



COPPE/UF RJ

ANÁLISE ESTÁTICA DE FUNDAÇÃO RASA EM ARGILA PARA  
MANIFOLDS SUBMARINOS

Huei Sun Lai

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

Orientadores: Murilo Augusto Vaz

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Rio de Janeiro

Setembro de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

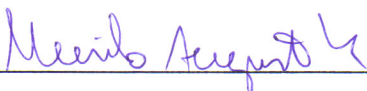
Milhares de livros grátis para download.


ANÁLISE ESTÁTICA DE FUNDAÇÃO RASA EM ARGILA PARA  
MANIFOLDS SUBMARINOS

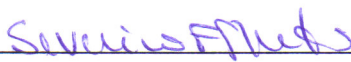
Huei Sun Lai

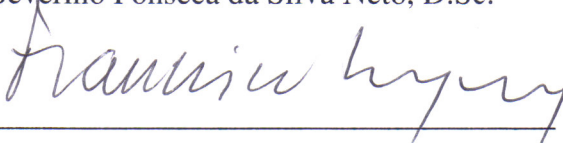
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Maria Cascão Ferreira de Almeida, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Severino Fonseca da Silva Neto, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Francisco de Rezende Lopes, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL.

SETEMBRO DE 2009

Lai, Hwei Sun

Análise Estática de Fundação Rasa Em Argila Para  
Manifolds Submarinos/ Hwei Sun Lai - Rio de Janeiro:  
COPPE/UFRJ, 2009

XVII, 97p.: 29,7 cm

Orientadores: Murilo Augusto Vaz

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Oceânica, 2009

Referências Bibliográficas: p. 75-76.

1. *Manifold*. 2. Fundação. 3. API 4. Plaxis. I. Vaz, Murilo  
Augusto *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos, e à Letícia.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família pelo suporte em toda minha vida.

Ao Programa de Engenharia Oceânica pela oportunidade de aprendizado.

Aos professores Murilo Vaz, Márcio Almeida e Maria Cascão pelos ensinamentos, orientação, paciência e ajuda necessários para a conclusão do mestrado.

À FMC Technologies por permitir a dedicação de parte de meu tempo ao mestrado.

Aos engenheiros Marcos Losso, Danielle Nogueira, Mariana Schmid e José Vilela pela ajuda e informações fundamentais para conclusão do mestrado.

Ao aluno de doutorado Bruno Lima por toda ajuda e tempo.

Aos grandes amigos Pedro e Maurício pela amizade e pelo incentivo ao ingresso e conclusão do Mestrado.

Aos grandes amigos André, Davi, Daniel, Dilton, Bruno, entre outros, pela amizade durante todos estes anos e períodos difíceis de universidade e mestrado.

A todos os meus amigos e familiares que não foram mencionados, mas que certamente contribuíram para a minha vida.

À Letícia por todo incentivo, companheirismo, compreensão, amizade e amor.

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

ANÁLISE ESTÁTICA DE FUNDAÇÃO RASA EM ARGILA PARA  
MANIFOLDS SUBMARINOS

Huei Sun Lai

Setembro/2009

Orientadores: Murilo Augusto Vaz

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho analisa a fundação de um equipamento submarino utilizado pela indústria do petróleo e gás: o manifold. Estes equipamentos são extremamente importantes no arranjo submarino e sua operação é vital para um ou vários campos produtores. Por sua grande responsabilidade, este equipamento exige atenção especial para a garantia do correto funcionamento durante sua vida útil. O funcionamento do equipamento depende, entre diversos fatores, do correto assentamento sobre o solo marinho. Desta forma, os cálculos de fundação são realizados de acordo com normas internacionais e devem considerar as diversas condições de carregamento no equipamento. Com o rápido crescimento da indústria, novas condições e geometrias passam a não ser totalmente cobertas pelas normas. Por esta razão, é realizado um estudo de caso, permitindo uma comparação entre os cálculos de fundação de diferentes métodos analíticos, comparando-os com resultados numéricos. Também é proposta uma metodologia de análise mais completa. Os resultados incluem uma estimativa de diferença de peso do equipamento considerando os diferentes métodos de análise.

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

STATIC ANALYSIS OF SHALLOW FOUNDATION IN CLAY FOR  
SUBSEA MANIFOLDS

Huei Sun Lai

September/2009

Advisors: Murilo Augusto Vaz

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Department: Ocean Engineering

The present work analyses the foundation of a subsea equipment used in the oil and gas industry: the manifold. These equipments are extremely important in the subsea layout and its operation is vital for one or more production fields. Because of its great responsibility, this equipment demands special attention to assure the correct function during its design life. The function of the equipment depends, among other factors, on the correct positioning on the sea floor. Therefore, the foundation calculations are performed according to international regulations and must consider the various loading conditions the equipment is subjected to. With the fast growth of the industry, new conditions and geometry are not yet covered by the regulations. For this reason, a case study is performed, allowing a comparison between the different analytical foundation calculation methods, and comparing them with the results of numerical analysis. It is also proposed an analysis methodology that is more complete. The results include an estimate for the difference in equipment weight between the different analysis methods.



## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Histórico .....	1
1.2. Contexto.....	2
1.3. Exploração Submarina.....	4
1.3.1. Poços e Árvores de Natal .....	5
1.3.2. Linhas de Coleta e Interligação .....	6
1.3.3. Equipamentos de Interligação .....	7
1.3.4. Unidade de Produção.....	10
1.3.5. Sistemas de Armazenamento e Exportação.....	11
1.4. Motivação .....	12
2. DESCRIÇÃO DO <i>MANIFOLD</i> .....	15
2.1. <i>Manifold</i> .....	15
2.1.1. Base .....	17
2.1.2. Sub-Base.....	18
2.1.3. Módulo Recuperável (MR) .....	19
2.1.4. Módulo de conexão vertical (MCV) .....	20
2.2. Instalação do <i>manifold</i> .....	22
3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	26
3.1. Definição da geometria.....	26
3.2. Definição dos carregamentos.....	27
3.3. Situações analisadas.....	28
3.3.1. Instalação do <i>manifold</i> .....	28
3.3.2. Interligação das linhas .....	29
3.3.3. Produção.....	29

3.3.4.	Final de vida – manutenção.....	30
3.4.	Caracterização do solo.....	30
3.5.	Revisão bibliográfica.....	31
4.	MÉTODOS DE ANÁLISE.....	33
4.1.	Cálculo analítico.....	33
4.1.1.	API.....	35
4.1.2.	Resistência média na superfície de ruptura.....	38
4.2.	Análise numérica.....	39
5.	ANÁLISES E RESULTADOS.....	42
5.1.	Análises realizadas.....	42
5.2.	Cálculo Analítico.....	43
5.3.	Análise numérica.....	44
5.3.1.	Aplicação de carregamentos.....	45
5.3.2.	Procedimento da análise numérica.....	47
5.3.3.	Parâmetros do solo.....	48
5.3.4.	Condições de contorno e malha.....	49
5.3.5.	Resultados das análises numéricas.....	50
5.3.5.1.	Caso 1.....	53
5.3.5.2.	Caso 2.....	55
5.3.5.3.	Caso 3.....	57
5.3.5.4.	Caso 4.....	59
5.4.	Análise dos resultados.....	61
5.4.1.	Metodologia analítica.....	61
5.4.2.	Resultados numéricos.....	62
5.5.	Comparação da metodologia analítica e numérica.....	63
5.5.1.	Comparação da capacidade de carga.....	63

5.5.2.	Comparação dos valores de deslocamento vertical .....	64
5.5.3.	Comparação dos valores de rotação .....	65
6.	ESTUDOS COMPLEMENTARES .....	66
6.1.	Análise de influência da saia .....	66
6.1.1.	Metodologia analítica sugerida .....	66
6.1.2.	Resultado da análise numérica .....	67
6.1.3.	Comparação dos resultados .....	69
6.2.	Aumento requerido da estrutura .....	70
6.2.1.	Metodologia convencional .....	71
6.2.2.	Metodologia convencional incluindo saia.....	71
6.2.3.	Cálculo numérico de aumento da área .....	72
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
A.	APÊNDICES .....	77
A.1	Memória de cálculo Analítico .....	77
A.2	Estudo de condições de contorno .....	83
A.3	Análise de sensibilidade da malha.....	86
A.4	Análise da influência do módulo de elasticidade .....	88
A.5	Memória de cálculo analítica considerando capacidade da saia.....	90
A.6	Cálculo de deformações através de análise axissimétrica .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Preço do barril do petróleo em dólares americanos de 2008.....	4
Figura 2.	Exemplo de arranjo submarino .....	5
Figura 3.	Exemplos de ANMs: vertical e horizontal .....	6
Figura 4.	Exemplo de PLET .....	8
Figura 5.	Exemplo de ILT PLET .....	8
Figura 6.	Exemplo de PLEM sendo instalado com MCV acoplado.....	9
Figura 7.	Exemplo de manifold com mandris para conexão remota .....	10
Figura 8.	Exemplo de <i>manifold</i> para mergulho .....	10
Figura 9.	Unidades de produção / armazenamento.....	12
Figura 10.	Exemplo de arranjo submarino convencional .....	15
Figura 11.	Exemplo de arranjo submarino utilizando <i>manifold</i> . .....	16
Figura 12.	<i>Manifold</i> completo – vista superior e isométrica. ....	16
Figura 13.	<i>Manifold</i> completo – vista lateral.....	19
Figura 14.	Vista de um <i>manifold</i> em corte .....	20
Figura 15.	Exemplo de <i>manifold</i> com sub-base.....	21
Figura 16.	Exemplo de <i>manifold</i> com sub-base estendida .....	22
Figura 17.	Imagens de <i>manifold</i> : (a) sendo manuseado; (b) instalado .....	24
Figura 18.	<i>Manifold</i> em sua posição de assentamento final .....	24
Figura 19.	Inspeção submarina: verificação de deslocamento vertical imediato .....	25
Figura 20.	Inspeção submarina: dispositivo de verificação de inclinação do equipamento .....	25
Figura 21.	Inspeção submarina: <i>manifold</i> sendo inspecionado por habitante local ...	25
Figura 22.	<i>Manifold</i> a ser estudado.....	27
Figura 23.	Ilustração dos carregamentos (a), (b) e (c) no <i>manifold</i> .....	28
Figura 24.	Condições desalinhadas: interligação de linhas e manutenção .....	30

Figura 25.	Modo de ruptura para sapata a uma profundidade D .....	34
Figura 26.	Fatores de capacidade de carga para fundação.....	35
Figura 27.	Fundações carregadas de forma excêntrica .....	36
Figura 28.	Aproximação e discretização das superfícies de ruptura .....	39
Figura 29.	Casos analisados para a vida útil do equipamento .....	43
Figura 30.	Modelo da análise numérica com o PLAXIS.....	45
Figura 31.	Aplicação de cargas distribuídas.....	46
Figura 32.	Carregamentos dos MCVs aplicados no modelo .....	46
Figura 33.	Etapas de cálculo do Plaxis para as análises realizadas .....	47
Figura 34.	Exemplo de cálculo da etapa 3 em andamento. ....	48
Figura 35.	Propriedades das duas faixas de solo modelados.....	49
Figura 36.	Malha gerada para o modelo.....	50
Figura 37.	Detalhe do refinamento da malha na área próxima ao equipamento. ....	50
Figura 38.	Resultado de análise numérica mostrando a formação da superfície de ruptura prevista por Terzaghi (1943).....	52
Figura 39.	Multiplicador por deslocamento para o Caso 1 com e sem saia .....	53
Figura 40.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 1 sem saia .....	54
Figura 41.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 1 com saia.....	54
Figura 42.	Multiplicador por deslocamento para o Caso 2 com e sem saia .....	55
Figura 43.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 2 sem saia .....	56
Figura 44.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 2 com saia.....	56
Figura 45.	Multiplicador por deslocamento para o Caso 3 com e sem saia .....	57
Figura 46.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 3 sem saia .....	58
Figura 47.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 3 com saia.....	58
Figura 48.	Multiplicador por deslocamento para o Caso 4 com e sem saia .....	59
Figura 49.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 4 sem saia .....	60

Figura 50.	Curvas de deslocamento vertical para o Caso 4 com saia.....	60
Figura 51.	Gráfico dos resultados numéricos do caso 3 para diferentes alturas de saia. .....	68
Figura 52.	Início da superfície de ruptura para diferentes alturas de saia .....	69
Figura 53.	Resultado numérico para a condição necessária prevista pelo método analítico sugerido.....	72

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.	Resultados do cálculo analítico .....	44
Tabela 2.	Rotações da base para os carregamentos excêntricos .....	44
Tabela 3.	Resumo dos resultados das análises numéricas.....	51
Tabela 4.	Resultados das análises numéricas das rotações .....	51
Tabela 5.	Resumo dos valores obtidos .....	61
Tabela 6.	Comparação da capacidade de carga analítica x numérica .....	63
Tabela 7.	Comparação do deslocamento vertical analítica x numérica .....	64
Tabela 8.	Comparação da rotação analítica x numérica.....	65
Tabela 9.	Resumo dos resultados utilizando nova metodologia .....	69
Tabela 10.	Comparação: analítico por superfície de ruptura x numérico .....	70
Tabela 11.	Aumento de área necessário pela metodologia convencional .....	71
Tabela 12.	Aumento de área necessário considerando saia .....	72

## NOTAÇÕES

### SIGLAS E ABREVIATURAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
API	<i>American Petroleum Institute</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading vessel</i>
FS	Fator de segurança
ILT	<i>In Line Tee</i>
MCV	Módulo de Conexão Vertical
MR	Módulo Removível
PLEM	<i>Pipe Line End Manifold</i>
PLET	<i>Pipe Line End Termination</i>
RP	<i>Recommended Practice</i>
WSD	<i>Working Stress Design</i>



## SÍMBOLOS

A	Área da fundação
A'	Área efetiva da fundação
A <sub>p</sub>	Área da ponta da saia
A <sub>s</sub>	Área lateral da saia
B	Largura da fundação
B'	Largura equivalente da fundação
c	Coesão do solo
D	Profundidade da fundação
f	Capacidade de resistência ao atrito unitária
G	Módulo de cisalhamento elástico do solo
H	Componente horizontal dos esforços na fundação
K <sub>c</sub>	Fator de correção
L	Comprimento da fundação
L'	Comprimento equivalente da fundação
M	Momento visto pela fundação
N <sub>c</sub>	Fator de capacidade do solo dependente de $\phi$ (ver Fig. 26)
N <sub>q</sub>	Fator de capacidade do solo dependente de $\phi$ (ver Fig. 26)
N <sub><math>\gamma</math></sub>	Fator de capacidade do solo dependente de $\phi$ (ver Fig. 26)
Q	Máxima carga vertical para ruptura
Q <sub>f</sub>	Resistência ao atrito
Q <sub>p</sub>	Resistência da ponta
q	Capacidade de carga unitária da ponta da saia
q <sub>s</sub>	Sobrepessão atuante na superfície do solo
q <sub>u</sub>	Pressão máxima suportada pela fundação

R	Raio equivalente da fundação
Su	Resistência não drenada do solo (argiloso saturado)
$\alpha$	Inclinação da base
$\beta$	Inclinação do solo
$\nu$	Coefficiente de Poisson do solo
$u_v$	Deslocamento vertical da fundação
$\theta$	Rotação da fundação
$\gamma$	Peso específico do solo
$\phi$	Ângulo de atrito do solo

# 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata do estudo da interação solo-estrutura aplicada a um tipo de equipamento utilizado largamente em sistemas de produção de óleo submarinos: o *manifold* submarino. Para tanto, resultados de análises numéricas serão comparados com resultados analíticos obtidos por cálculos realizados de acordo com as normas utilizadas na indústria.

## 1.1. Histórico

O petróleo é conhecido pela humanidade há milhares de anos, tendo diversas aplicações (Science Clarified, 2009). Comumente encontrado borbulhando na superfície terrestre nos chamados poços de óleo, o petróleo era usado principalmente para iluminação, lubrificação, impermeabilização de navios, e união de blocos para construção civil. Existem registros de uso de petróleo pelos chineses datando de 4 séculos A.C.

Por volta de 1850, o óleo cru ainda era obtido extraindo-o da superfície dos poços rasos. Como o óleo de baleia estava se tornando cada vez mais escarço à medida que os mamíferos gigantes foram caçados beirando à extinção, os produtores de óleo passaram a procurar outras formas de extrair petróleo.

Em 1859, quando trabalhava para a Seneca Oil Company na Pensilvânia, Estados Unidos, Edwin L. Drake e sua equipe perfuraram o primeiro poço de petróleo moderno. Eles encontraram petróleo a aproximadamente 21 metros de profundidade. Desta forma foi iniciada a expansão do petróleo na América do Norte, e iniciou-se a indústria mundial de petróleo.

Por algum tempo as Petrolíferas seriam uma parte minoritária da indústria, já que o único produto conhecido do óleo cru era o querosene, sendo o restante simplesmente jogado fora. Cinquenta anos após, com a invenção dos motores de combustão interna e maior conhecimento da grande variedade de aplicações do petróleo, a indústria petrolífera teve seu real surgimento. O mercado rapidamente tornou-se internacional e o

processo de extração de petróleo tornou-se extremamente sério e financeiramente recompensante.

A exploração de petróleo *offshore*, como é chamada a exploração de petróleo que se passa no oceano, inicialmente utilizou equipamentos e processos iguais aos utilizados em terra. (Weed, 2009)

As primeiras tentativas de perfuração e extração de petróleo no oceano se passaram no final do século 19, início do século 20. Grande parte das tentativas neste período devido à tecnologia limitada disponível. Operações offshore começaram a obter maior taxa de sucesso e se estabeleceram no meio do século 20. Atualmente uma grande parte do suprimento mundial de petróleo é proveniente de operações offshore.

Este tipo de operação *offshore* permite a exploração de reservas anteriormente inacessíveis e tornou-se especialmente importante à medida que as reservas para exploração baseada em terra foram tornando-se mais escassas.

Infelizmente a exploração de petróleo *offshore* possui diversos riscos potenciais e desvantagens. A principal preocupação sendo o derramamento de óleo. Um derramamento causa impacto devastador na vida aquática e em todo ecossistema oceânico do mundo. A própria operação de exploração gera poluição e resíduos que devem ser tratados adequadamente.

A logística associada com a operação *offshore*, assim como os cuidados necessários para minimizar os riscos da operação imprimem um custo associado elevado. Desta forma, operações *offshore* requerem condições específicas para se tornarem economicamente viáveis: escassez de fontes e/ou elevado custo do petróleo no mercado mundial.

