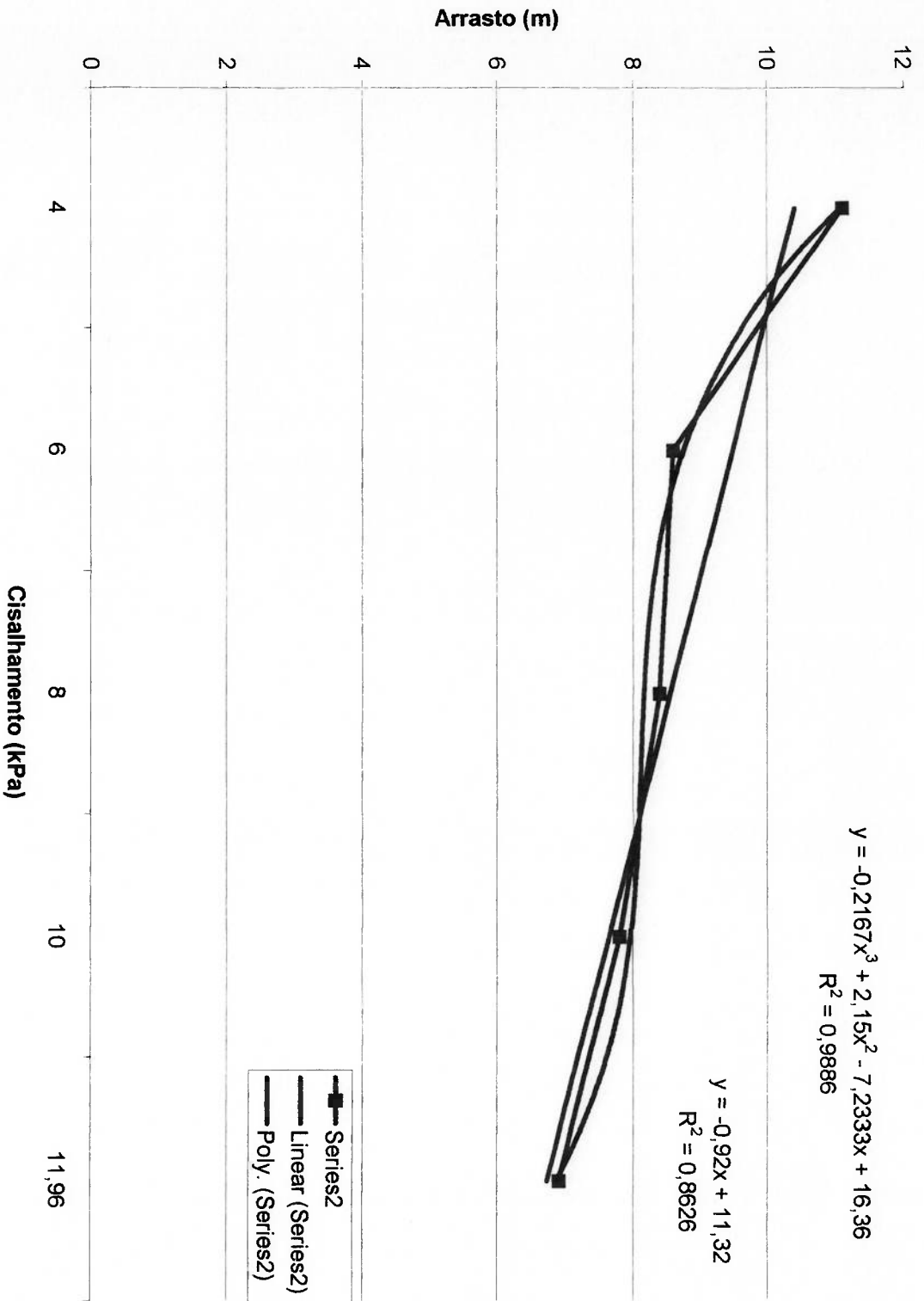


Figura 5.16 – Arraste x Cisalhamento

Finalizando, os ensaios em gel são uma ferramenta qualitativa para a verificação do comportamento da âncora em sua cravação. Os ensaios de força constante não permitem uma extrapolação nem de forças nem de distância de arraste. Os ensaios quase-estáticos permitem uma extrapolação da distância de arraste, desde que realizados com diferentes tensões de cisalhamento (isto é possível com mais de um tanque, ou então adicionando-se água ao gel após cada bateria, baixando-se sua tensão de cisalhamento). A extrapolação de tais valores deve ser feita por regressões a uma mesma profundidade e a utilização de uma regressão múltipla ainda não se mostrou viável.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os ensaios em gel mostraram-se extremamente úteis quanto a visualização do fenômeno. O gel apresenta alguns pontos favoráveis que são: transparência, módulo de elasticidade não linear (semelhante ao da lama), rápida restauração de suas propriedades e facilidade de variar suas propriedades quando do seu preparo. Os pontos desfavoráveis são: pequena resistência ao cisalhamento e atrito puramente viscoso (inexiste o de abrasão típico nas argilas e areias).