## **1.2. Contexto**

De acordo com Sousa (2009) e Petrobras (2009), no Brasil o grau de atuação da Petrobras na economia ampliou-se na década de 1960. No ano de 1964, a empresa começa a desenvolver um projeto de perfuração submarina, contratando firmas estrangeiras para os trabalhos de levantamento submarino. Após as primeiras descobertas na cidade sergipana de Guaricema, em 1968, outras prospecções ampliaram

significativamente a produção petrolífera brasileira. Em 1969 inicia-se os levantamentos geofísicos na bacia de Campos, sendo perfurado o primeiro poço submarino na área. Em 1974 é descoberto o campo de Garoupa, primeiro da Bacia de Campos, que era a maior reserva de petróleo do país até então.

Com o passar do tempo, o Brasil se tornou uma das únicas nações a dominar a tecnologia de exploração petrolífera em águas profundas e ultraprofundas. Em 1997, durante o governo do presidente Fernando Henrique Cardoso, uma lei aprovou a extinção do monopólio estatal sobre a exploração petrolífera e permitiu que empresas do setor privado também pudessem competir na atividade. Tal medida visava ampliar as possibilidades de uso dessa riqueza.

Em 2003, a descoberta de outras bacias estabeleceu um novo período da atividade petrolífera no Brasil. A capacidade de produção de petróleo passou a suprir mais de 90% da demanda por esta fonte de energia e seus derivados no país. Em 2006, esse volume de produção atingiu patamares ainda mais elevados e conseguiu superar, pela primeira vez, o valor da demanda total da nossa economia. A conquista da autossuficiência permitiu o desenvolvimento da economia e o aumento das vagas de emprego.

No ano de 2007, o governo brasileiro anunciou a descoberta de um novo campo de exploração petrolífera na chamada camada pré-sal. Essas reservas de petróleo são encontradas a cerca de sete mil metros de profundidade e apresentam imensos poços de petróleo em excelente estado de conservação. Se as estimativas estiverem corretas, essa nova frente de exploração será capaz de dobrar o volume de produção de óleo e gás combustível do Brasil.

Além do potencial petrolífero, as descobertas na região do pré-sal se diferenciam pela qualidade do óleo. A maior parte das reservas da Petrobras é de petróleo pesado. As jazidas do pré-sal, contando hidrocarbonetos leves, gás natural e condensado, podem mudar o perfil das reservas da Companhia, reduzindo a importação de óleo leve e gás natural.

Durante as décadas de 80 e 90 o preço do barril de petróleo possibilitou a pesquisa e o desenvolvimento da tecnologia de exploração submarina. Durante os últimos 10 anos, a escalada do preço do barril impulsionou a indústria petrolífera, permitindo a

exploração em águas profundas. A Figura 1 mostra a variação no preço do barril do petróleo, com valores corrigidos para dólares americanos de 2008.

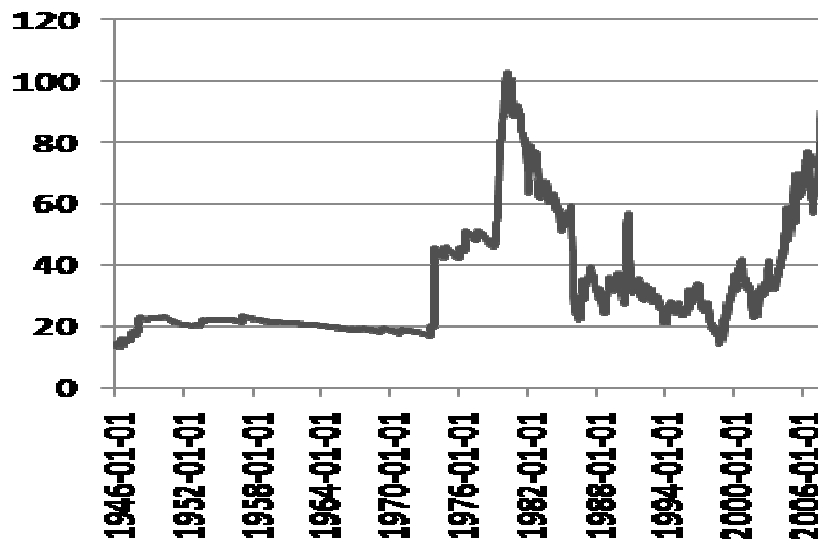


Figura 1. Preço do barril do petróleo em dólares americanos de 2008  
(KRUGMAN, 2008)

### 1.3. Exploração Submarina

A exploração submarina de petróleo e seus derivados exige infraestrutura adicional, equipamentos e logística mais complexos. Desta forma, o custo de exploração é bastante superior à exploração em terra.

Em geral, um sistema de produção marítimo pode ser dividido em alguns componentes básicos, mostrados na Figura 2. Estes componentes são descritos a seguir.



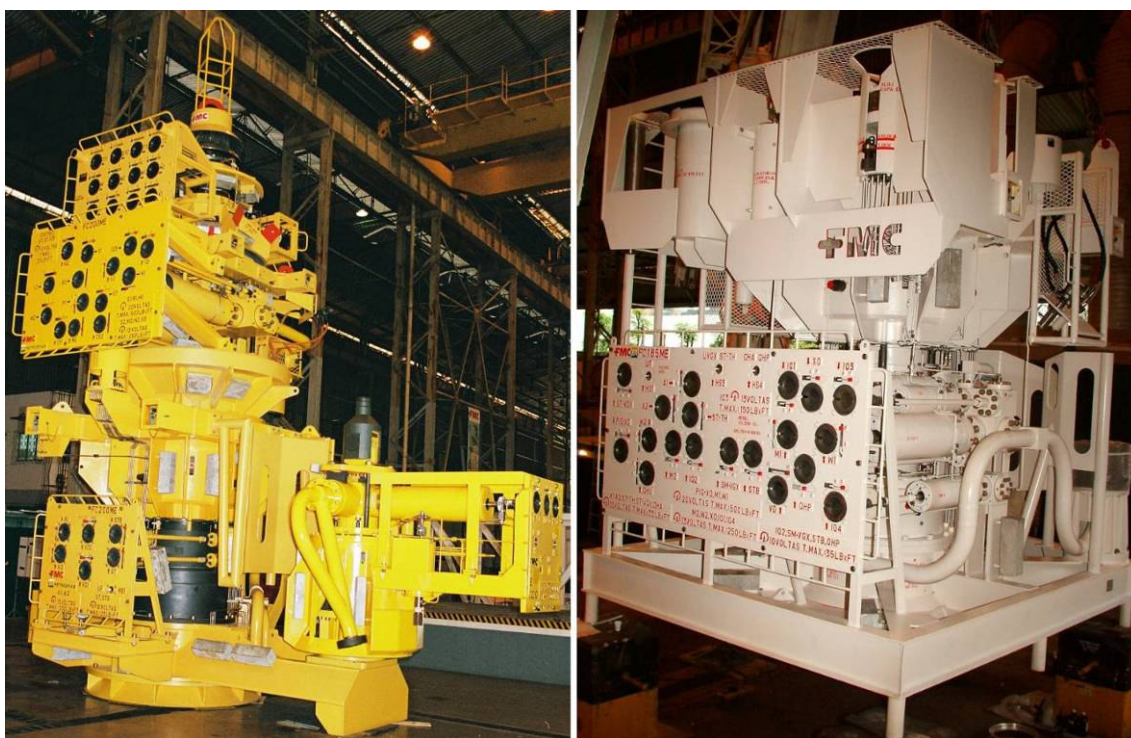
**Figura 2. Exemplo de arranjo submarino (Cortesia de Emerson Process Management).**

### **1.3.1. Poços e Árvores de Natal**

Assim como na exploração terrestre, a exploração submarina utiliza poços para acessar os reservatórios a partir do nível do solo. Por estes poços pode ser escoada a produção e/ou injetados fluidos para controle do poço ou reservatório.

Um poço submarino é composto basicamente pela cabeça de poço e pela coluna de produção por onde é acessado o reservatório, composto por tubos de aço. A cabeça de poço submarina é um equipamento geralmente cilíndrico e de aço, que é cimentado ao fundo do mar, provendo uma boa base de suporte para os equipamentos nela acoplada.

O escoamento em um poço é controlado por Árvores de Natal (Figura 3). A Árvore de Natal Molhada (ANM) é constituída por um conjunto de válvulas e tubulações ligados a saídas que permitem a conexão de linhas. Recentemente foram incorporados às ANMs sistemas de controle assim como sensores e controladores de vazão.



**Figura 3. Exemplos de ANMs: vertical e horizontal (Cortesia de FMC Technologies)**

### **1.3.2. Linhas de Coleta e Interligação**

As conexões entre os componentes do sistema são feitas por meio de linhas flexíveis ou tubos rígidos. Estas linhas podem ser qualificadas como: *risers*, *jumpers* ou *flowlines*.



Os *risers* são as linhas que ligam os componentes submarinos com os componentes de superfície. São compostos de linhas rígidas ou flexíveis suportadas diretamente pela plataforma ou navio, utilizando parte da carga útil da embarcação. Outra opção são *risers* suportados por um sistema de flutuação independente da embarcação.

*Jumpers* são as linhas que interligam equipamentos submarinos. A maioria dos *jumpers* utilizados no Brasil são do tipo flexível. Linhas flexíveis são bastante complexas e muitas vezes possuem limitação de profundidade. Suas vantagens incluem: facilidade de instalação, fabricação do *jumper* independente de metrologia submarina e baixa transmissão de carregamentos para os equipamentos interligados. Recentemente *jumpers* rígidos têm sido adotados, compostos de tubos de aço rígidos. A flexibilidade necessária para o funcionamento do *jumper* (para suportar a movimentação dos equipamentos) é dada pela geometria do *jumper* rígido. Este tipo de *jumper* tem uma série de vantagens, como o baixo custo quando comparado ao flexível e possuem menores limitações de profundidade quando comparados com os flexíveis. Entretanto o *jumper* rígido possui desvantagens: necessita logística de fabricação incluindo metrologia submarina e fabricação de acordo com o posicionamento exato dos equipamentos, dificuldade de instalação e a alta transmissão de carregamentos horizontais, verticais e de momento para os equipamentos interligados.

*Flowlines* são linhas de grande comprimento utilizadas para interligar componentes à grandes distâncias e, muitas vezes, às bases próximas à costa. Devido ao alto comprimento, geralmente são compostos de tubos rígidos. Esta tubulação é muito suscetível a variações de temperatura, que acarretam na contração ou expansão da linha, imprimindo grandes forças horizontais nos equipamentos interligados.

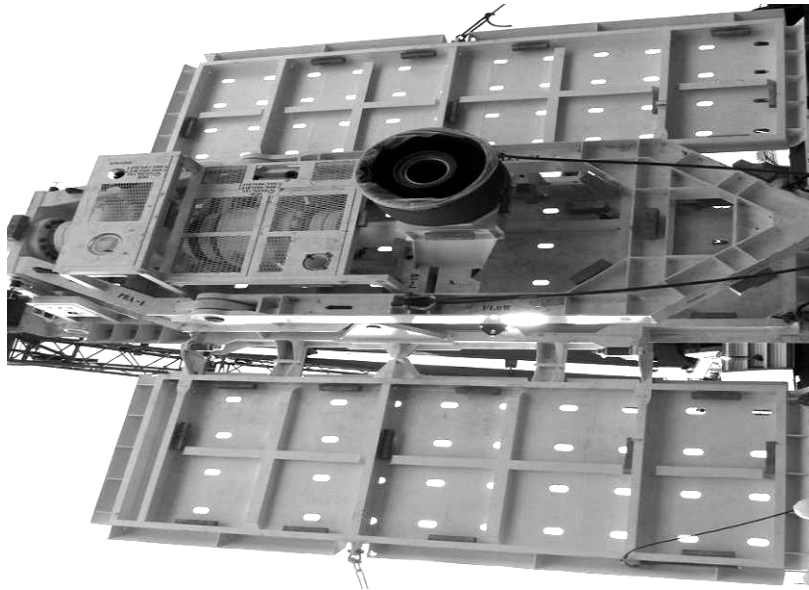
### **1.3.3. Equipamentos de Interligação**

Equipamentos de interligação são os componentes do sistema submarino de produção que permitem a conexão, transição e multiplicação das linhas de coleta e interligação.

Dentre os principais equipamentos, tem-se:

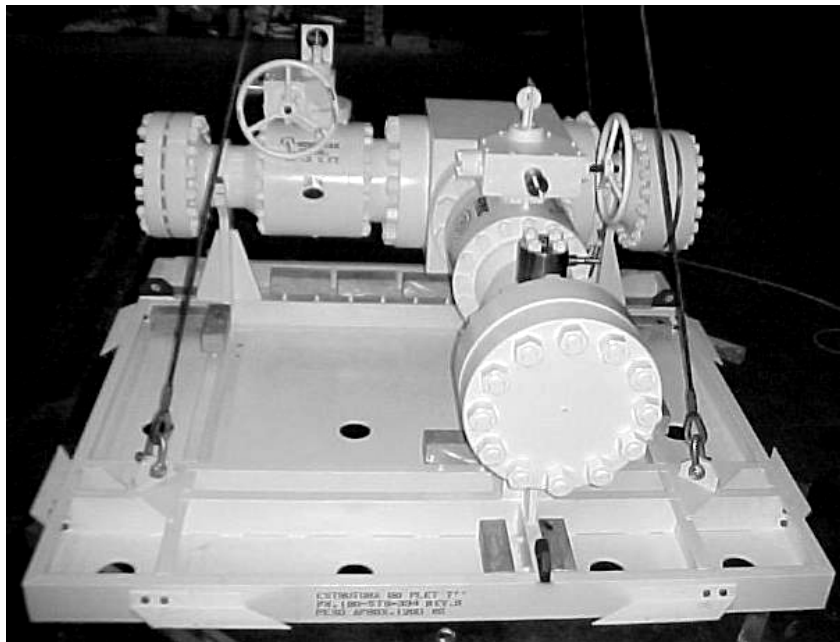
PLET – *Pipeline End Termination* – equipamentos de terminação de linha (Figura 4). São equipamentos de final de linha, sendo utilizados para realizar a transição entre

duas linhas instaladas independentemente, geralmente uma linha rígida (um *flowline*) e uma flexível (um *jumper*).



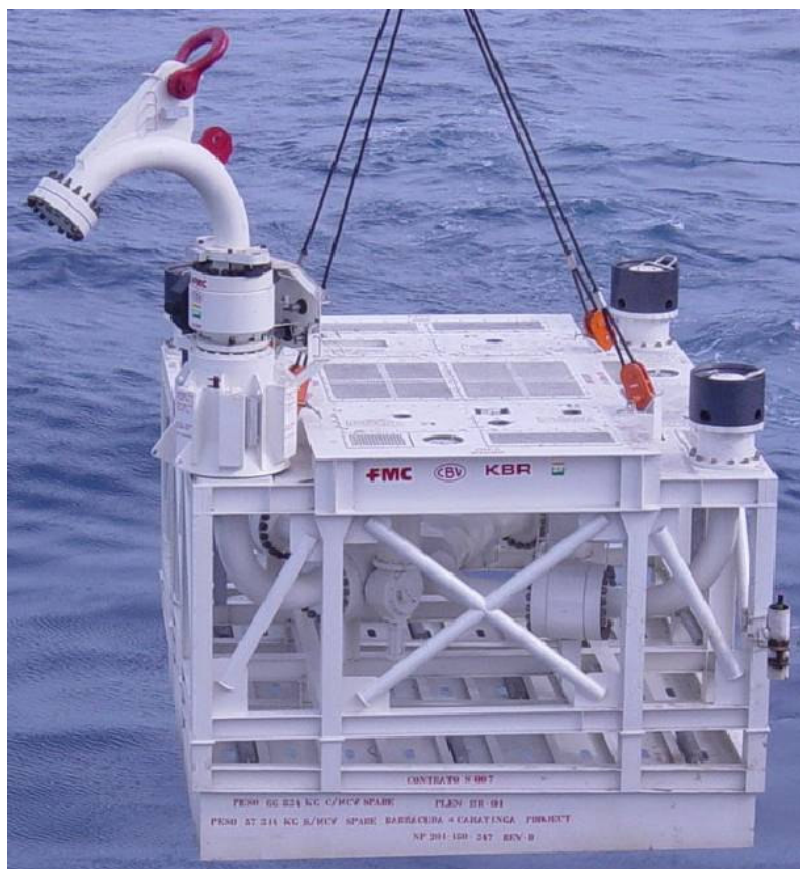
**Figura 4. Exemplo de PLET (Cortesia de FMC Technologies)**

ILT – *In Line Tee* – são equipamentos incorporados em um trecho do *flowline*, incluindo uma bifurcação na linha, permitindo a conexão de linhas futuras (Figura 5).



**Figura 5. Exemplo de ILT (Cortesia de FMC Technologies)**

PLEM – *Pipeline End Manifold* – são equipamentos similares aos PLETs, com múltiplas saídas, permitindo a conexão entre mais de duas linhas (Figura 6).



**Figura 6. Exemplo de PLEM sendo instalado com MCV acoplado (Cortesia de FMC Technologies)**

*Manifold* – são equipamentos submarinos utilizados para reunir diversas linhas, permitindo diversas conexões submarinas. São utilizados para reunir diversos poços a uma quantidade menor de linhas que vão para a superfície ou a outro equipamento, reduzindo a quantidade necessária de linhas no fundo do mar. As figuras 7 e 8 mostram dois tipos de *manifolds*: *manifolds* para alta profundidade (superior a 400m), com interligações através de conexão remota (Figura 7); *manifolds* de baixa profundidade, cuja operação e interligação pode ser realizada por mergulhadores, tendo saídas flangeadas para interligações futuras (Figura 8).



**Figura 7. Exemplo de manifold com mandris para conexão remota (Cortesia de FMC Technologies)**



**Figura 8. Exemplo de *manifold* para mergulho (Cortesia de FMC Technologies)**

#### **1.3.4. Unidade de Produção**

A unidade de produção de óleo e gás submarino trata-se de uma plataforma ou navio com todo os equipamentos necessários para a produção e controle dos poços. (ver figuras 2 e 9)

Inicialmente, durante a exploração de petróleo em águas rasas, as plataformas eram fixas ao solo marinho. À medida em que o petróleo era explorado em profundidades cada vez maiores, as plataformas passaram a ser flutuantes. Neste momento a modificação de embarcações começou a ser realizada para funcionar como unidades de produção.

As linhas de controle, assim como as linhas de coleta são ligadas a estas unidades de produção. Assim sendo, além do peso dos equipamentos necessários, a embarcação deve possuir flutuabilidade suficiente para suportar as linhas que ligam aos equipamentos submarinos.

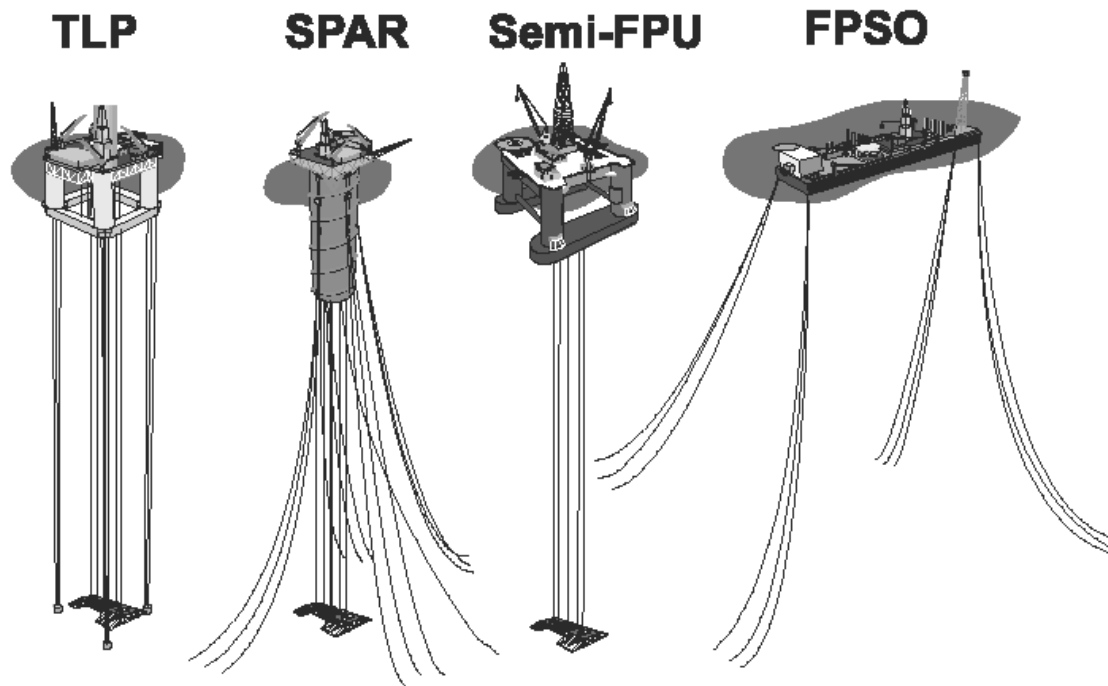
### **1.3.5. Sistemas de Armazenamento e Exportação**

Os produtos resultantes da unidade de produção podem ser escoados por meio de navio ou por tubulação ligando a unidade de produção a um sistema de armazenamento.

Sistemas de exportação que utilizam tubulação permitem maior taxa de escoamento, mas dependem da viabilidade de instalação de tubulação ligada à unidade de produção. Exportação através de embarcações depende da disponibilidade de embarcações adequadas e de sistemas de transferência seguros.

Unidades de produção marítimas que não possuem forma direta de escoamento devem armazenar a produção até que uma unidade de escoamento retire e transporte a produção ao destino final.

A Figura 9 mostra os diferentes tipos de unidades de produção e armazenamento mais empregados para exploração de petróleo *offshore*.



**Figura 9. Unidades de produção / armazenamento. (Colliat, 2002).**

#### **1.4. Motivação**

Todos os equipamentos submarinos, excetuando-se as ANMs, são assentados diretamente sobre o solo marinho. Isto inclui os equipamentos de interligação e linhas de coleta e interligação.

Os equipamentos de interligação possuem base própria sobre as quais assentam-se no momento de instalação. Cada equipamento possui requisitos de estabilidade próprios. Muitas vezes é permitido que as linhas de interligação recalquem no solo marinho sob ação de seu peso próprio. No caso dos equipamentos de interligação, a fundação é calculada de forma que o equipamento apresente estabilidade e pequeno recalque durante toda vida útil para possibilitar as conexões futuras.

A fundação de um equipamento submarino, então, é calculada para suportar o peso próprio, o peso de conexões futuras e os carregamentos das linhas que estão ou serão ligadas a ele. Além do carregamento vertical proveniente do peso das conexões futuras, muitas vezes existem também forças horizontais provenientes da expansão térmica de *flowlines* ou transmitidas por *jumpers* rígidos.

A teoria clássica de fundações rasas é aplicada para o cálculo das fundações destes equipamentos. Esta teoria clássica é a base de normas internacionais, como a API RP 2A – *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*.

Com a evolução da indústria submarina, novos projetos e conceitos de equipamentos surgiram para suprir os crescentes desafios. Estes novos conceitos trazem novas condições de carregamentos que muitas vezes não são cobertos pelas normas internacionais.

Equipamentos de alta criticidade, por sua vez, exigem cálculos cada vez mais precisos de suas fundações de forma a otimizar o equipamento reduzindo custos e garantindo sua operação e funcionalidade durante toda vida útil.

O elevado custo de um *manifold* submarino somado à importância de sua plena operação permitem a sua classificação como equipamento crítico. A parada de um *manifold* ou a perda de sua funcionalidade geralmente afeta quatro ou mais poços, tendo grande impacto em uma Unidade de Produção.

Dentre as limitações da norma em relação ao cálculo das fundações deste equipamento citam-se:

- Cálculo de deslocamento do equipamento – O deslocamento do equipamento após seu assentamento é parâmetro essencial para a instalação de futuras linhas. A norma especifica apenas uma metodologia de cálculo aproximada deste parâmetro.
- Utilização de saia – A saia de cisalhamento é uma placa horizontal que possibilita aumentar a resistência da fundação a esforços horizontais. Há também uma contribuição para resistência vertical considerável. Entretanto, as normas não levam em consideração a contribuição da saia nos cálculos da fundação do equipamento.

A correta avaliação da capacidade da fundação do equipamento pode levar a uma grande economia, evitando o sobre dimensionamento da estrutura. Além da economia direta do valor da estrutura, deve ser levado em consideração a economia na logística de transporte e instalação do equipamento.

O objetivo deste estudo é fazer uma análise de caso, confrontando os resultados de análises numéricas com os valores calculados pela metodologia definida pela norma API. Serão utilizados também valores de cálculo analítico levando em consideração a teoria de superfície de ruptura da teoria clássica, que é uma metodologia aceita pela indústria petrolífera brasileira.

A análise numérica será realizada no programa PLAXIS v. 8.2., programa de análise numérica específico para problemas geotécnicos.

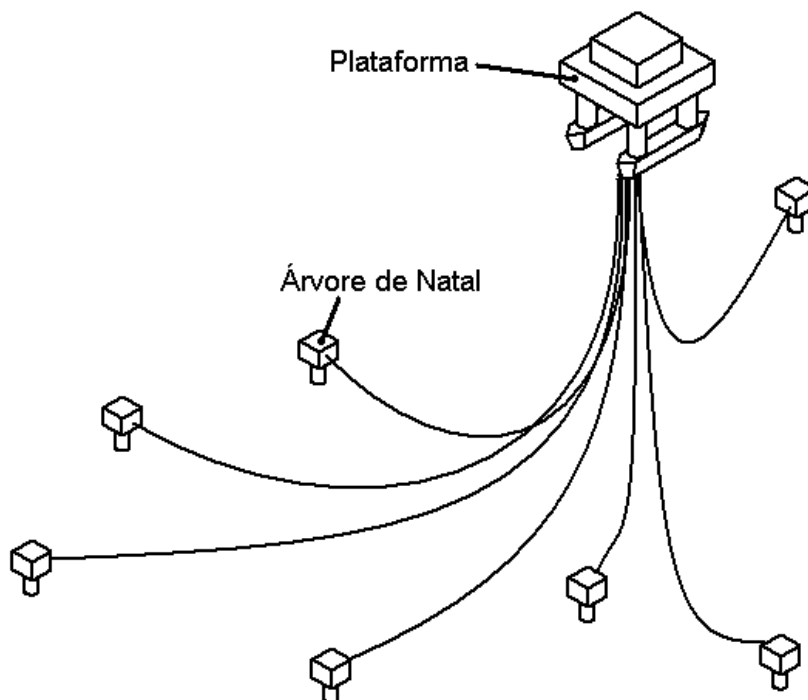


## 2. DESCRIÇÃO DO *MANIFOLD*

### 2.1. *Manifold*

O *manifold* submarino é um equipamento composto de tubulações principais e derivações. Seu objetivo principal é coletar ou distribuir fluidos, aumentando a capacidade de controle, produção ou injeção de uma linha. Desta forma, este equipamento tem uma importante função no arranjo submarino, aumentando a capacidade de uma plataforma ou navio e diminuindo a quantidade de linhas no fundo do mar.

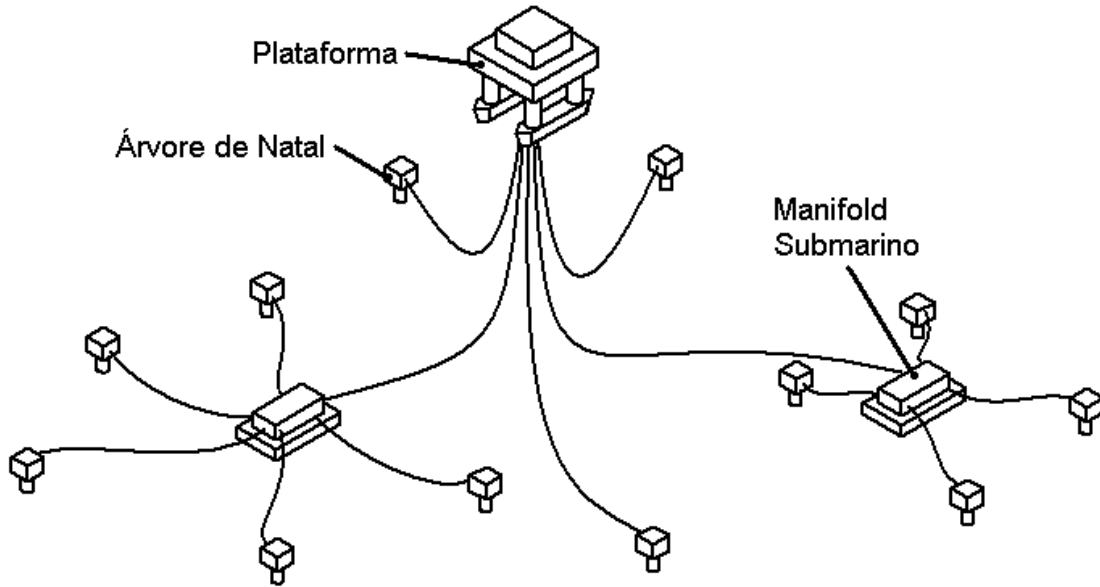
A Figura 10 mostra um exemplo de arranjo submarino convencional, onde a Plataforma controla as ANMs diretamente. O escoamento da produção também é feito de forma direta.



**Figura 10. Exemplo de arranjo submarino convencional**

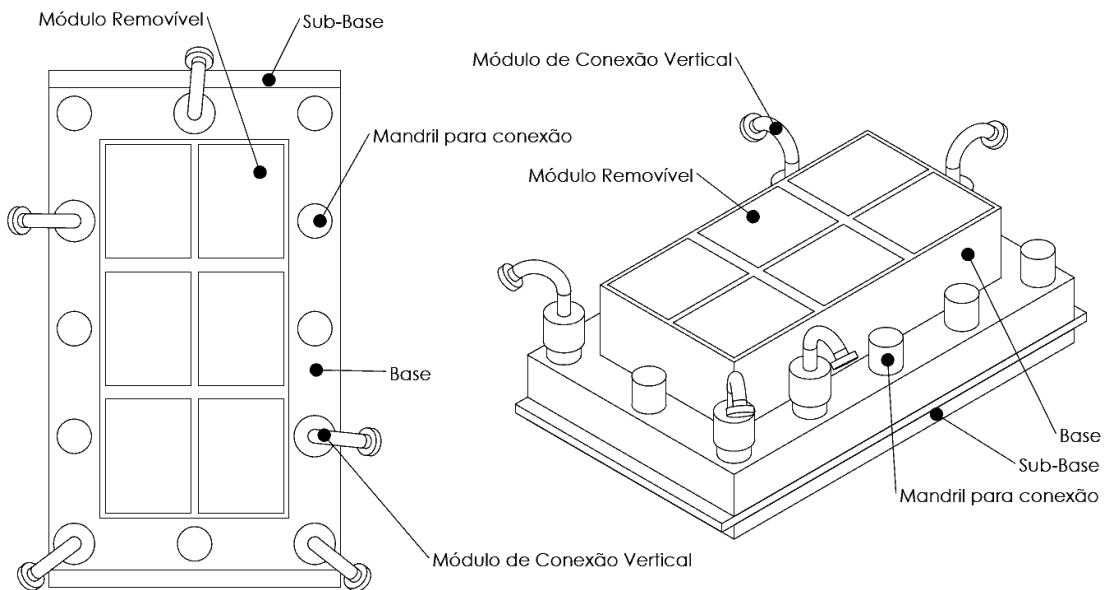
A Figura 11 mostra um exemplo de arranjo submarino utilizando *manifold* submarino. As ANMs são controladas diretamente pela Plataforma ou indiretamente

através dos *manifolds*, permitindo o controle de mais ANMs utilizando o mesmo número de linhas. Este tipo de arquitetura otimiza a utilização da unidade de produção e tem sido preferida nos arranjos submarinos modernos.



**Figura 11. Exemplo de arranjo submarino utilizando *manifold*.**

O *manifold*, conforme indicado nas figuras 12 e 13, é composto por uma base, sub-base (opcional), tubulação, válvulas, módulos recuperáveis e mandris que recebem equipamentos de interconexão com outros equipamentos da arquitetura submarina.



**Figura 12. *Manifold* completo – vista superior e isométrica.**

### 2.1.1. Base

Estrutura composta de válvulas, tubulação, mandris para sistema de conexão e instrumentação hidráulica. É a parte do *manifold* que fica residente na locação durante a vida útil do equipamento.

A estrutura da base é formada por um quadro de vigas e suportes responsáveis por absorver parcial ou totalmente os carregamentos provenientes das etapas de instalação, produção e desinstalação do equipamento. Neste quadro de vigas estão apoiados os equipamentos e componentes que compõem o *manifold*, assim como os olhais necessários para instalação e manuseio do *manifold*.

Desta forma, este quadro é objeto de cálculos e análises estruturais com objetivo de dimensioná-lo para suportar os carregamentos aos quais o equipamento é submetido e que são considerados mais críticos: içamento para instalação, devido às amplificações dinâmicas decorrentes do manuseio; e operação, devido aos carregamentos provenientes da expansão térmica da tubulação proveniente da passagem de fluido.

Com o objetivo de otimizar o equipamento, a base é dimensionada de forma a obter o menor envelope que atenda aos critérios:

- Largura, comprimento e altura que respeitem os limites dimensionais de forma a permitir o transporte: passagem por pontes, túneis, portais, entre outros;
- Volume suficiente para acomodar todos os equipamentos exigidos pelo cliente: tubos, válvulas, medidores, módulos, mandris de saída para conexões futuras;
- Dimensão das vigas de forma a suportar os carregamentos estruturais: carga de instalação e operação;
- Área inferior suficiente para estabilidade da fundação do equipamento, caso o *manifold* não possua sub-base.

A chapa de apoio da fundação ou *mudmat* pode ser fixada diretamente à estrutura da base ou fixada à estrutura da sub-base.

Geralmente as bases dos *manifolds* atingem dimensões superiores a 8 metros de largura e comprimento, tendo aproximadamente 4 metros de altura. O peso varia entre 120 e 280 toneladas.

### **2.1.2. Sub-Base**

Estrutura independente ou fixa à base, dimensionada para suportar o *manifold* no solo marinho considerando o peso e os esforços durante todas as fases da vida útil. Esta é a parte do *manifold* que fica em contato direto com o solo marinho, suportando o carregamento. Pode possuir ou não uma saia para aumentar a capacidade de carga da fundação.

A sub-base é composta por um quadro de vigas onde é fixado o *mudmat* e, caso necessário, a saia. Pode ser fixada ao *manifold* através de parafusos, soldada ou por algum mecanismo que permita o desacoplamento no fundo do mar.

Suas dimensões são determinadas de forma a garantir a estabilidade da fundação do equipamento. Do ponto de vista estrutural, é desejável que as dimensões da sub-base não ultrapassem demasiadamente as dimensões da base do *manifold* (ver Figuras 13 e 14).

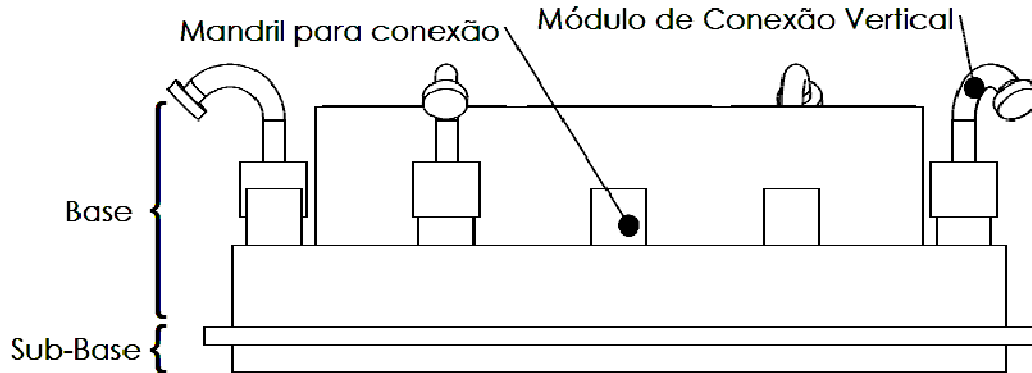
A saia da fundação é basicamente uma caixa invertida formada por chapas. Esta saia aumenta a capacidade da fundação tanto para cargas verticais quanto horizontais (ver Figuras 13 e 14). As chapas que compõem a saia devem ser esbeltas de forma a facilitar sua penetração no solo.

A necessidade de existir uma sub-base no *manifold* ao invés da *mudmat* presa diretamente na estrutura da base pode ser proveniente de:

- Viabilidade de transporte: evita danos à saia caso o peso do *manifold* completo fosse apoiado sobre a saia durante o transporte do *manifold*;
- Facilidade de desinstalação: caso haja necessidade de desinstalação do *manifold*, a sub-base pode ser abandonada na posição. Desta forma a carga de desinstalação não seria acrescida da força de sucção exercida pelo solo na saia e no *mudmat*.

Como as dimensões da sub-base seguem as da base, estas geralmente estão na faixa superior a 8 metros de comprimento e largura, tendo a altura do perfil que compõe

o quadro de vigas entre 0,2m e 0,4m. A saia é dimensionada de acordo com o carregamento no equipamento e varia entre 0,5m e 1m, sendo fabricada utilizando chapas de 10mm de espessura ou maior. O peso total da sub-base é próximo de 20 toneladas.



**Figura 13. *Manifold* completo – vista lateral.**

### **2.1.3. Módulo Recuperável (MR)**

Módulo composto por estrutura, conector, dispositivo de içamento e componentes (válvulas, reguladores de pressão, sensores, etc) que pode ser recuperado sem a necessidade de recuperar o *manifold* completo.