Para os ensaios de cravamento os resultados obtidos foram excelentes, a trajetória levantada nos ensaios aproximou-se muito da forma da curva real, principalmente com o aumento gradual de força (infelizmente muito demorados). O efeito do ângulo de ataque foi facilmente notado (modelos CENO A e CENO B). Cuidados devem-se tomar com a precisão em função da escala diminuta. A fase de giro inicial pode ser facilmente verificada, inclusive o fenômeno de transição de tração dos cabos nessa fase. O fenômeno da catenária invertida é totalmente visualizado. Problemas de giro ("roll") são verificados e inclusive a estabilização do giro ou o seu crescimento para cada tipo de âncora são semelhantes aos que ocorrem no mar (inclusive ângulos). Outro fenômeno visualizado é o da formação do vazio na pópa, notado principalmente no momento do início do cravamento, olhando-se por cima o evento.

Os ensaios de retenção e os deslocamentos da âncora antes do colapso do meio é um comparativo qualitativo de desempenho. Outro ponto interessante é a movimentação da âncora quando cravada irregularmente ("roll"), ângulo diferente, etc., mostrando primeiro uma movimentação à posição de carga vertical com face normal ao cabo (em uma profundidade de cravamento menor). Poderia estudar-se posições de cravamento

Finals não corretas e verificar-se quais as posições finais da mesma à uma carga vertical, estimando-se então a redução da capacidade de retenção pela variação de cota.

O gel nos permite excelente visualização do fenômeno, comparações qualitativas entre âncoras, estimativas de trajetória, porém, nenhuma extrapolação de forças para a escala real.

A extrapolação da distância de arraste é possível desde que se tomem certos cuidados (como visto no capítulo 5), devendo-se realizar a correção para o cisalhamento. A utilização de um gel com maiores valores de suas propriedades mecânicas é aconselhável caso essa extrapolação seja o objetivo.

Finalizando, conforme a literatura, a experiência dos fabricantes e experimentos no tanque de gel é uma excelente ferramenta para uma análise qualitativa do processo de cravação. Utilizado na fase de concepção da âncora permite inferir uma gama de informações sobre uma determinada geometria de pata, facilitando as fases seguintes de projeto onde apenas pequenas modificações far-se-ão necessárias. Permite de forma econômica o estudo de uma variedade de geometrias, podendo escolher-se a que apresentar melhores resultados a ser utilizada nas fases seguintes do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. MODU Code. ABS, New York, 1995.
- [2] ANSYS. Analysis guides. Ansys Inc., Canonsburg, 1994.
- [3] ANSYS. Elements reference. Ansys Inc., Canonsburg, 1994.
- [4] ANSYS. Theory reference. Ansys Inc., Canonsburg, 1994.
- [5] BATHE, K.L. *Finite elements procedures*. New Jersey, Prentice Hall, 1996.
- [6] BRAJA, M. D., GURDEV, S. Uplift capacity of plate anchors in clay. In: 4th INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Illinois University Southern Carbondale, 1994.
- [7] BRUCE ANCHOR LTD. Report on bruce anchor tracking system. Bruce Anchor Ltd, Isle of Man, 1997.
- [8] BRUCE ANCHOR LTD. Report on bruce denla MK3 10m². Bruce Anchor Ltd, Isle of Man, 1997.
- [9] CANADA, L. et al. New trends in deep water mooring. Vicinay Cadenas, Deep Water Technology, 1997.
- [10] CENO-USP. Relatório CENO RT nº 01/351. Definição das bases do projeto e da concepção da âncora. CENO/USP, São Paulo, 1998.
- [11] CENO-USP. Relatório CENO RT nº 02/351. Infra-estrutura laboratorial e especificação preliminar dos ensaios. CENO/USP, São Paulo, 1998.
- [12] CENO-USP. Relatório CENO RT nº 03-F6/351. Ensaios com modelos reduzidos em tanque de gel e tanque de lama. CENO/USP, São Paulo, 1998.
- [13] CENO-USP. Relatório CENO RT nº 03-F4/351. Análise da iteração solo âncora. CENO/USP, São Paulo, 1999.
- [14] CENO-USP. Relatório CENO RT nº 04/351. Análise estrutural de âncora de aplicação geral. CENO/USP, São Paulo, 1999.
- [15] CENO-USP. Proposta Técnica CENO nº 351/98. Desenvolvimento de projeto tecnológico de âncora de aplicação geral. CENO/USP, São Paulo, 1998.
- [16] CHIAVERINI, V. *Tecnologia mecânica*. São Paulo, MacGraw-Hill, 1978.
- [17] D'ARCANDELO, A. M. Ship design and construction. SNAME, New York, 1969.