Equipamentos como válvulas, sensores, reguladores de pressão e itens de controle geralmente possuem vida útil inferior à vida útil determinada para o *manifold*. Desta forma, estes itens críticos para o funcionamento do *manifold* são inseridos em módulos recuperáveis de forma a permitir a substituição dos mesmos de forma rápida, permitindo que o *manifold* fique em funcionamento durante toda sua vida útil.

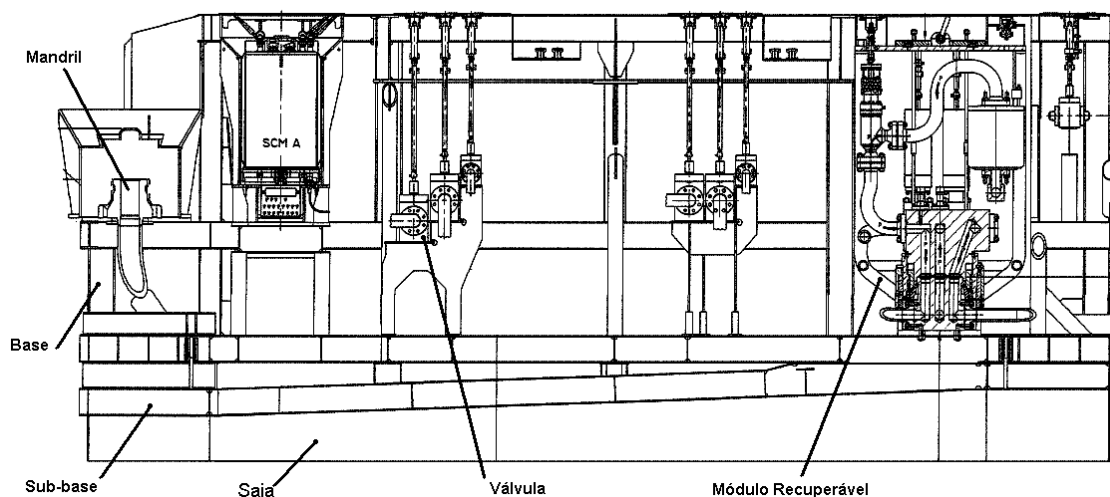
Os equipamentos que compõem um módulo são definidos pelo cliente, de acordo com a necessidade e a confiabilidade destes itens críticos.

As dimensões dos módulos recuperáveis ficam entre 1,5m e 4m de largura e comprimento, ficando entre 3m e 4m de altura. Seu peso está na faixa de 15 a 25 toneladas, podendo, em alguns casos, ser superior a 30 toneladas.

Devido ao seu elevado peso e à possibilidade de instalação e remoção destes módulos no *manifold*, este equipamento é uma das causas de existirem carregamentos descentralizados sobre o *manifold*, diminuindo a eficiência da fundação. Desta forma,

durante as análises de suas fundações, são levadas em consideração condições críticas de instalação não centralizada dos módulos recuperáveis.

A Figura 14 permite a visualização do posicionamento do módulo recuperável na estrutura do *manifold*.



**Figura 14. Vista de um *manifold* em corte (Cortesia de FMC Technologies)**

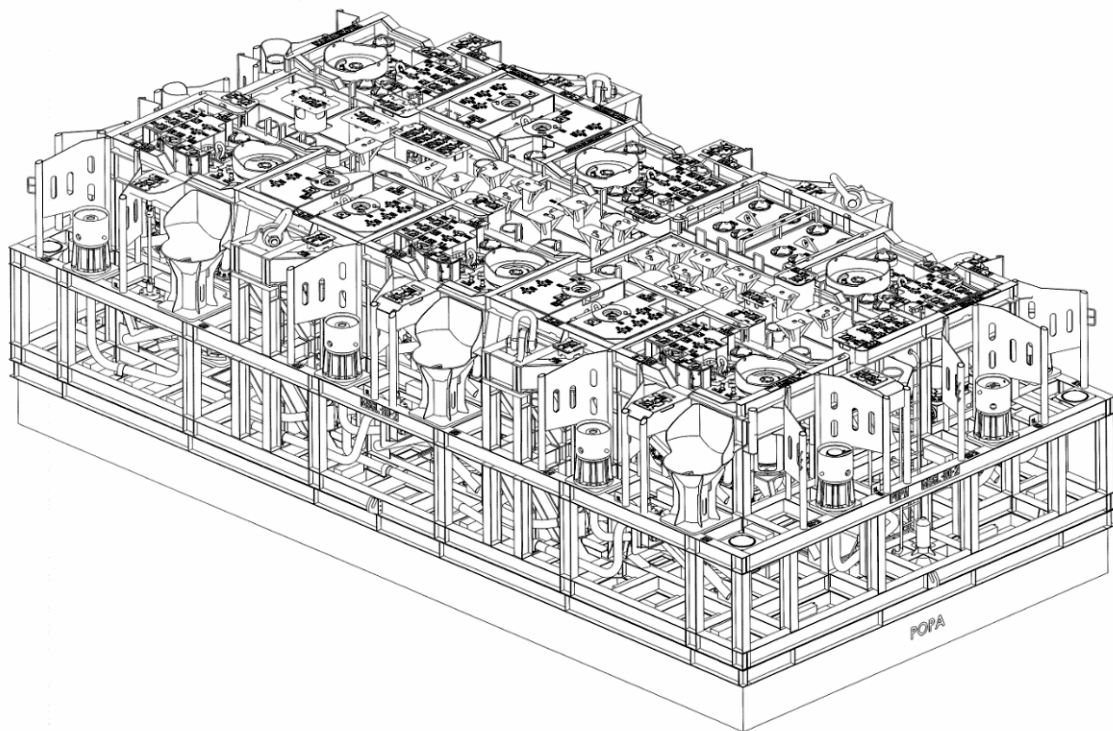
#### **2.1.4. Módulo de conexão vertical (MCV)**

Módulo ligado à linha de produção, anular ou de controle, que permite a ligação do *manifold* à Plataforma, ANM ou outro equipamento submarino. São compostos por um conector para travamento sobre o mandril, tubo para passagem do fluido, flange para ligação à linha, e uma estrutura de orientação e içamento.

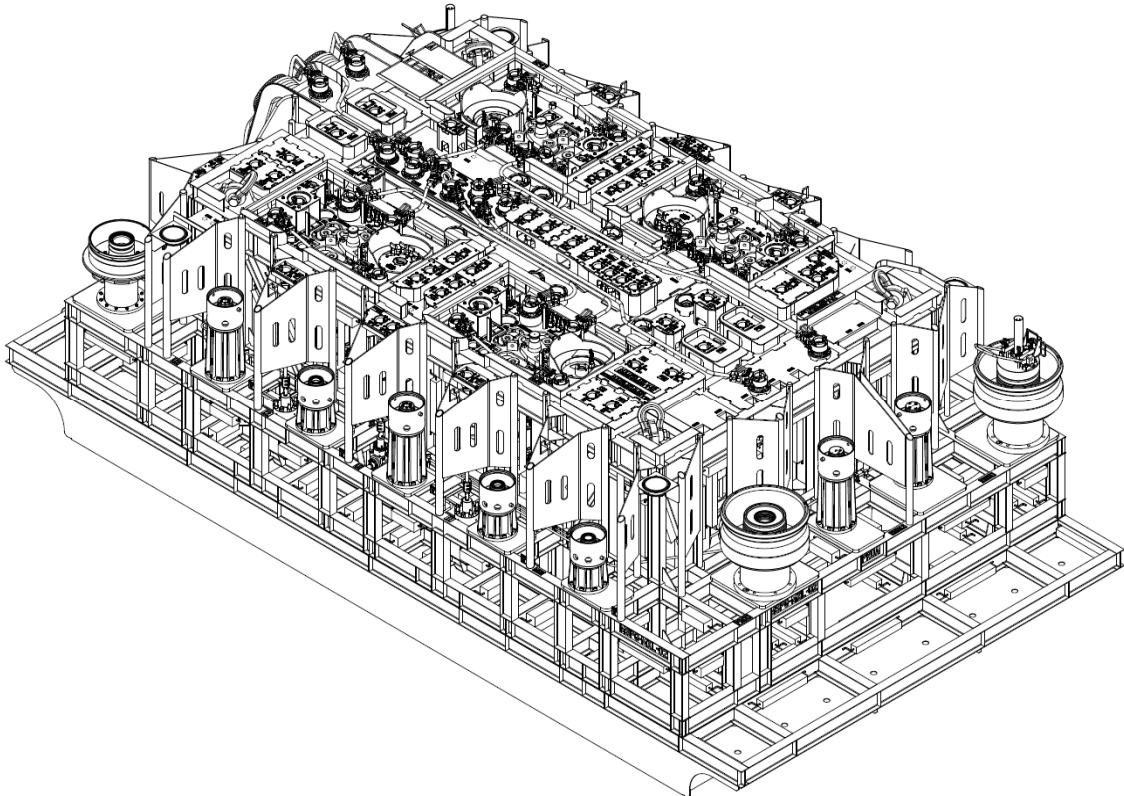
Os módulos são equipamentos pequenos, pesando entre 4 e 8 toneladas. Estes módulos são assentados sobre os mandris de conexão. Sendo eles conectados a uma linha de interligação para outro equipamento, os módulos e mandris de conexão devem ser posicionados próximos à parte externa do *manifold*. Devido a esta posição afastada do centro do *manifold*, estes equipamentos podem gerar um carregamento bastante excêntrico, diminuindo a capacidade de carga da fundação. As Figuras 15 e 16 mostram vistas isométricas de dois *manifolds* diferentes, permitindo a visualização dos mandris para conexão de MCVs em todo perímetro do equipamento.

Estes módulos podem gerar carregamentos na direção paralela ao solo no caso de movimento dos equipamentos ou embarcações ligados às linhas ou em caso de expansão térmica das linhas.

O caso crítico de carregamento lateral proveniente de um módulo de conexão vertical é a perda de posição da embarcação (plataforma, barco de instalação ou FPSO) que está ligada à outra extremidade da linha conectada ao módulo. Para este caso crítico, o módulo é projetado de forma que seja o ponto de falha estrutural – o fusível mecânico – para evitar a quebra de algum equipamento residente no *manifold*. A falha estrutural do módulo ocorre em um valor de tração entre 10 e 30 toneladas. Desta forma, estes módulos são a principal fonte de carregamento no caso de verificação de resistência lateral.



**Figura 15. Exemplo de *manifold* com sub-base (Cortesia de FMC Technologies)**



**Figura 16. Exemplo de *manifold* com sub-base estendida (Cortesia de FMC Technologies)**

## **2.2. Instalação do *manifold***

A operação de instalação do *manifold* submarino é uma etapa importante para a fundação do equipamento. Esta operação é dividida em etapas principais:

- Içamento – nesta etapa o *manifold* é retirado da embarcação de transporte que levou o *manifold* à sua locação de instalação. O *manifold* pode ser manuseado por lingadas conectadas a olhais ou ferramenta de manuseio. Outra opção de manuseio do *manifold* pode ser através de coluna rígida ligada a uma ferramenta de manuseio. A Figura 17 mostra um *manifold* sendo içado por lingada.
- Descida – através do cabo de aço ou da coluna rígida, o *manifold* é descido até próximo ao solo marinho de forma controlada, monitorado por sensores ou veículos de operação remota (ROV). A descida via coluna rígida é realizada para equipamentos de elevado peso, exigindo uma



embarcação tipo Sonda, que é muito mais dispendiosa que uma embarcação convencional de instalação. A instalação via cabo tende a ser mais barata, mas possui suas limitações, como a ressonância do sistema dependendo da massa e profundidade de instalação do conjunto.

- Orientação – ao se aproximar do leito marinho, é utilizado o sistema de orientação de precisão para orientação final do *manifold*. Este sistema é composto por emissores de rádio ou sonar que medem e transmitem a posição do *manifold*. Desta forma é garantido que a orientação e posição do equipamento está de acordo com o especificado para o projeto. Esta informação é especialmente importante em casos em que o equipamento possui compensação de inclinação para compensar a declividade na locação.
- Assentamento final – esta etapa deve ser realizada de forma gradual e lenta. Como o equipamento está sendo instalado em ambiente submerso, a aproximação lenta do equipamento ao solo é essencial para permitir a fuga da água. Caso contrário, a massa de água deslocada pode escavar o solo, criando vazios não considerados para a locação.
- Inspeção submarina – após o assentamento do equipamento, é realizada uma inspeção submarina para verificar a condição geral do equipamento após a instalação. Nesta etapa também é verificado o deslocamento vertical imediato do solo e a inclinação é medida através de medidores de inclinação (olho de boi) localizados na estrutura.

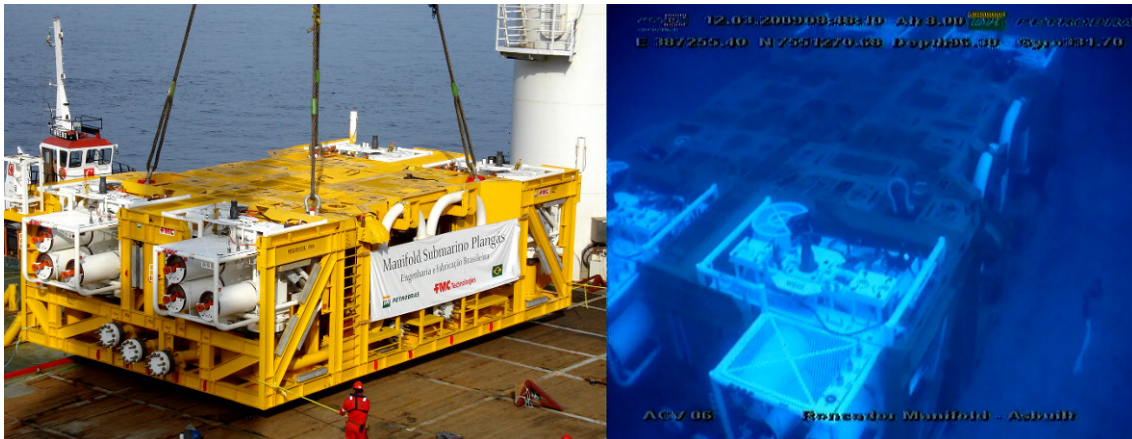
As Figuras 18 a 21 mostram o processo típico de inspeção submarina. O *manifold* mostrado foi instalado no campo de Roncador, em águas rasas (100m de profundidade), em solo arenoso e plano (0,2° de inclinação).

Os pequenos deslocamentos vistos nas Figuras 19 e 21 estão na ordem de 40mm e podem ser atribuídos: ao recalque do solo devido ao carregamento; às pequenas ondulações da superfície; ao deslocamento do solo durante a aproximação.

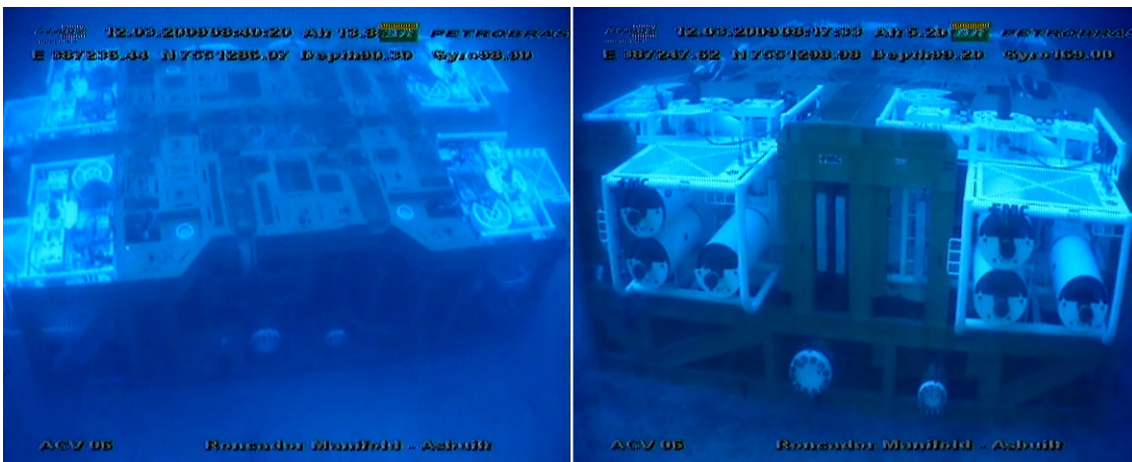
Os valores de inclinação do equipamento, verificados através da visualização dos dispositivos instalados no *manifold* (olho de boi), estão na ordem de 0,5° (verificado

através da posição da bolha dentro do olho de boi – cada intervalo faixa branca + faixa preta representa 1°). Estes valores estão condizentes com a inclinação esperada do solo.

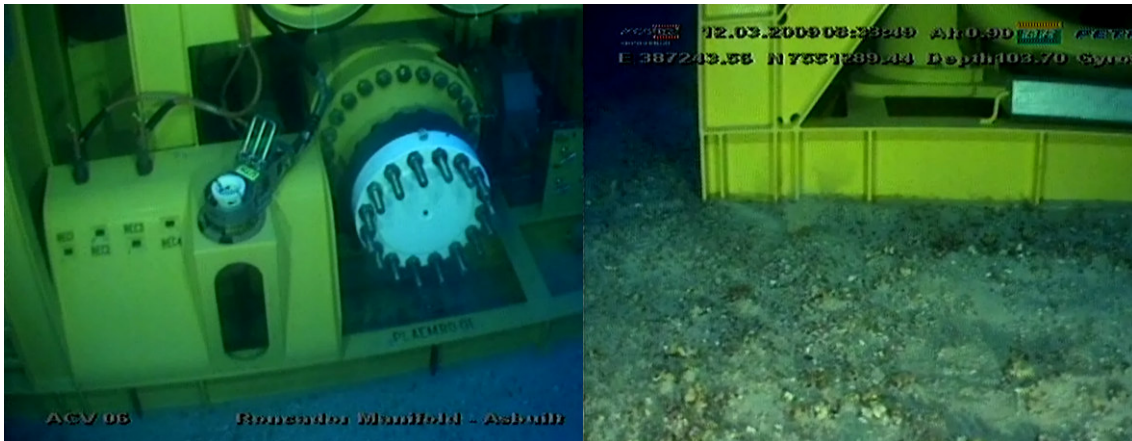
Os valores de deslocamento vertical e inclinação (rotação) encontrados neste *manifold* estão próximos dos valores típicos encontrados em instalações normais de *manifolds*.



**Figura 17. Imagens de *manifold*: (a) sendo manuseado; (b) instalado (Cortesia de Petrobras)**



**Figura 18. *Manifold* em sua posição de assentamento final (Cortesia de Petrobras)**



**Figura 19. Inspeção submarina: verificação de deslocamento vertical imediato (Cortesia de Petrobras)**



**Figura 20. Inspeção submarina: dispositivo de verificação de inclinação do equipamento (Cortesia de Petrobras)**



**Figura 21. Inspeção submarina: manifold sendo inspecionado por habitante local (Cortesia de Petrobras)**

## 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

### 3.1. Definição da geometria

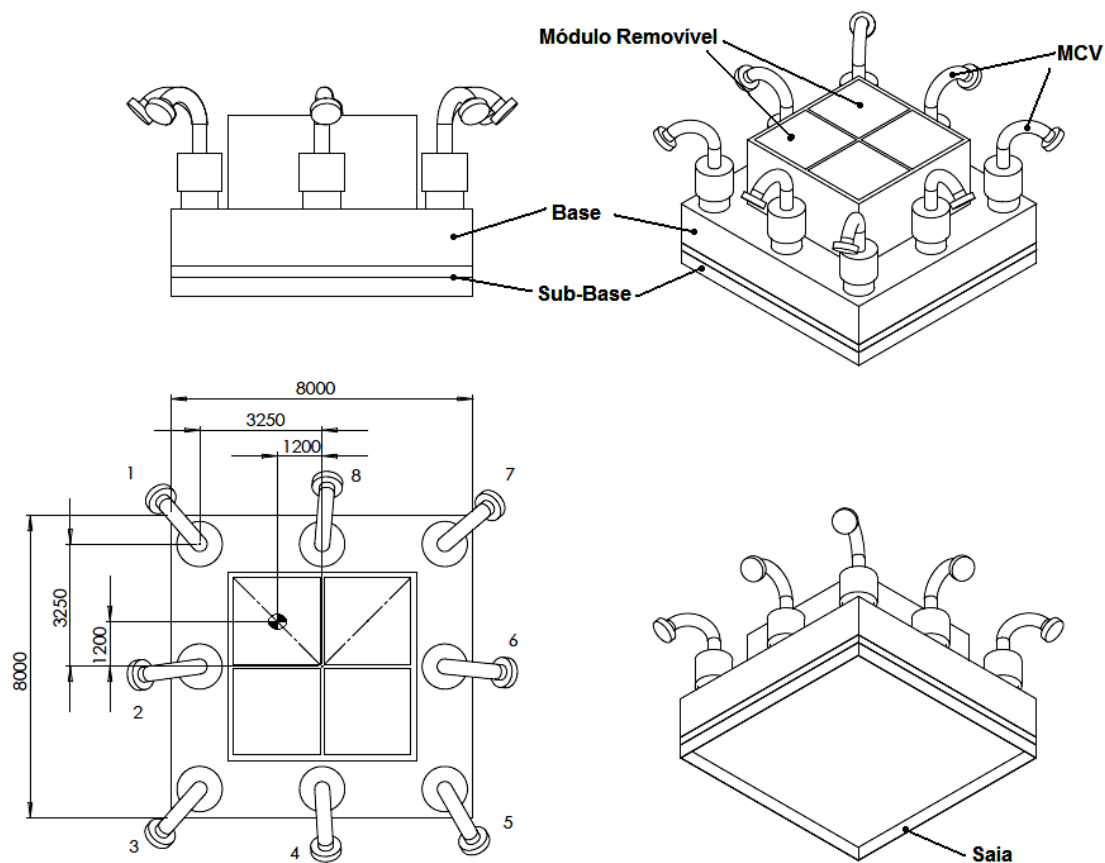
De forma a obter a geometria mais otimizada atendendo aos requisitos de projeto, é necessário que o *manifold* tenha o menor envelope que acomode geometricamente seus componentes. Isto traz uma redução de peso estrutural e total do equipamento, que se traduz diretamente em redução de custo. O *manifold*, no entanto, deve ter uma base de fundação compatível com seu peso. Desta forma, sua largura e comprimento possuem um valor mínimo que permita seu assentamento com segurança no leito marinho. Após a análise da fundação, faz-se necessário adequar o projeto de forma a atender os fatores da norma. Isto geralmente acarreta no aumento ou redução da base do *manifold*.

Para o estudo de caso desta dissertação, foi analisado um *manifold* fictício, utilizando características próximas às características usualmente encontradas em *manifolds* submarinos.

A Figura 22 mostra o *manifold* que será estudado. Foi escolhido um *manifold* com base quadrada por conta da simetria, tendo dimensões de 8m de largura e comprimento. O peso da base foi estipulado em 70 tf. O *manifold* possui 4 módulos removíveis iguais, com largura e comprimento de 1,20m e peso de 12 tf. Sua distribuição é simétrica e próxima ao centro do *manifold*. Oito MCVs são considerados pesando 4,5 tf cada e localizados na parte externa da estrutura.

A sub-base possui saia de 0,5m, sendo fabricada com espessura de 10mm. Esta chapa da saia pode ter problemas de flambagem, sendo, portanto, inseridos reforços, cuja área não é considerada nos cálculos de fundação. Foi estipulado um peso para a sub-base de 10 tf.

Somando-se o peso do *manifold*, sub-base, módulos removíveis e MCVs, obtém-se um peso total de 164tf.



**Figura 22. Manifold a ser estudado (dimensões em mm)**

### 3.2. Definição dos carregamentos

O *manifold* pode receber diferentes módulos: módulos recuperáveis e módulos de conexão.

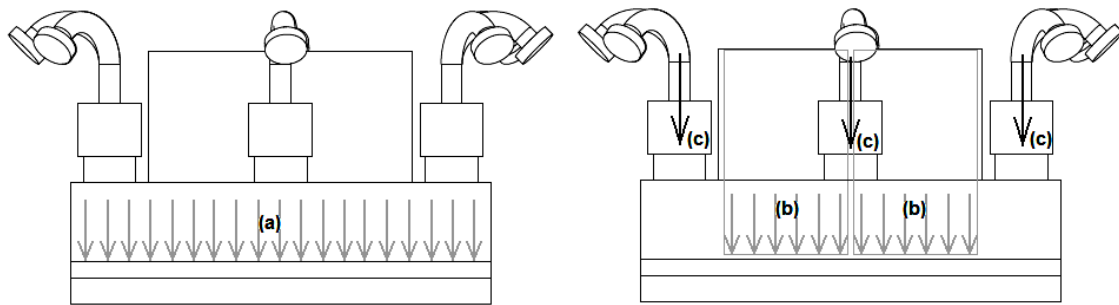
Estes módulos podem representar mais da metade do peso do *manifold*. A retirada e a inclusão destes módulos resultam em mudanças na posição do centro de gravidade do equipamento. Estas mudanças acarretam reduções da eficiência da fundação do *manifold*.

Além das inclusão e retirada dos módulos, os carregamentos incidentes sobre a fundação do *manifold* podem ser provenientes das linhas externas. As linhas externas podem ser ligadas aos *manifolds* sob diferentes formas: linhas conectadas diretamente à tubulação através de flanges e linhas conectadas aos módulos de conexão vertical.

As linhas externas causam dois tipos de carregamento no *manifold*: peso próprio da linha e cargas provenientes de expansão térmica, pressão interna, movimento da outra ponta, dentre diversos fatores.

Para o caso estudado serão considerados os seguintes carregamentos na base do *manifold*, ilustrados na Figura 23.

- (a) Peso da estrutura somado ao peso da sub-base: 80 tf - carregamento uniformemente distribuído sobre a base.
- (b) Peso dos módulos removíveis: 12 tf cada - carregamento distribuído sobre a área do módulo, cujo centro geométrico está localizado a 1,2m do centro do *manifold*.
- (c) Peso dos MCVs: 4,5 tf cada – carregamento concentrado no mandril, localizado no perímetro externo do *manifold* a 3,25m do seu centro.



**Figura 23. Ilustração dos carregamentos (a), (b) e (c) no *manifold*.**

### 3.3. Situações analisadas

O cálculo da fundação deve levar em consideração todas as situações de operação do equipamento durante sua vida útil. Desta forma, pode-se dividir a vida útil em etapas, definindo as diferentes condições de carregamento em cada etapa.

#### 3.3.1. Instalação do *manifold*

A etapa inicial do *manifold* ocorre quando este é instalado em sua localização e assentado sobre o solo marinho seguindo os parâmetros definidos para a instalação. Nesta etapa, sob o ponto de vista da fundação, é necessária a verificação da capacidade

de penetração da saia (caso presente) e a verificação da fundação considerando o peso de todos os componentes do *manifold* na forma em que foi instalado.

Geralmente na instalação, os *manifolds* (base) descem com a sub-base acoplada e com todos os módulos removíveis instalados.

Neste estudo de caso, esta condição apresenta carregamento centrado, com peso total de 128 tf.

### **3.3.2. Interligação das linhas**

Após a etapa de instalação do *manifold* é necessário interligar as linhas utilizando os MCVs de forma a fornecer suprimento hidráulico e elétrico e permitir a importação e a exportação de fluidos.

O cálculo da fundação nesta etapa deve considerar o carregamento horizontal no MCV proveniente da perda de posição da embarcação de instalação.

Além deste carregamento, nesta etapa deve ser considerada a sequência de instalação dos MCVs. Caso a instalação dos MCVs seja realizada de forma não simétrica em relação à estrutura, o carregamento sobre a fundação será assimétrico, diminuindo sua capacidade de carga.

Como normalmente durante a fase de análise da fundação a sequência de instalação é desconhecida, deve ser calculado qual combinação resulta no pior caso para a fundação.

Nesta condição o estudo de caso leva em consideração o *manifold* na condição anterior, com os MCVs 1 a 5 instalados, conforme mostrado na Figura 24. Isto leva a um desalinhamento máximo tanto na largura quanto no comprimento. O peso neste caso é de 150,5 tf.

### **3.3.3. Produção**

Na etapa de produção, a condição crítica a ser analisada é o conjunto todo montado, com todos os módulos e MCVs instalados. Esta condição corresponde ao peso máximo à qual a fundação é submetida.

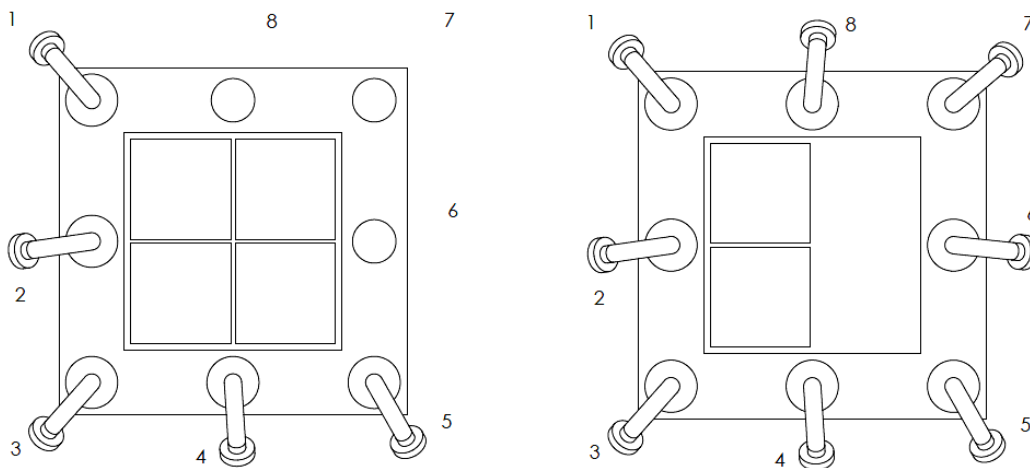
Apesar de nesta condição o carregamento ser, em geral, centralizado, este caso é bastante crítico devido ao peso total do conjunto, que no caso estudado é de 164 tf.

### 3.3.4. Final de vida – manutenção

Em algum estágio da vida do equipamento é necessário realizar a manutenção ou substituição de componentes críticos. Estes componentes críticos podem ser recuperados através da retirada dos módulos removíveis.

Apesar dos módulos estarem situados próximos ao centro da estrutura, esta condição é importante devido ao grande peso destes equipamentos.

O estudo de caso leva em consideração a retirada de 2 módulos de um mesmo lado do *manifold*, conforme mostrado na Figura 24. O peso total do conjunto nesta situação é de 140 tf.



**Figura 24. Condições desalinhas: interligação de linhas e manutenção**

### 3.4. Caracterização do solo

A composição e as características do solo marinho variam de acordo com a localização e a profundidade. As operadoras de equipamentos criam bancos de dados para a avaliação preliminar das locações onde serão instalados os equipamentos. Após a decisão da localização ideal para o equipamento, que depende do arranjo submarino, são realizadas avaliações precisas da área alvo da instalação.

Nesta etapa são realizadas microbatimetrias para avaliar com precisão a inclinação da área, são retiradas amostras para caracterização do material e efetuados ensaios geotécnicos na locação para determinar os parâmetros do solo.



A partir dos dados coletados, é feita uma análise visando a simplificação do perfil de resistência do solo (Su) de acordo com a profundidade. Este perfil é geralmente dividido em faixas com resistências diferentes, e, então considerado nos cálculos de fundação.

### 3.5. Revisão bibliográfica

Problemas geotécnicos relacionados a equipamentos submarinos têm sido alvo de diversos estudos recentes. Estes estudos são apresentados constantemente em congressos como DOT (*Deep Offshore Technology*), OTC (*Offshore Technology Conference*) e, principalmente, ISFOG (*International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*).

Dentre os trabalhos publicados nestes congressos e em outras publicações, podem ser citados alguns trabalhos relacionados à fundação de equipamentos:

- *Centrifuge tests on improving offshore foundation systems* (Allersma, 2005): este trabalho mostra o uso testes em centrífuga para análise e melhoria de novos conceitos de fundações para sistemas de fundação utilizados na indústria *offshore*.
- *An investigation into the vertical bearing capacity of perforated mudmats* (White *et al.*, 2005): descreve a investigação realizada pela Technip na qual *mudmats* sólidos e perfurados são instalados em argila mole, analisando os efeitos dos furos do *mudmat* sobre a capacidade de carga da fundação.
- *Numerical analysis of bearing capacity of foundation under combined loading* (Zhao *et al.*, 2005): descreve a análise numérica para estruturas offshore sujeitas a grandes cargas horizontais e momentos.
- *Geohazard Risk Assessment—Vulnerability of Subsea Structures to Geohazards—Some Risk Implications* (Parker *et al.*, 2009): discute a vulnerabilidade de *manifolds* submarinos à riscos geotécnicos (deslizamentos de terra e terremoto entre outros) e o efeito destes sobre a capacidade de carga da fundação e deslocamento do equipamento.

- *Failure envelopes for offshore shallow foundations under general loading* (Gourvenec, 2007): apresenta envoltórias de ruptura para equipamentos submarinos com fundações circulares com saia sob a ação de esforços horizontais, verticais e de momentos.
- *Simple prediction of the undrained displacement of a circular surface foundation on non-linear soil* (Osman *et al*, 2007): discute a aplicação de modelo não linear de solo para cálculo de fundações circulares.

## 4. MÉTODOS DE ANÁLISE

O cálculo da fundação de um equipamento de fundação rasa pode ser analítico, por meio da teoria clássica, usando parâmetros definidos por uma norma vigente; ou numérico, utilizando programas de elementos finitos. De toda forma, as recomendações de uma norma – API, DNV, NORSOK, entre outras – devem ser seguidas.

A norma aplicável para o cálculo da fundação é determinada geralmente pela operadora do campo e proprietária do equipamento. As normas mais usualmente exigidas são:

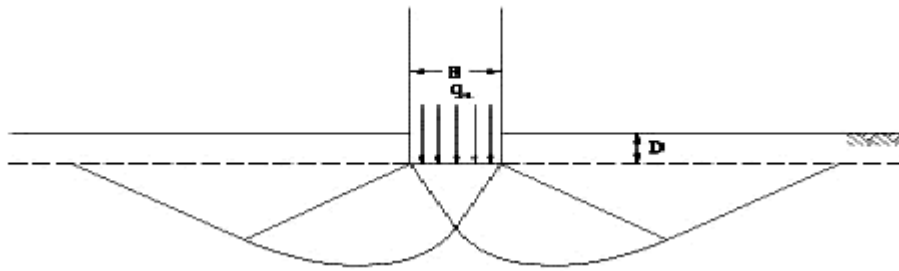
- API-RP 2A-WSD – Norma do American Petroleum Institute, geralmente adotada pelas empresas que operam no Brasil (Stock, 2007), Golfo do México e África. Esta norma foi emitida em 2000, mas já está no suplemento 3, de 2007.
- DNV-OS-C101 – Norma da Det Norske Veritas, geralmente adotada pelas empresas que operam no Mar do Norte. Norma emitida em 2008, com correções introduzidas em 2009.

A presente dissertação compara os resultados obtidos por meio de modelagem numérica com aqueles obtidos com a metodologia sugerida pela norma API. Dentro da metodologia API, também é utilizada a metodologia de superfície de ruptura para avaliação do valor de resistência ao cisalhamento do solo analisado. Esta metodologia é aceita pela indústria petrolífera brasileira.

### 4.1. Cálculo analítico

As soluções teóricas para capacidade de carga de fundações rasas são geralmente baseadas na teoria da plasticidade, onde é assumido que o solo se comporta como um material rígido plástico que falha de acordo com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Terzaghi (1943) definiu como fundação superficial aquela cuja largura  $B$  é igual ou maior que a profundidade  $D$  da base da fundação. Diversas soluções para a capacidade de carga de fundações rasas foram obtidas utilizando a teoria clássica (Velloso e Lopes, 1996). Para fundações retangulares, de largura e comprimento definidos sujeitas a carregamento vertical, a equação de Terzaghi (Terzaghi, 1943) é usualmente utilizada. O modo de ruptura para sapata retangular de acordo com Terzaghi (1943) é mostrado na Figura 25.



**Figura 25. Modo de ruptura para sapata a uma profundidade  $D$  (Terzaghi, 1943)**

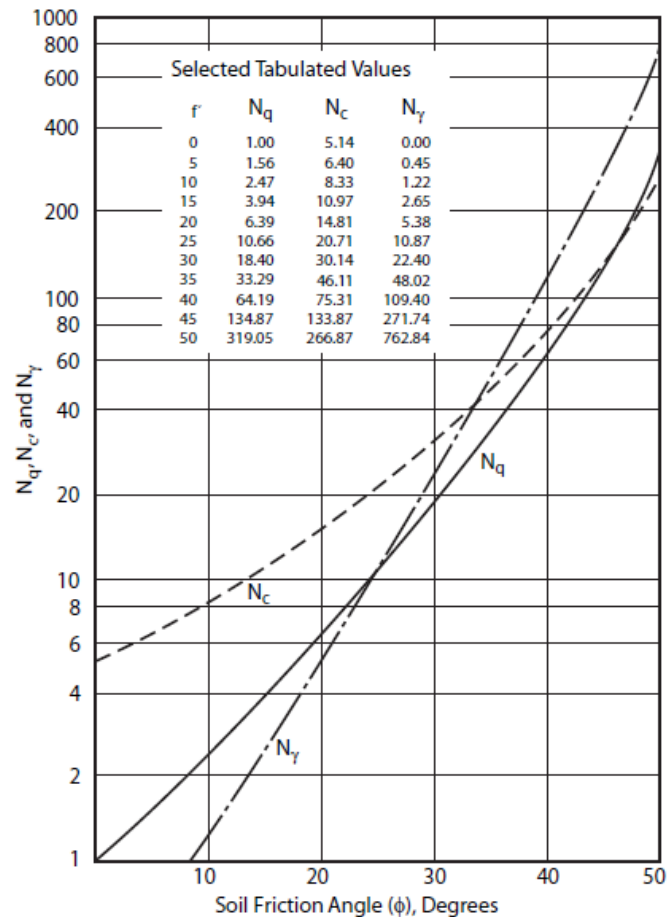
A equação de Terzaghi é dada por:

$$q_u = c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + q_s \cdot N_q \quad (4.1)$$

onde:

- $q_u$  é a pressão máxima que pode ser suportada pela fundação
- $q_s$  é a sobrepressão atuante na superfície do solo
- $B$  é a largura da fundação
- $\gamma$  é o peso específico do solo abaixo do nível da fundação
- $c$  é a coesão do solo
- $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$  são fatores de capacidade de carga que dependem do ângulo de atrito do solo,  $\phi$ .