- [18] DEGENKAMP, G.; DUTTA, A. Soil resistance to embedded anchor chain in firm clay. In: 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARTIC ENGINEERING, Vryhof Ankers BV, 1989.
- [19] DET NORSKE VERITAS. Report n.º 96-3637. Digin ver. 5.3. DNV, Hovik, 1998.
- [20] FERNANDES, A. O., TESTA, G. R., NUNES DIAS C.A., GONÇALVES E. Projeto parametrizado de âncora de carga vertical. Centro de Estruturas Navais e Oceânicas, Universidade de São Paulo, Pró-Reitoria de Pesquisa, São Paulo, 1999.
- [21] HACHICH, W. et al. *Fundações: teoria e prática*. 2ª Ed, Pini, 1998.
- [22] HWANG, Y. L. Dynamic analysis for the design of CALM system in shallow and deep waters. In: Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering, Imodco Inc., vol. 119, 1997.
- [23] KHING, K. H. et al. Uplift capacity of strip plate anchors in clay with sloping surface. In: 4th INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Southern Illinois University Carbondale, 1994.
- [24] KNUT, A. et al. Field tests of anchors in clay: Field tests of anchors in clay. In: Journal of Geotechnical Engineering, Norwegian Geotechnical Institute, vol. 119, Oslo, 1993.
- [25] KRYNINE, D. Soil mechanics 2^a Ed, MacGraw-Hill, 1947.
- [26] LARSIM, J. Stress analysis of anchor chains. Saga Petroleum AS, Novik.
- [27] LEE, M. Y. FPSO Mooring: Design and regulatory considerations. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, ABS, New York, 1997.
- [28] LEIRA, B. J. et al. Service life reliability for an anchor system subject to corrosion. Sinter Structures and Concrete, 1995OMAE/ASME1995, Trondheim, 1995.
- [29] LOHR, C. J. Augers lateral mooring system. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Shell Offshore Inc., 1996.
- [30] MANOJ, D.; SURYNARAYANA, C. V. Elimination of suction beneath plate anchors in model tests. In 4th INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Indian Institute of Technology, New Delhi, 1994.
- [31] MARTINS, R. M., BRINATTI, H. L., ANDRADE, R. M.A. Comparative study of the conventional and taut-leg mooring systems. DEN-EPUSP, OMAE 1997/ASME1997, São Paulo, 1997.

- [32] NEUBECKER, S. R. et al. A novel procedure for testing model drag anchors. In: 7th INTERNATIONAL AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Univ. of Western Australia, 1997.
- [33] NEUBECKER, S. R., RANDOLPH, M. F. The static equilibrium of drag anchors in sand. Univ. of Western Australia, South Perth, 1995.
- [34] NEUBECKER, S. R., RANDOLPH, M. F. The kinematic behaviour of drag anchors and chain system in cohesive soils. Univ. of Western Australia, South Perth, Marine Geosources and Geotechnology 14:77, 1996.
- [35] NEUBECKER, S. R., RANDOLPH, M. F. The performance of drag anchors and chain system in cohesive soils. Univ. of Western Australia, South Perth, Engineering, Norwegian Geotechnical Institute vol. 119, Oslo, 1993.
- [36] RUNE, D. et al. Field tests of anchors in clay. In: Journal of Geotechnical Engineering, Norwegian Geotechnical Institute vol. 119, Oslo, 1993.
- [37] SHIN, E.C. et al. Mud suction force in the uplift of late anchors in clay. In: 4th INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Southern Illinois University, Carbondale, 1994.
- [38] SPOTTS, M. F.; SHoup, T. E. **Design of machine elements**. 7th Ed., New Jersey, Prentice Hall, 1997.
- [39] VRYHOF ANKERS B. V. Anchor manual. Vryhof, Krimpen ad Yssel, 1990.
- [40] VRYHOF ANKERS B. V. Mooring components. Vryhof, Krimpen ad Yssel, 1998.
- [41] VRYHOF ANKERS B. V. Stevanta VLA anchor. Vryhof, Krimpen ad Yssel, 1998.
- [42] VRYHOF ANKERS B. V. Stevpris MK5 anchor. Vryhof, Krimpen ad Yssel, 1998.
- [43] VRYHOF ANKERS B. V. Dimensioning of STEVMANTA anchor for P27. Vryhof, Krimpen ad Yssel, 1997.
- [44] Xerox partial Report (sem número), University Houston, Houston, 1991.

RESULTADOS DO PROGRAMA DIGIN

APÊNDICE 1

```
#####  
##      ##      ##      ##      ##      ##  
##      ##      ##      ##      ##      ##  
##      ##      ##      ##      ##      ##  
##      ##      ##      ##      ##      ##  
#####
```

Penetration behaviour of deep embedment anchors

```
Version 5.3      :      20 April 1998  
Licence         :      Petrobras  
Programmed by  :      Det Norske Veritas AS  
                 Veritasv. 1  
                 N-1322 Høvik  
                 Norway  
                 Section for Risers, Mooring  
                 and Foundations  
Units: m, kN, deg
```

JIP Deep Water Anchors
DIGIN manual, Example 2
Plate anchor in clay

Date :02/06/99
Time :11:15:24

Analysis responsible : PJS

Echo of input :

Water depth : 500.0 m
Airgap : .0 m

Soil description

Number of depths : 3

Depth [m]	Su [kN/m2]	Sr [kN/m2]	Gam [kN/m3]
.00	10.00	10.00	16.50
4.53	10.00	10.00	16.50
30.00	43.80	43.80	16.50

Line

Configuration: Total anchor line up to vessel

Pull scenario: Pull from winch
Constant horizontal distance to anchor : 1000.000

Point weights : 0

Number of line segments : 3

No.	Length [m]	Type	Diam. [m]	Width [m]	Circum. [m]	Weight _{air} [kN/m]	Weight _{sub} [kN/m]	EA [kN]	dL(water) [m]	dL(soil) [m]
1	220.00	1	.086	.086	.269	.387	.310	.404E+06	10.00	.343
2	490.00	2	.076	.191	.861	1.303	1.134	.511E+06	10.00	.305
3	1100.00	1	.086	.086	.269	.387	.310	.404E+06	10.00	.343

Depths

Range : .00 -10.00 m
Step : NA

Anchor

Anchor type: Drag embedment
Anchor name: CEN01
Fluke/Shank angle before scaling: 50.06 (Connection/Back/Tip)

Fluke mode allowed : Restraint + Failure if restraint not found

Line connection:

X = 3.55
Z = 4.24
Grp : 2

Anchor tip:

X = 3.80
Z = .00
Grp : 1

Anchor back:

X = .00
Z = .00
Grp : 1

Weight data:

W = 63.80 kN
COG X = 1.65
Z = .51

Anchor groups: 2

No.	Definition
1	Fluke

2 Shanck

Anchor members: 6

No.	Group	Nodes	Cross section Side Front	shape F.Area	X	Y	Z
-----	-------	-------	-----------------------------	-----------------	---	---	---

1	1	4	1	2	.070	.47	-.40	.00
					2.47	-.19	.00	
					3.80	-1.00	-.25	
					.00	-1.14	-.25	

Note: Coordinate direction changed compared to input

2	1	4	1	2	.070	.47	.40	.00
					2.47	.19	.00	
					3.80	1.00	-.25	
					.00	1.14	-.25	

Note: Coordinate direction changed compared to input

3	2	10	1	1	.620	1.37	.00	.23
					1.64	.00	.96	
					2.68	.00	2.91	
					3.29	.00	3.94	
					3.49	.00	4.34	
					3.69	.00	4.26	
					3.58	.00	4.02	
					1.99	.00	.53	
					1.69	.00	.09	
					1.56	.00	.22	

4	1	4	1	1	.000	.47	-.40	.00
					.47	.40	.00	
					2.47	.19	.00	
					2.47	-.19	.00	

Note: Coordinate direction changed compared to input

5	1	4	1	1	.000	.00	-1.14	-.25
					3.80	-1.00	-.25	
					2.39	-1.83	-.98	
					.38	-1.83	-.98	

.1	776	50.3	496	.0	408	.0	404	3.0	123.0	123.0	875	309	4	622	685	309	4
.2	789	50.1	506	.0	425	.0	415	12.2	111.0	111.0	880	295	11	624	692	295	11
2.1	830	49.3	541	.0	477	.0	463	16.3	106.0	106.0	897	268	16	629	712	268	16
5.1	878	48.5	582	.0	540	.0	522	18.9	104.0	104.0	917	236	21	636	736	236	20
8.8	929	47.6	626	.0	606	.0	584	20.8	103.0	103.0	937	205	25	643	760	205	24
13.0	989	46.7	679	.0	672	.0	647	22.1	102.0	102.0	1019	110	29	652	846	110	28
17.5	1055	45.5	740	.0	740	.0	712	23.3	101.0	101.0	1115	0	33	663	950	0	32
22.4	1126	44.3	807	.0	807	.0	780	24.5	101.0	101.0	1105	0	31	675	946	0	30
27.6	1187	43.5	864	.0	864	.0	837	26.2	98.0	98.0	1096	0	31	684	941	0	30
33.5	1275	42.4	948	.0	948	.0	920	27.8	99.0	99.0	1085	0	31	695	935	0	30
40.2	3213	90.0	2821	90.0	2821	90.0	2818	90.0	.0	90.0	500	0	8	1305	0	0	28
46.0																	