Os valores para  $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$  propostos pela API(2007) são mostrados na Figura 26.



**Figura 26. Fatores de capacidade de carga para fundação (API, 2007)**

A fórmula de Terzaghi é constituída por três termos. O primeiro é proveniente da resistência coesiva do material. O segundo termo vem do peso próprio do material. O terceiro termo considera a aplicação de uma pressão no nível da fundação.

#### 4.1.1. API

A norma API- RP 2A-WSD recomenda uma formulação simplificada da fórmula de Terzaghi visando facilitar sua aplicação na indústria.

O caso estudado é a capacidade de carga não drenada ( $\phi=0$ ). Neste caso, para sapatas retangulares, a API sugere que a máxima capacidade de carga vertical que uma fundação pode suportar seja calculada pela equação:

$$Q = (c \cdot N_c \cdot K_c + \gamma \cdot D) A' \quad (4.2)$$

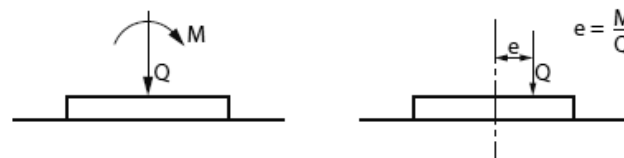
onde:

- $Q$  é a máxima carga vertical para ruptura
- $N_c$  é fator de carga, sendo 5.14 para  $\phi=0$
- $\phi$  é o ângulo de atrito do solo não drenado = 0
- $D$  é a profundidade da fundação
- $A'$  é a área efetiva da fundação, dependendo da excentricidade da carga
- $K_c$  é um fator de correção, que leva em consideração a inclinação da carga, forma da fundação, profundidade de assentamento da fundação, inclinação da base e inclinação da superfície do solo.

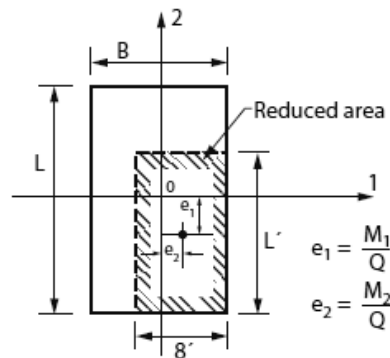
Para o cálculo da área equivalente, utilizam-se os comprimentos equivalentes  $L'$  e  $B'$ , que são calculados considerando uma excentricidade equivalente ao momento aplicado:

$$\begin{aligned} L' &= L - 2 \cdot e_1 \\ B' &= B - 2 \cdot e_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

As excentricidades  $e_1$  e  $e_2$  são calculadas da forma mostrada na Figura 27.



(A) Equivalent Loadings



(B) Reduced Area—Rectangular Footing

**Figura 27. Fundações carregadas de forma excêntrica (API, 2007)**

Para o cálculo do fator  $K_C$ , a API sugere:

$$K_C = i_C \cdot s_C \cdot d_C \cdot b_C \cdot g_C \quad (4.4)$$

onde, para  $\phi=0$ :

$$i_C = 1 - \frac{m \cdot H}{B' \cdot L' \cdot c \cdot N_C}$$

$$s_C = 1 + \left( \frac{B'}{L'} \right) \cdot \left( \frac{N_q}{N_C} \right)$$

$$d_C = d_q - \frac{1 - d_q}{N_C \cdot \tan(\phi)}$$

$$b_C = 1 - \frac{2 \cdot \alpha}{N_C}$$

$$g_C = 1 - \frac{2 \cdot \beta}{N_C}$$

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\phi) \cdot (1 - \sin(\phi))^2 \cdot \frac{D}{B'} \quad (4.5)$$

sendo:

- H a componente horizontal dos esforços na fundação
- $m = B'/L'$
- $N_q = 1$  para  $\phi=0$
- $\alpha$  é a inclinação da base
- $\beta$  é a inclinação do solo

Para a condição de fundação rasa, sem inclinação da base e do solo e carregamento vertical, a equação 4.2 fornece:

$$Q = c \cdot N_C \cdot \left[ 1 + 0.2 \cdot \left( \frac{B'}{L'} \right) \right] \cdot A' \quad (4.6)$$

Para deslocamentos verticais, é sugerido o cálculo, válido para fundações circulares, com:

$$u_v = \left( \frac{1 - \nu}{4 \cdot G \cdot R} \right) \cdot Q \quad (4.7)$$

Para rotações, é sugerido o cálculo com:

$$\tan(\theta) = \left[ \frac{3(1 - \nu)}{8G \cdot R^3} \right] \cdot M \quad (4.8)$$

onde:

- M é o momento aplicado na fundação
- G é o módulo de cisalhamento (elástico) do solo
- $\nu$  é o coeficiente de Poisson do solo
- R é o raio equivalente da fundação

#### **4.1.2. Resistência média na superfície de ruptura**

O método API leva em consideração a resistência da camada de solo imediatamente abaixo da fundação. O solo analisado, em sua maioria, possui resistência ao cisalhamento crescente com a profundidade. Levando em consideração o modo de ruptura do solo, nota-se que a área de influência da fundação estende-se além da área próxima à fundação.

Desta forma, uma metodologia de aproximação da resistência ao cisalhamento real foi sugerida, e é aceita pelo CENPES. Esta metodologia utiliza uma média ponderada da resistência de cada camada de solo afetada pela superfície de ruptura. O valor obtido por esta média ponderada é utilizado como valor de resistência ao cisalhamento e é aplicado à formulação sugerida pela API para o cálculo da capacidade de carga e deslocamentos.

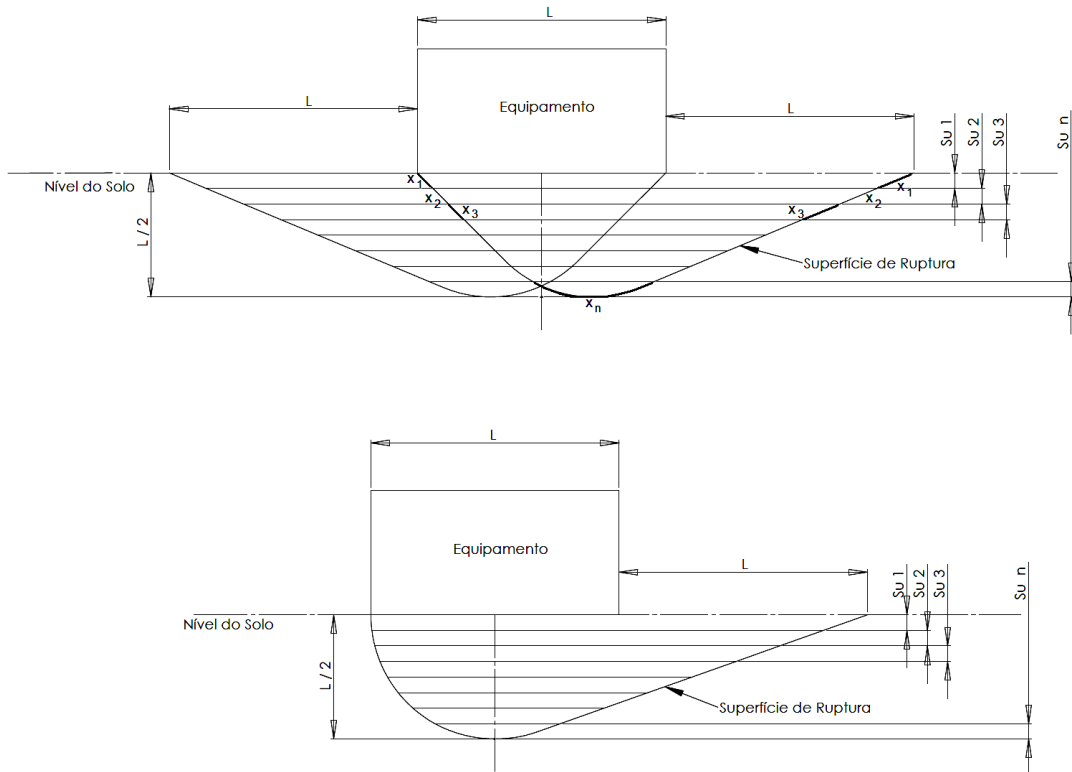
A Figura 28 mostra a aproximação realizada para encontrar o valor equivalente de capacidade de cisalhamento.

Considerando um equipamento retangular, a superfície de ruptura em questão é discretizada para a realização da média ponderada. A média é realizada através do



somatório dos comprimentos discretizados ( $x_1, x_2, x_3... x_n$ ) multiplicados pela resistência não drenada do solo na área discretizada ( $Su_1, Su_2, Su_3... Su_n$ ) e divididos pelo comprimento total da superfície:

$$Su_{\text{médio}} = \frac{x_1 \cdot Su_1 + x_2 \cdot Su_2 + x_3 \cdot Su_3 .. x_n \cdot Su_n}{x_1 + x_2 + x_3 .. x_n} \quad (4.9)$$



**Figura 28. Aproximação e discretização das superfícies de ruptura: carregamentos centralizados e excêntricos**

Esta solução, embora aproximada, resulta em valores mais próximos à condição real, como será mostrado nos capítulos seguintes.

## 4.2. Análise numérica

A análise numérica é realizada utilizando o programa comercial PLAXIS 2D v8.2, da PLAXIS B.V., empresa baseada em Delft, na Holanda. Este programa é um pacote

de elementos finitos com o propósito de analisar deslocamentos e estabilidade para problemas de engenharia geotécnica. Foi desenvolvido em cooperação com a Universidade de Tecnologia de Delft e o Ministério Holandês de Trabalhos Públicos.

O programa possui uma interface gráfica para entrada da geometria do problema. São utilizados elementos de barra, placa, rótula, geogrelha, interfaces, âncoras e túneis para a entrada da geometria no programa.

Para a entrada de carregamentos, o programa permite a utilização de forças distribuídas, forças pontuais, deslocamentos prescritos. As condições de contorno mecânicas são definidas através restrições às translações (em x e/ou y) e às rotações. As condições de contorno hidráulicas são definidas através de drenos e poços.

Possui geração automática de malha, permitindo refinamento em áreas ou linhas selecionadas pelo usuário. A malha gerada forma elementos triangulares. Os elementos podem ser do tipo triangular de 6 nós ou 15 nós.

Elementos triangulares de 6 nós são bastante precisos e resultam em resultados satisfatórios em análises com o número suficiente de elementos. Elementos triangulares de 15 nós são muito precisos e produzem resultados de alta qualidade para problemas difíceis, mas exigem maior capacidade computacional.

Dentre os diferentes modelos de solo, o programa permite a utilização dos modelos: linear elástico, Mohr-Coulomb, rocha unida, solo compactado, entre outros. A aproximação do modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb é o modelo geralmente empregado para análises de solo. Para a resolução do problema, o programa permite três tipos básicos de cálculo:

- Cálculo plástico: utilizado para realização de análise de deformação elasto-plástica na qual não é necessário levar em consideração a redução do excesso de poro pressão com o tempo. Se a opção *Updated Mesh* (malha atualizada) não for selecionada, o cálculo é realizado de acordo com a teoria de pequenas deformações. Este tipo de cálculo é apropriado para a maioria das aplicações geotécnicas.
- Análise de consolidação: utilizado quando é necessário analisar a formação ou dissipação de excesso de poro pressão em solos saturados como função do tempo.

- Redução Phi-c: utilizado para calcular o fator de segurança global da situação simulada, obtida através da redução dos parâmetros de rigidez do solo. Este tipo de cálculo não deve ser utilizado com tipos avançados de solo.

Estes tipos de cálculo podem ser realizados como uma análise de malha atualizada (*Updated Mesh*), de forma a levar em consideração os efeitos de grandes deformações. Este tipo de análise deve ser considerado quando é esperado que as deformações influenciem significativamente a geometria do problema.

O Plaxis oferece em pacote separado, o módulo PLAXIS Dynamics, a opção de análises dinâmicas de problemas geotécnicos (terremotos, por exemplo). Este tipo de análise não se faz necessário para o problema em questão.

Para o problema estudado foi realizada uma análise de estado plano de deformações, utilizando elemento triangular de 15 nós e o solo argiloso segundo um modelo elasto-plástico com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O cálculo foi realizado utilizando a opção de cálculo plástico com malha atualizada.

A análise axissimétrica é a mais indicada para a avaliação de deformações verticais. Apesar disto, foi escolhida a análise plana devido aos casos de carregamento descentralizado, que não poderiam ser simulados através de análise axissimétrica. Uma comparação de resultados de deformação para diferentes análises é mostrada no Apêndice A.6.

As funções de interpolação, metodologia de cálculo e processo iterativo estão descritos no capítulo 5 do Manual Científico (PLAXIS, 2002) que acompanha o programa.

## 5. ANÁLISES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados analíticos e numéricos realizados. Em seguida, comparações e comentários sobre os resultados obtidos são apresentados.

### 5.1. Análises realizadas

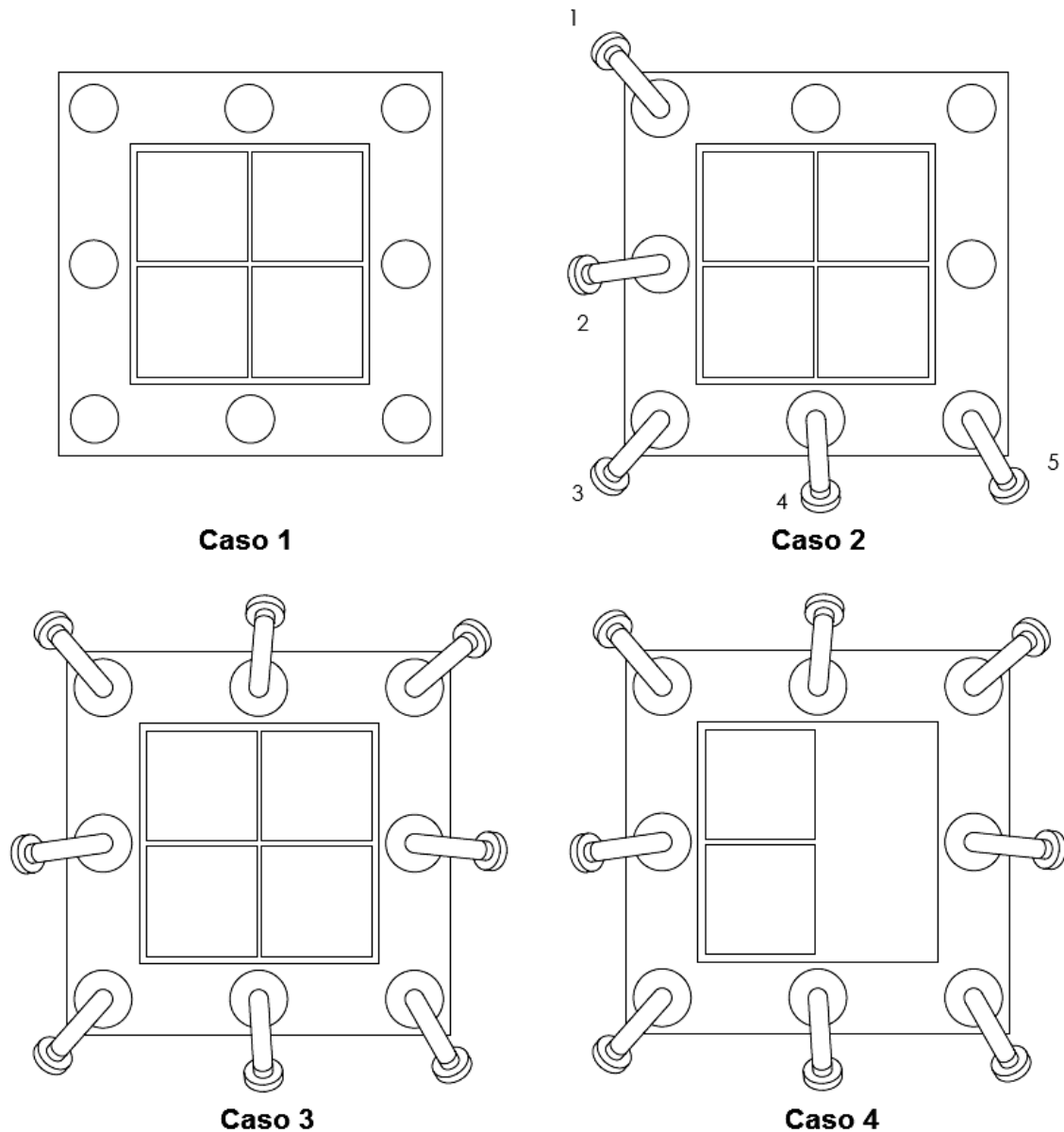
Analisando-se as condições recomendadas pela Norma API e as condições críticas de acordo com os cálculos analíticos, as condições descritas na seção 3.3 e mostradas na Figura 29 foram analisadas:

- Caso 1: Instalação do *manifold* – carregamento centralizado com peso total de 128 tf.
- Caso 2: Interligação das linhas – carregamento excêntrico com peso total de 150,5 tf.
- Caso 3: Produção – carregamento centralizado com peso total de 164 tf.
- Caso 4: Manutenção – carregamento excêntrico com peso total de 140 tf.

Para cada caso, a análise numérica foi realizada considerando o *manifold* com a saia e sem a saia. A influência da altura da saia sobre a capacidade de carga da fundação também foi estudada utilizando a análise numérica.

Para os dados de solo, foram considerados valores informados para o Campo de Roncador, na Bacia de Campos:

- $S_u = 5$  kPa para profundidades de 0 a 2m;
- $S_u = (2 + 1,5h)$  kPa, para profundidades superiores a 2m, sendo h a profundidade.