SUMMARY OF ANCHOR PERFORMANCE :

Depth	Anchor tension		Resistance contributions decomposed in pull direction								Restraint	
	TA	AngA	%tip	%slide	%weight	%Fluke	%bearing	%NF	%NF	%NF	%NF	
.1	404	3.0	17.3	55.0	.8	26.8	.0	15	78			
1.0	415	12.2	17.8	56.8	3.2	22.2	.0	12	77			
2.0	463	16.3	16.5	58.1	3.9	21.5	.0	12	77			

3.0	522	18.9	15.6	57.4	3.9	23.0	.0	13	80
4.0	584	20.8	15.1	56.0	3.9	25.0	.0	14	85
5.0	647	22.1	15.0	55.3	3.7	26.0	.0	14	74
6.0	712	23.3	15.0	54.6	3.5	26.9	.0	15	78
7.0	780	24.5	14.7	52.9	3.4	29.1	.0	16	79
8.0	837	26.2	15.1	54.2	3.4	27.3	.0	15	78
9.0	920	27.8	14.3	50.7	3.2	31.7	.0	17	85
10.0	967	29.6	15.1	53.2	3.3	28.5	.0	16	79
8.4	2818	90.0	.0	.0	2.3	97.7	.0	100	100

DEFINITION OF LISTED PARAMETERS:

Depth : Depth of anchor attachment point (shackle pin) [m]
TF : Tension at fairlead (upper end of mooring line) [kN]
TTD : Tension at touch down point [kN]
TDD : Tension at dip down point [kN]
TA : Tension at anchor attachment point [kN]
AngF : Line angle at fairlead (from horizontal) [deg]
AngTD : Line angle at touch down point (from hor.) [deg]
AngDD : Line angle at dip down point (from hor.) [deg]
AngA : Line angle at anchor attachment point (from hor.) [deg]
AngD : Penetration direction of anchor (from vertical) [deg]
AngO : Fluke orientation (from ver.) [deg]
LS : Length of suspended anchor line [m]
LM : Length of anchor line on seabed [m]
LE : Length of anchor line embedded in soil [m]
LP : Length of anchor line pulled in on pulling device [m]
DS : Distance of suspended anchor line [m]
DM : Distance of anchor line on seabed = LM [m]
DE : Distance of anchor line embedded in soil [m]
DP : Dragging distance of anchor from seabed intercept [m]
%tip : Tip resistance in percent of TA [%]
%slide : Sliding resistance in percent of TA [%]
%weight : Anchor weight in percent of TA [%]
%normal : Normal resistance in percent of TA [%]

```

%intern      : Normal resistance on members not defined as fluke      [%]
              (e.g. internal forces) in percent of TA
%Nfluke      : Restraint (normal resistance) on fluke members      [%]
%NF          : Mobilized normal stresses on fluke in percent of
              maximum normal stresses on fluke                    [%]
%|N|F       : Mobilized normal stresses (absolute value) on fluke
              in percent of maximum normal stresses on fluke      [%]

```

Program completed at Time :11:18:11

TABELAS COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS

APÊNDICE 2

Tabela A2.1 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo BRUCE em Gel

Tipo: Bruce		Carregamento: 350g	
Comprimento cabo de ré: Haste			
Comprimento cabo de frente: Haste			
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	8.0	
10	102	11.8	1.049
20	190	15.6	1.216
30	280	18.7	1.163
40	366	21.9	1.221
50	445	24.8	1.318
60	523	27.4	1.325
70	597	30.8	1.427
80	654	32.3	1.774
90	709	33.7	1.836
100	754	36.1	2.285
110	795	37.7	2.470
120	824	39.3	3.492
130	850	40.0	3.856
140	872	40.3	4.547
150	893	40.0	4.764
160	912	39.5	5.270
170	926	38.5	7.178

Tabela A2.2 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Bruce em Gel

Tipo: Bruce		Carregamento: 400g	
Comprimento cabo de ré: Haste		Comprimento cabo de frente: Haste	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	9.2	
10	90	13.6	1.214
20	162	17.7	1.501
30	209	21.0	2.241
40	240	24.0	3.368
50	265	26.9	4.165
60	282	30.4	6.232
70	295	32.7	7.893
80	310	34.6	6.786
90	322	36.3	8.453
100	333	37.8	9.193
110	339	38.1	16.674
120	346	39.0	14.343
130	351	38.6	20.016
140	356	38.2	20.016
150	359	38.2	33.333
160	363	37.5	25.061
170	367	35.9	25.318

Tabela A2.3 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Bruce em Gel

Tipo: Bruce		Carregamento: 450g	
Comprimento cabo de ré: Haste			
Comprimento cabo de frente: Haste			
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y (mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	9.2	
10	40	13.2	2.693
20	70	16.8	3.543
30	91	20.0	5.000
40	105	24.0	7.693
50	115	25.5	10.112
60	124	28.4	11.569
70	131	30.0	14.467
80	137	32.0	16.997
90	143	33.8	16.935
100	150	34.9	14.372
110	155	35.6	20.049
120	158	36.7	33.534
130	162	37.3	25.045
140	165	36.8	33.375
150	167	36.0	50.160
160	170	34.8	33.572
170	172	34.0	50.160

Tabela A2.4 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Bruce em Gel

Tipo: Bruce	Carregamento: 500g	Comprimento cabo de ré: Haste		Comprimento cabo de frente: Haste	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)		
0	0	8.5			
10	20	12.2	5.331		
20	42	15.9	4.847		
30	61	19.2	5.542		
40	72	21.8	9.393		
50	82	24.2	10.284		
60	88	26.5	17.102		
70	93	28.3	20.321		
80	98	30.0	20.287		
90	102	31.2	25.179		
100	106	32.8	25.318		
110	109	33.3	33.375		
120	112	34.0	33.415		
130	114	34.4	50.040		
140	117	33.6	33.440		
150	119	33.6	50.000		
160	121	32.8	50.160		
170	123	30.5	51.305		

Tabela A2.5 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Vryhof em Gel

Tipo: Vryhof		Carregamento: 350g	
Comprimento cabo de ré: 102 mm		Comprimento cabo de frente: 79 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	8.0	
10	268	12.6	0.411
20	555	16.0	0.368
30	724	19.2	0.621
40	807	22.6	1.273
50	876	24.7	1.481
60	941	27.0	1.579
70	994	29.0	1.924
80	1051	30.9	1.786
90	1100	32.5	2.067
100	1145	34.2	2.254
110	1183	34.8	2.636
120	1218	35.7	2.869
130	1245	36.3	3.710
140	1273	36.0	3.573
150	1300	35.7	3.705
160	1322	34.6	4.573
170	1340	32.8	5.645

Tabela A2.6- Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Vryhof em Gel

Tipo: Vryhof		Carregamento: 400g	
Comprimento cabo de ré: 102 mm			
Comprimento cabo de frente: 79 mm			
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	6.5	
10	73	11.0	1.502
20	166	14.5	1.139
30	223	17.6	1.837
40	256	20.0	3.116
50	285	22.6	3.563
60	308	24.7	4.443
70	328	26.9	5.120
80	347	28.6	5.339
90	365	30.1	5.618
100	385	31.2	5.030
110	400	32.0	6.688
120	419	32.7	5.276
130	431	33.1	8.340
140	445	32.9	7.144
150	456	32.5	9.098
160	465	31.5	11.167
170	474	29.8	11.271

Tabela A2.7 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Vryhof em Gel

Tipo: Vryhof		Carregamento: 450g	
Comprimento cabo de ré: 102 mm		Comprimento cabo de frente: 79 mm	
Deslocamento X (cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y (mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	7.0	
10	38	11.5	2.886
20	83	14.6	2.327
30	117	17.1	3.032
40	137	19.8	5.179
50	150	21.8	7.845
60	163	23.5	7.803
70	172	25.6	11.353
80	184	27.5	8.482
90	194	28.7	10.072
100	203	29.5	11.147
110	210	30.6	14.372
120	217	31.0	14.297
130	224	31.2	14.289
140	231	31.3	14.286
150	236	30.7	20.036
160	241	30.0	20.049
170	246	28.3	20.287

Tabela A2.8 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Vryhof em Gel

Tipo: Vryhof		Carregamento: 500g	
Comprimento cabo de ré: 102 mm		Comprimento cabo de frente: 79 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	7.3	
10	17	10.9	6.252
20	33	13.5	6.458
30	50	16.0	6.063
40	60	18.7	10.358
50	66	20.0	16.807
60	74	22.1	12.773
70	80	23.0	16.734
80	85	24.9	20.358
90	90	26.3	20.195
100	94	27.4	25.151
110	98	27.9	25.031
120	102	28.1	25.005
130	106	28.4	25.011
140	109	28.5	33.335
150	112	28.0	33.375
160	115	27.2	33.440
170	118	25.6	33.757