**Figura 29. Casos analisados para a vida útil do equipamento**

## 5.2. Cálculo Analítico

O cálculo analítico foi realizado de acordo com a metodologia recomendada pela Norma API utilizando planilha de cálculo eletrônica no programa StudyWorks 2002 da MathSoft (©1986-2001 MathSoft Engineering & Education, Inc.).

Além do cálculo realizado utilizando o parâmetro de resistência do solo definido pela Norma API, foi considerado também o valor de resistência obtido segundo a teoria de superfície de ruptura. O resultado do cálculo é apresentado sob a forma de Fator de

Segurança entre a tensão aplicada sobre a fundação em cada condição e a capacidade total da fundação. Também são calculados valores aproximados para deslocamento vertical imediato do solo.

A memória de cálculo analítica é apresentada no Apêndice A.1. Os resultados desta análise estão resumidos na Tabela 1. As rotações da base nos casos 2 e 4, com excentricidades, são fornecidas na Tabela 2.

**Tabela 1. Resultados do cálculo analítico**

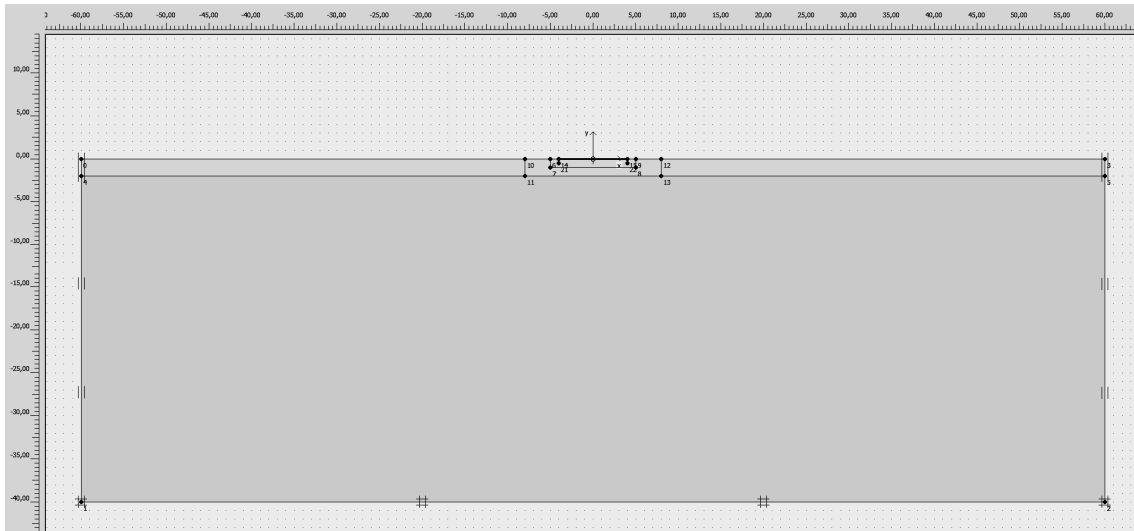
Caso	Condição	Pesos considerados	Peso (tf)	Analítico API		Analítico Superfície de Ruptura	
				FS	desloc. (mm)	FS	desloc. (mm)
1	Instalação do <i>manifold</i>	peso próprio, 4 módulos	128	1,57	55,0	1,88	46,0
2	Mcvs desalinhados	peso próprio, 4 módulos, 5 mcvs	150,5	1,16	68,0	1,39	56,8
3	<i>Manifold</i> completo	peso próprio, 4 módulos, 8 mcvs	164	1,15	70,5	1,38	58,9
4	Todos mcvs, sem 2 mód	peso próprio, 2 módulos, 8 mcvs	140	1,20	63,5	1,44	53,0

**Tabela 2. Rotações da base para os carregamentos excêntricos**

CASO	Analítico API	Analítico Superfície de Ruptura
2	0,0616°	0,0515°
4	0,0612°	0,0511°

### 5.3. Análise numérica

A análise numérica foi conduzida no Plaxis utilizando modelo de placa simulando uma dimensão característica do *manifold* e a saia, conforme pode ser observado na Figura 30.



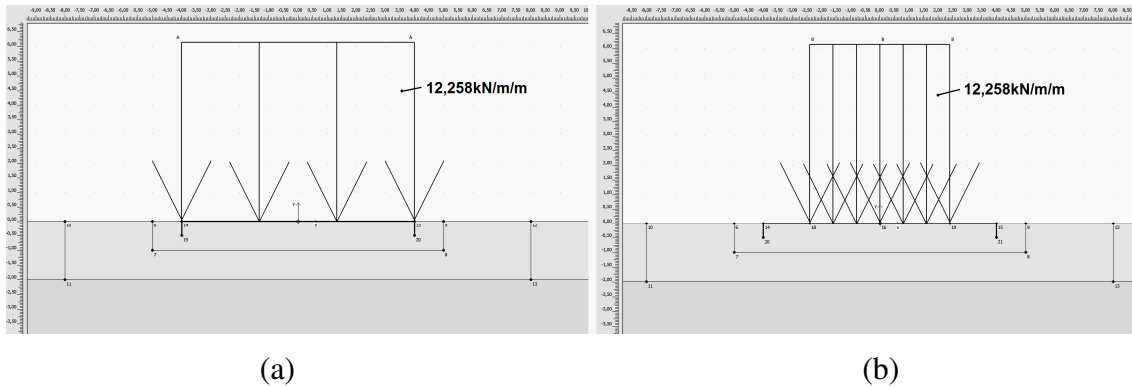
**Figura 30. Modelo da análise numérica com o PLAXIS.**

### **5.3.1. Aplicação de carregamentos**

O carregamento proveniente do peso próprio do conjunto base e sub-base foi representado através de carregamento distribuído por toda a largura da placa. Por se tratar de um modelo plano, o peso do conjunto é dividido pelo comprimento em que é aplicado (8m) e pela profundidade a ser simulada (8m), resultando em uma carga distribuída de 12,258 kN/m/m.

No caso dos módulos, o peso de 2 módulos removíveis são distribuídos em um comprimento de 1,2m, sendo a carga distribuída calculada usando o peso dos 2 módulos dividido pela área de atuação (1,2m) e pela profundidade a ser simulada (8m). A carga distribuída resultante é de 12,258 kN/m/m.

A aplicação dos carregamentos distribuídos é mostrada na Figura 31.

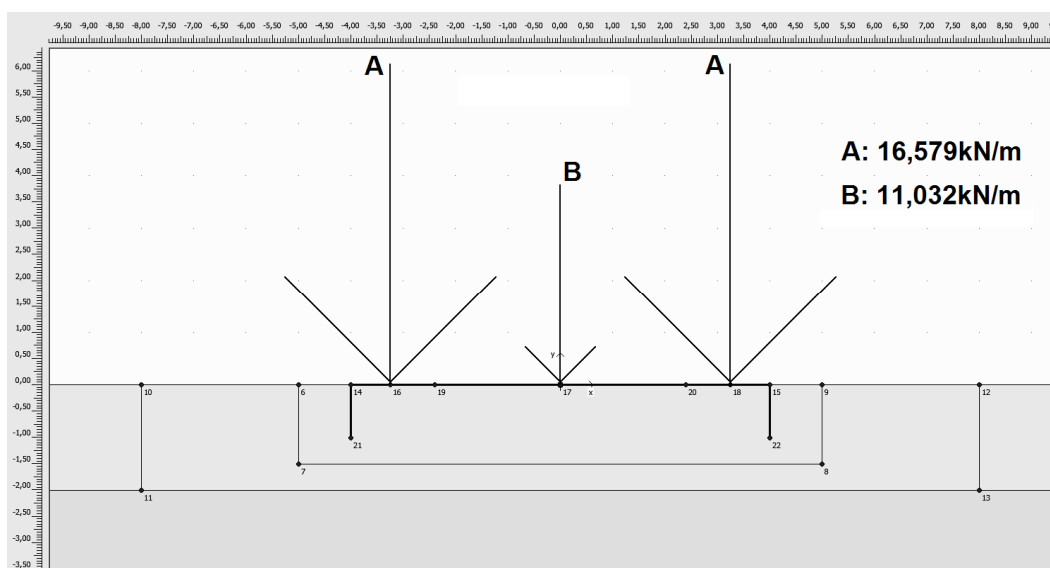


**Figura 31. Aplicação de cargas distribuídas: (a) peso do conjunto base e sub-base; (b) peso dos módulos.**

Considerando o modelo 2D, o peso dos MCVs, para as condições analisadas, é aplicado em três pontos representando a posição dos mandris de conexão. Novamente consideram-se os pesos dos equipamentos distribuídos pela profundidade simulada (8m), resultando nos carregamentos:

- 1 MCV: 5,516 kN/m
- 2 MCVs: 11,032 kN/m
- 3 MCVs: 16,579 kN/m

A Figura 32 mostra a aplicação dos carregamentos pontuais provenientes dos MCVs no modelo numérico.



**Figura 32. Carregamentos dos MCVs aplicados no modelo**



### 5.3.2. Procedimento da análise numérica

A análise numérica é dividida em 3 etapas, conforme mostrado na Figura 33.

A primeira etapa da análise (*Initial phase*) calcula as tensões in situ no solo de fundação. A segunda etapa (*Phase 1*) calcula o comportamento do solo e da estrutura devido ao carregamento definido.

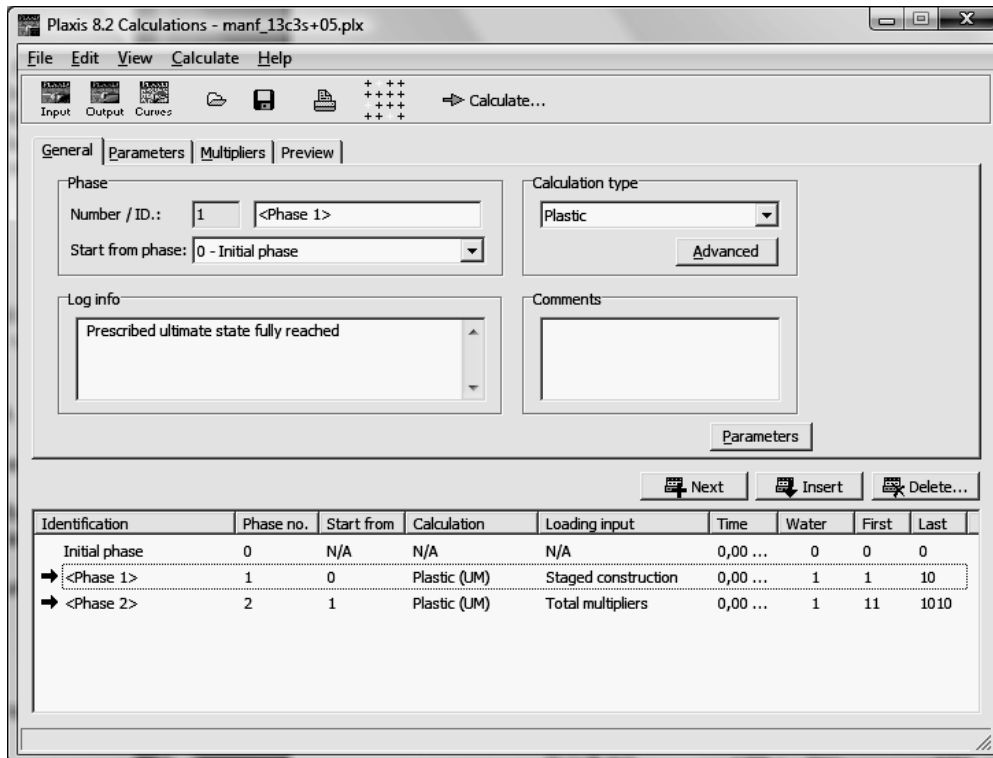
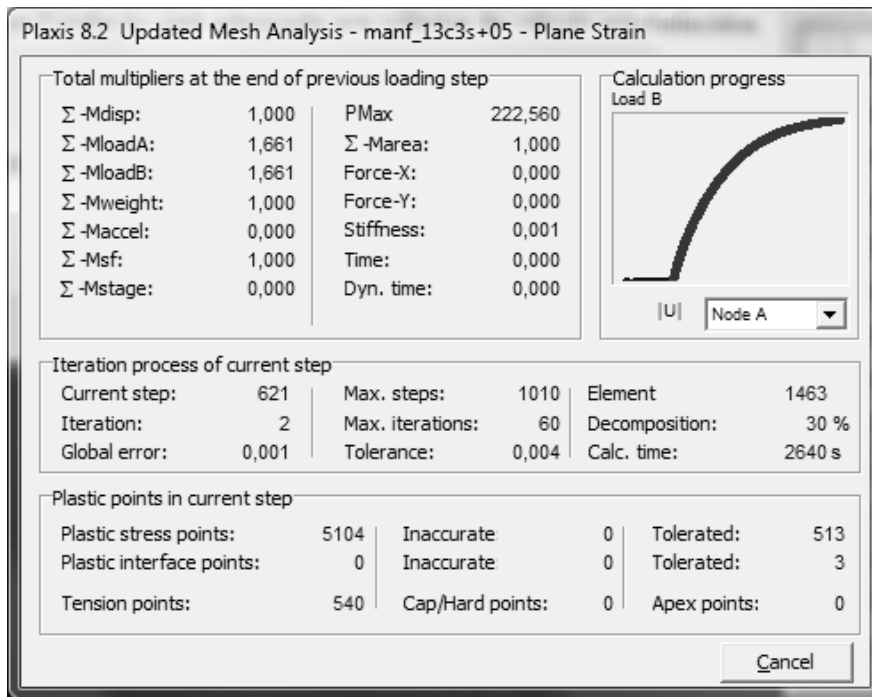


Figura 33. Etapas de cálculo do Plaxis para as análises realizadas

Na terceira etapa da análise (*Phase 2*) o programa multiplica os carregamentos aplicados na etapa 2 por um fator definido pelo usuário até que haja a ruptura do solo ou parada do cálculo por algum parâmetro da simulação (finalização do número de passos determinado, chegada ao fator de multiplicação do cálculo, erro numérico, etc.). A determinação do fator de multiplicação da carga pode ser estimado utilizando os resultados dos cálculos analíticos. A Figura 34 apresenta a janela aberta pelo PLAXIS durante a execução da etapa 3.



**Figura 34. Exemplo de cálculo da etapa 3 em andamento.**

### 5.3.3. Parâmetros do solo

Seguindo os parâmetros definidos para o solo, o modelo é dividido em duas faixas de solo, nas quais a capacidade varia de acordo com os parâmetros:

- Profundidade de 0 a 2 m:  $S_u = 5 \text{ kPa}$ .
- Profundidades superiores a 2 m:  $S_u = (2 + 1,5h) \text{ kPa}$ , onde  $h$  é a profundidade.

Para o módulo de elasticidade adotou-se  $E = 400 S_u$ . A influência do módulo de elasticidade no resultado numérico é discutida no Apêndice A.4.

O valor do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) para solos não drenados varia entre 0,49 e 0,50. Este valor é adotado internamente pelo Plaxis, sendo o valor de 0,3 inserido como dado de entrada (Figura 35) para evitar erros numéricos do programa.

O modelo composto das 2 camadas de solos pode ser observado na Figura 30. A Figura 35 mostra as propriedades adotadas para as duas camadas de solo consideradas no modelo numérico.

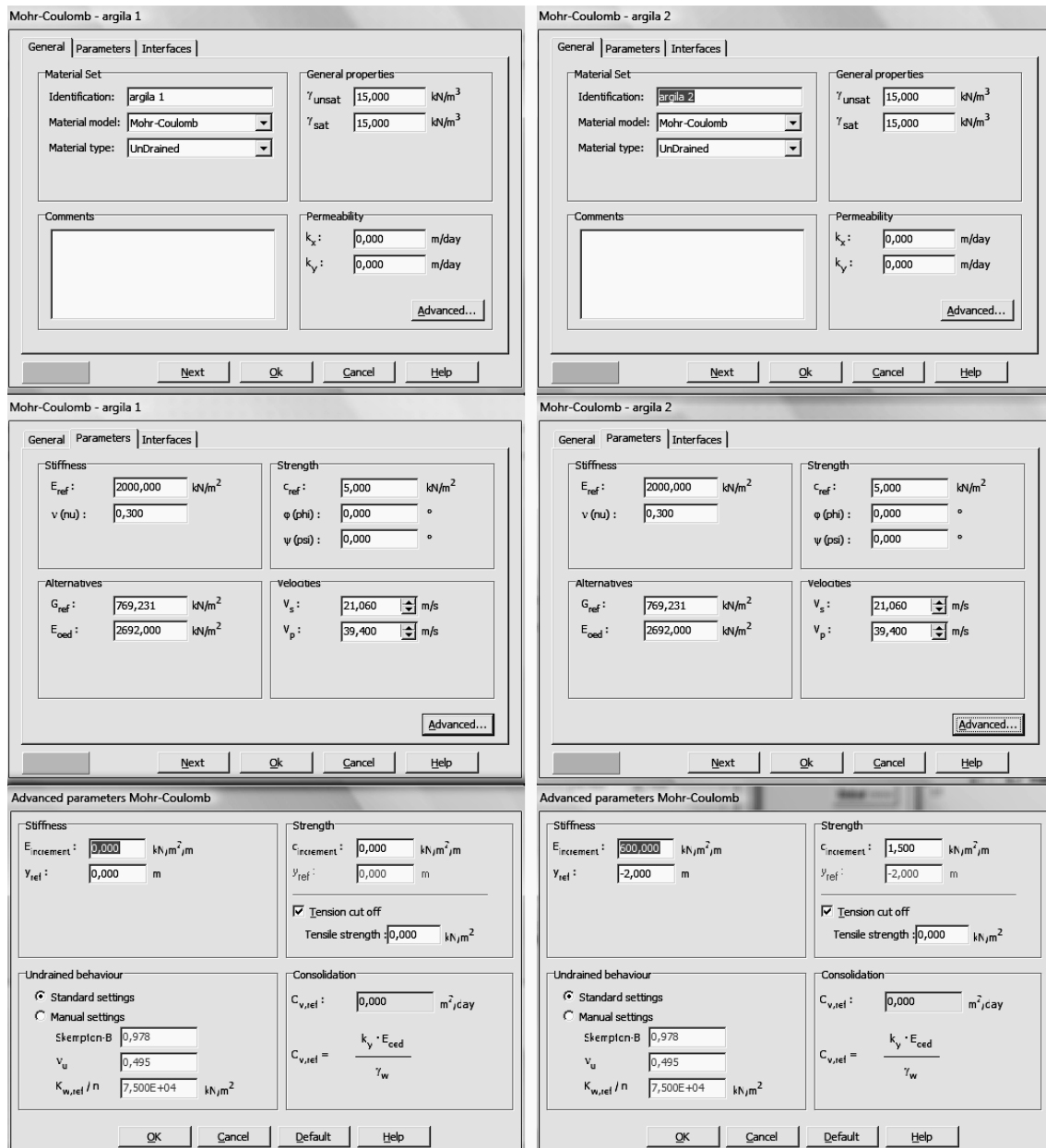
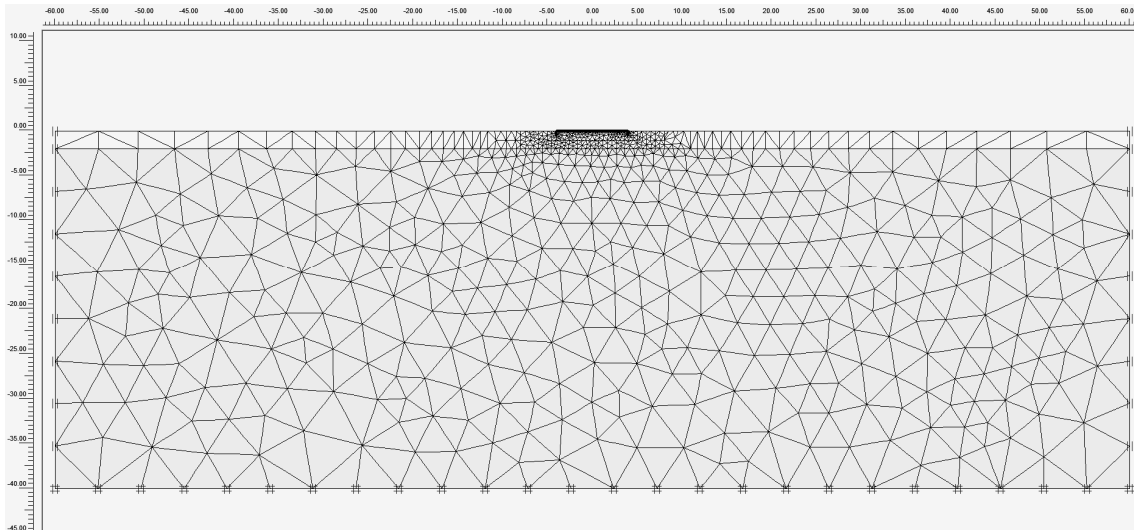


Figura 35. Propriedades das duas faixas de solo modelados.