Tabela A2.9 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-A em Gel

Tipo: Ceno-A		Carregamento: 350g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm			
Comprimento cabo de vante: 69 mm			
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	6.0	
10	155	10.0	0.695
20	225	14.0	1.539
30	289	18.0	1.683
40	347	21.0	1.800
50	404	24.5	1.859
60	462	26.5	1.758
70	517	29.0	1.874
80	565	30.5	2.107
90	607	32.0	2.408
100	644	34.0	2.756
110	668	34.5	2.945
120	690	36.0	4.596
130	705	35.5	6.675
140	719	35.5	7.143
150	730	35.5	9.091
160	742	34.5	8.375
170	753	33.5	9.136

Tabela A2.10 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-A em Gel

Tipo: Ceno-A		Carregamento: 400g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 69 mm	
Deslocamento X (cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y (mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	7.0	
10	56	10.7	1.904
20	85	15.0	3.754
30	106	18.2	5.000
40	128	21.2	4.746
50	148	23.9	5.179
60	170	27.0	4.759
70	193	29.5	4.482
80	208	31.1	6.751
90	225	32.8	5.967
100	238	33.2	7.698
110	247	34.8	11.252
120	256	34.8	11.111
130	263	34.8	14.286
140	270	34.0	14.331
150	275	33.7	20.009
160	280	31.9	20.321
170	285	29.8	20.436

Tabela A2.11 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-A em Gel

Tipo: Ceno-A		Carregamento: 450g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 69 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	7.5	
10	29	11.0	3.653
20	49	14.8	5.349
30	62	18.1	8.100
40	71	20.7	11.481
50	80	23.2	11.453
60	88	25.2	12.748
70	96	26.3	12.575
80	102	27.7	16.829
90	108	28.8	16.767
100	114	30.0	16.786
110	118	30.5	25.031
120	124	30.7	16.670
130	129	30.7	20.000
140	133	30.5	25.005
150	137	30.4	25.001
160	140	29.5	33.468
170	142	27.5	50.990

Tabela A2.12 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-A em Gel

Tipo: Ceno-A		Carregamento: 500g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 69 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	7.5	
10	11	11.0	9.632
20	24	13.7	7.968
30	32	16.0	12.826
40	38	18.5	17.180
50	42	20.7	25.598
60	46	22.1	25.244
70	49	23.8	33.812
80	53	25.7	25.447
90	55	26.2	50.062
100	59	27.5	25.210
110	62	28.2	33.415
120	65	29.0	33.440
130	68	29.5	33.375
140	71	29.5	33.333
150	73	29.5	50.000
160	75	29.2	50.022
170	77	26.5	51.790

Tabela A2.13 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-B em Gel

Tipo: Ceno-B		Carregamento: 350g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 73 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	10.0	
10	237	14.3	0.459
20	358	18.8	0.906
30	460	22.4	1.042
40	557	25.9	1.092
50	626	29.0	1.517
60	680	32.2	1.944
70	729	35.3	2.137
80	760	36.7	3.257
90	787	38.5	3.763
100	813	40.4	3.915
110	833	41.5	5.030

OBS: Tocou o fundo em 115 e parou em 130.

Tabela A2.14 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-B em Gel

Tipo: Ceno-B		Carregamento: 400g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 73 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	77	-
10	188	127	0.595
20	293	175	0.056
30	346	212	2.012
40	407	243	1.716
50	456	271	2.119
60	494	305	2.780
70	524	350	3.436
80	543	360	5.495
90	561	382	5.688
100	575	405	7.329
110	585	415	10.050

OBS: Tocou o fundo em 115 e parou em 130.

Tabela A2.15 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-B em Gel

Tipo: Ceno-B		Carregamento: 450g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 73 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	7.9	
10	84	12.9	1.331
20	161	17.5	1.430
30	191	21.2	3.554
40	217	24.4	4.038
50	236	27.0	5.438
60	255	30.2	5.526
70	271	32.5	6.413
80	283	34.7	8.533
90	294	36.9	9.308
100	302	38.7	12.701
110	308	39.7	16.750
120	313	40.3	20.036
130	319	40.5	16.670
140	323	41.0	25.031
150	327	39.5	25.280
160	330	37.5	33.993
170	334	36.8	25.061

Tabela A2.16 - Resultados do Ensaio de Cravação para o Modelo Ceno-B em Gel

Tipo: Ceno-B		Carregamento: 500g	
Comprimento cabo de ré: 108 mm		Comprimento cabo de frente: 73 mm	
Deslocamento X(cm)	Tempo total (s)	Profundidade Y(mm)	Velocidade (mm/s)
0	0	6,9	
10	37	11,5	2.975
20	83	16,0	2.384
30	103	19,9	5.367
40	115	23,0	8.725
50	125	26,2	10.500
60	134	29,1	11.569
70	143	32,2	11.633
80	151	33,5	12.605
90	157	35,1	16.879
100	163	36,8	16.906
110	167	37,1	25.011
120	171	37,7	25.045
130	174	37,9	33.340
140	177	37,9	33.333
150	179	37,3	50.090
160	182	35,4	33.930
170	184	33,5	50.894

FIGURAS DA REFERÊNCIA [20]

APÊNDICE 3

Figura A3.1 – Esquema do Procedimento de Instalação de uma VLA

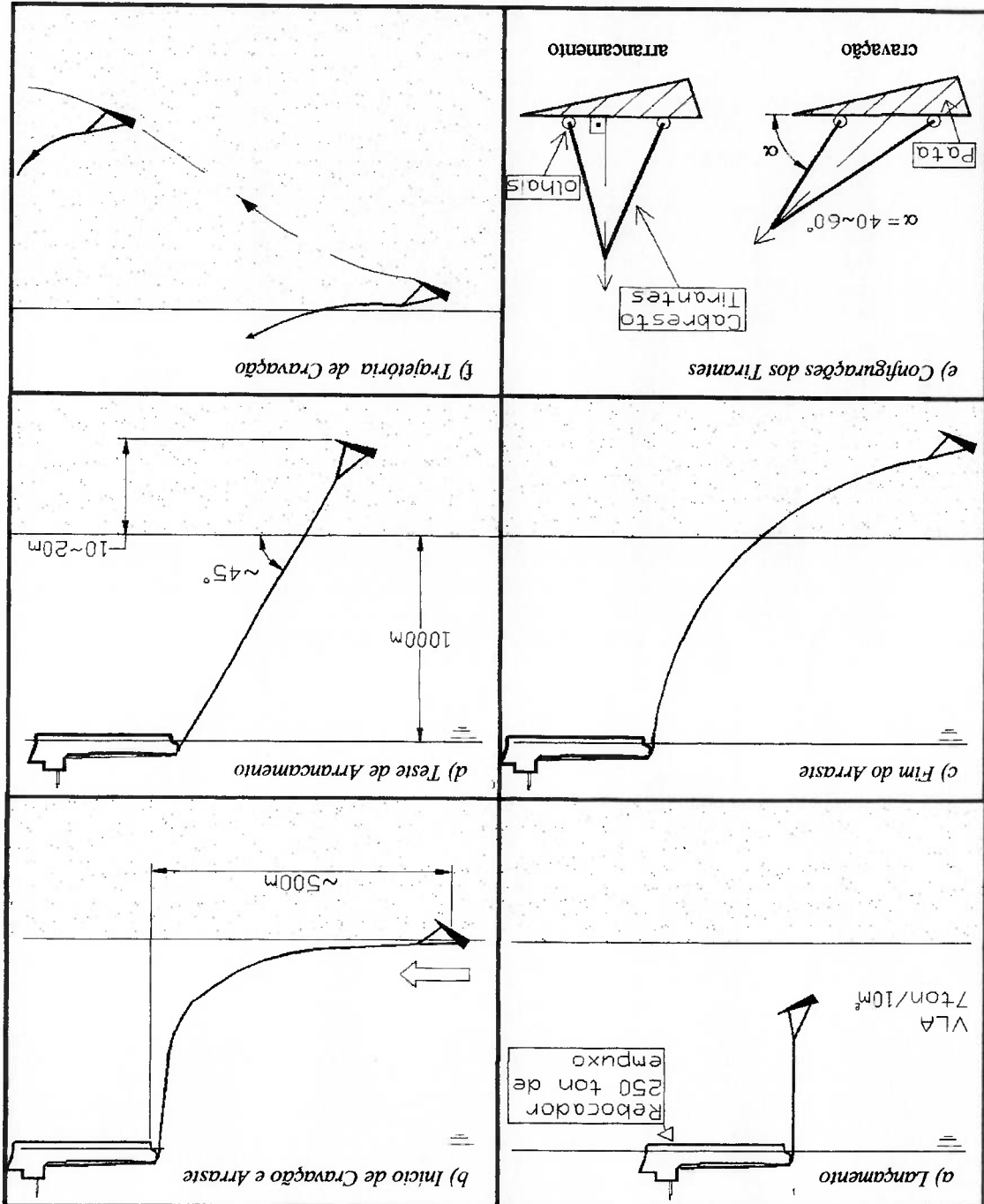


Figura A3.2 - Vistas e Perspectiva Artística da VLA CENO-ROF