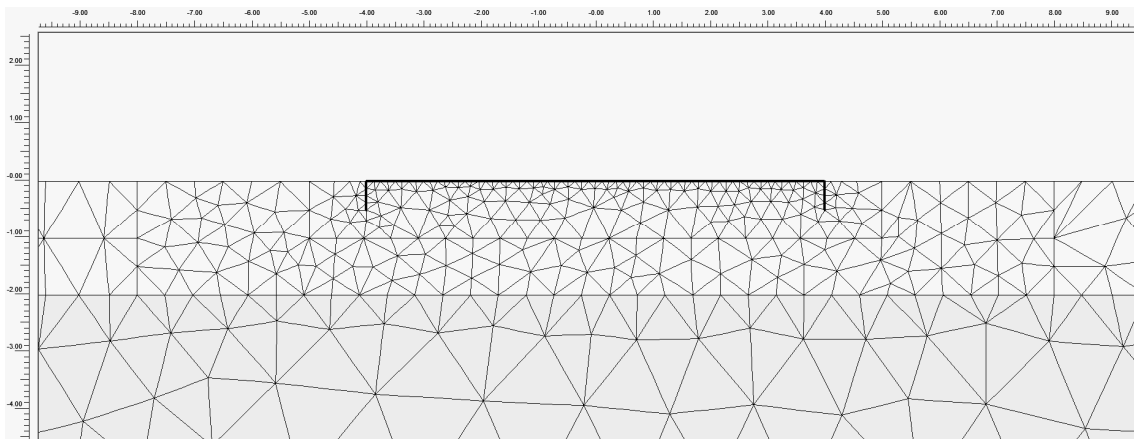
### 5.3.4. Condições de contorno e malha

O modelo foi gerado centralizado no ponto [0,0] da área de cálculo. O solo modelado foi delimitado entre os pontos [-60,0], [60,0], [60,-40], [-60,-40], totalizando uma área de 120 m de largura com 40 m de profundidade. O estudo realizado para determinação dos limites do modelo encontra-se no Apêndice A.2. Os deslocamentos horizontais foram impedidos nos limites verticais do modelo e todos os deslocamentos foram impedidos na base. Estas condições de contorno encontram-se representadas na Figura 30.

Para evitar excesso de elementos e economizar tempo de cálculo, a malha (Figura 36) foi gerada de forma a permitir maior refinamento na região próxima à estrutura. Este maior refinamento da malha (Figura 37) foi obtido através da divisão da área total em áreas menores, como pode ser visto nas Figuras 30 e 32.



**Figura 36. Malha gerada para o modelo.**



**Figura 37. Detalhe do refinamento da malha na área próxima ao equipamento.**

Uma análise de sensibilidade do resultado do cálculo numérico em função do refinamento da malha encontra-se no Apêndice A.3.

### **5.3.5. Resultados das análises numéricas**

As Tabelas 3 e 4 mostram os resultados das análises numéricas para os 4 casos, com e sem saia. Os deslocamentos verticais mostrados na Tabela 3 são os deslocamentos máximos encontrados no modelo, geralmente medidos em uma das

extremidades do equipamento. A Tabela 4 apresenta o deslocamento vertical em ambos os lados do equipamento, calculando a partir destes valores o deslocamento médio e a inclinação resultante.

**Tabela 3. Resumo dos resultados das análises numéricas**

CASO	Peso (tf)	Numérico sem saia		Numérico com saia	
		FS	desloc. (mm)	FS	desloc. (mm)
1	128	1,94	24,9	2,08	23,2
2	150,5	1,62	40,3	1,72	34,6
3	164	1,43	37,5	1,54	33,2
4	140	1,70	37,4	1,79	32,6

**Tabela 4. Resultados das análises numéricas das rotações**

CASO	Numérico sem saia				Numérico com saia			
	Desloc. lado 1	Desloc. lado 2	Desloc. médio	Inclinação	Desloc. lado 1	Desloc. lado 2	Desloc. médio	Inclinação
2	40,3	22,4	31,4	0,1282°	34,6	21,8	28,2	0,0917°
4	37,4	21,7	29,6	0,1124°	32,6	21,1	26,9	0,0824°

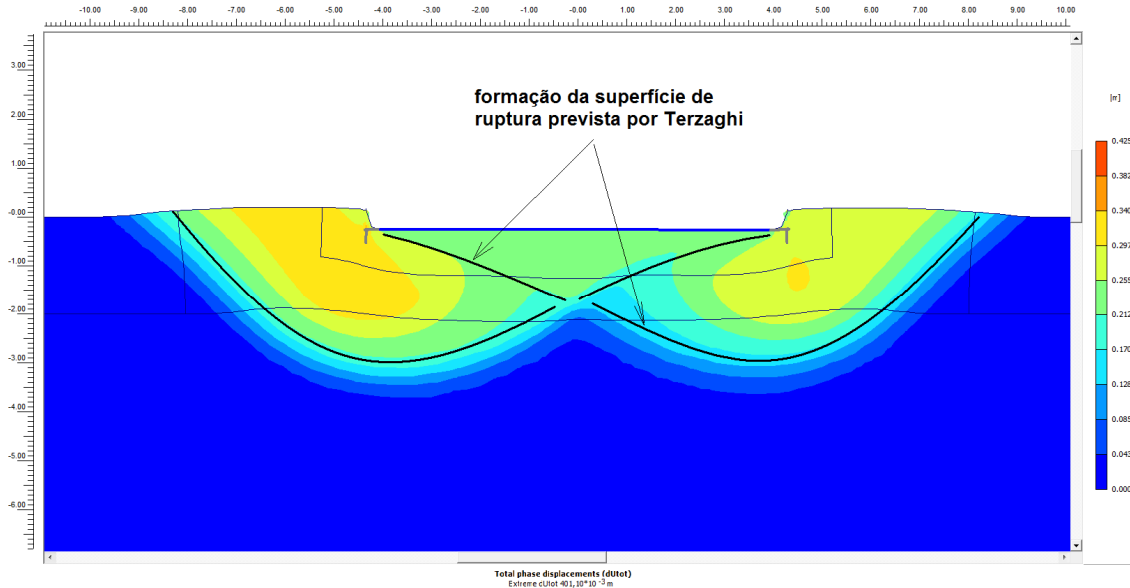
Os resultados serão apresentados sob a forma de gráfico de multiplicador por deslocamento. O multiplicador é o fator que o Plaxis aplica ao carregamento de projeto até atingir a ruptura do solo. Nas presentes análises, o multiplicador pode ser traduzido diretamente como o fator de segurança. Esta correlação direta ocorre pois o carregamento de projeto é o único carregamento sobre o solo, já que a estrutura foi modelada através de placa com peso linear igual a zero.

As Figuras 39 a 50 apresentam para cada caso os gráficos de multiplicadores e as curvas de deslocamento vertical. Estas curvas mostram a influência da saia sobre o comportamento do solo para um mesmo caso. Nestas figuras também é possível visualizar a diferença de comportamento do solo com carregamento centralizado (casos 1 e 3) e excêntrico (casos 2 e 4).

Os deslocamentos máximos encontrados também podem ser verificados nos gráficos de multiplicadores. Os valores das rotações e dos deslocamentos médios do

solo nos casos de carregamento excêntrico foram calculados a partir dos deslocamentos de ambos os lados do modelo.

A Figura 38 mostra o gráfico de deformações para uma das análises numéricas, onde pode ser notada a formação da superfície de ruptura prevista por Terzaghi (1943)



**Figura 38. Resultado de análise numérica mostrando a formação da superfície de ruptura prevista por Terzaghi (1943)**

### 5.3.5.1. Caso 1

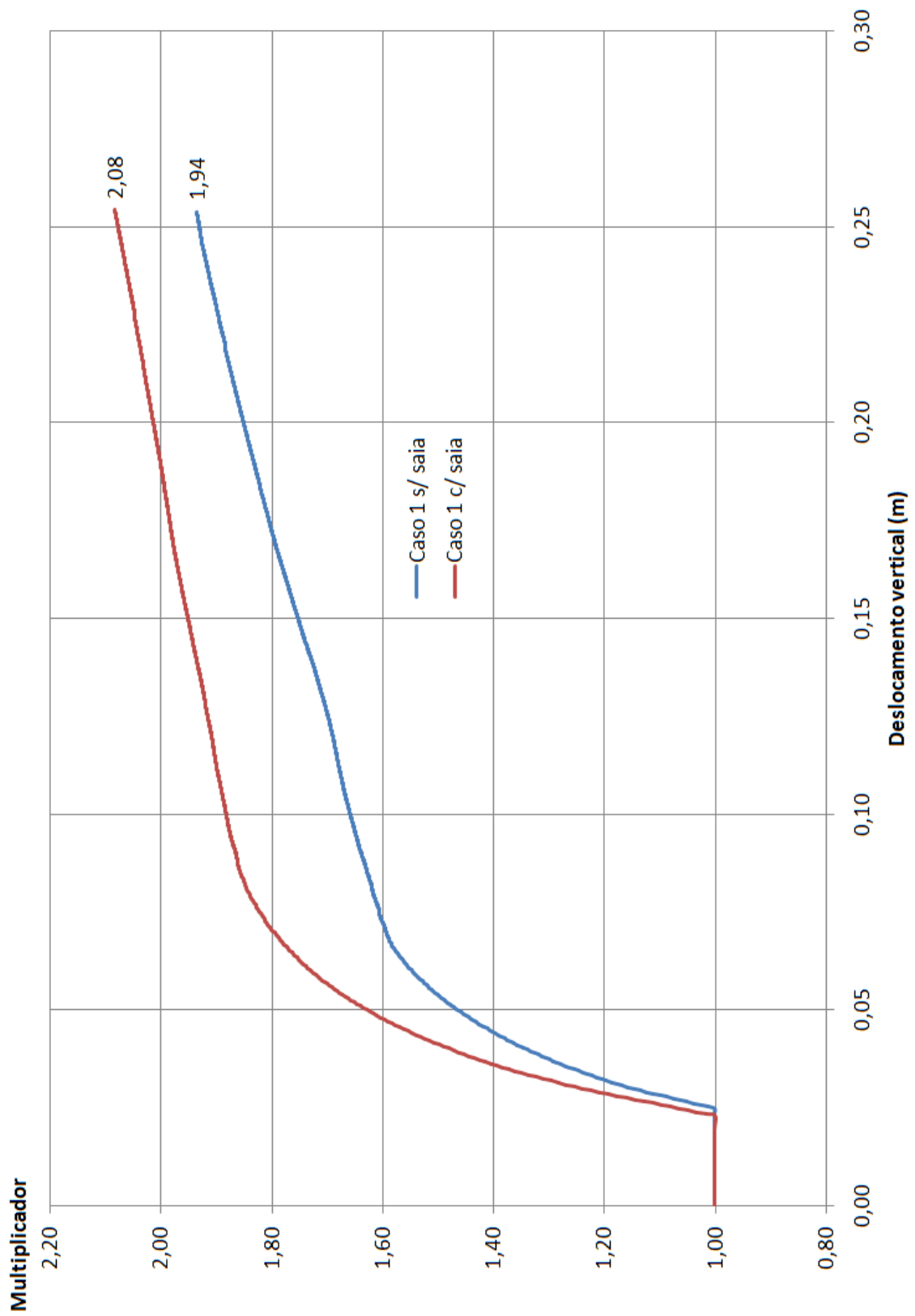
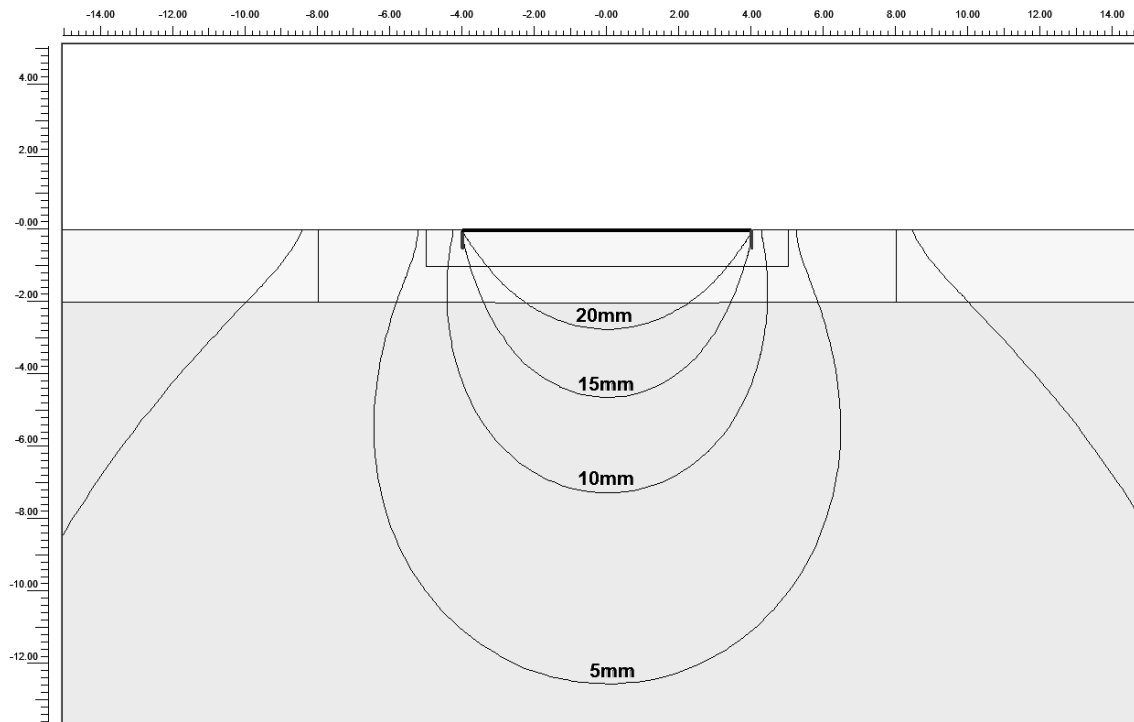
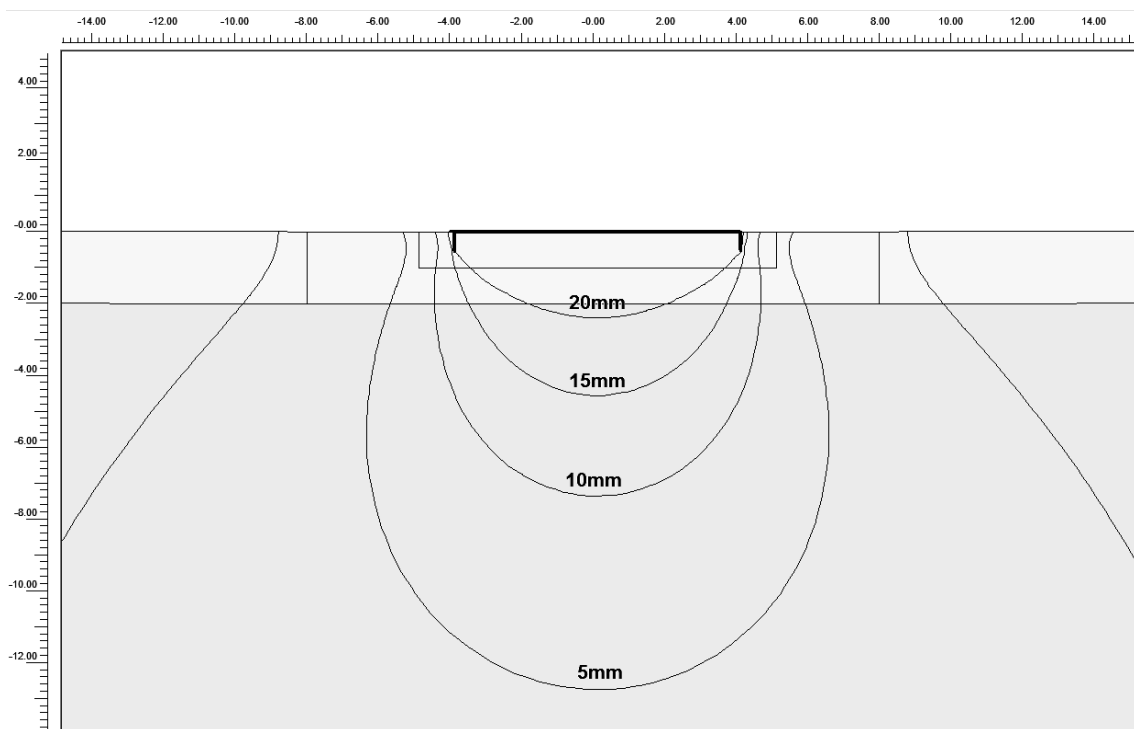


Figura 39. Multiplicador por deslocamento para o Caso 1 com e sem saia



**Figura 40. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 1 sem saia**



**Figura 41. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 1 com saia**



### 5.3.5.2. Caso 2

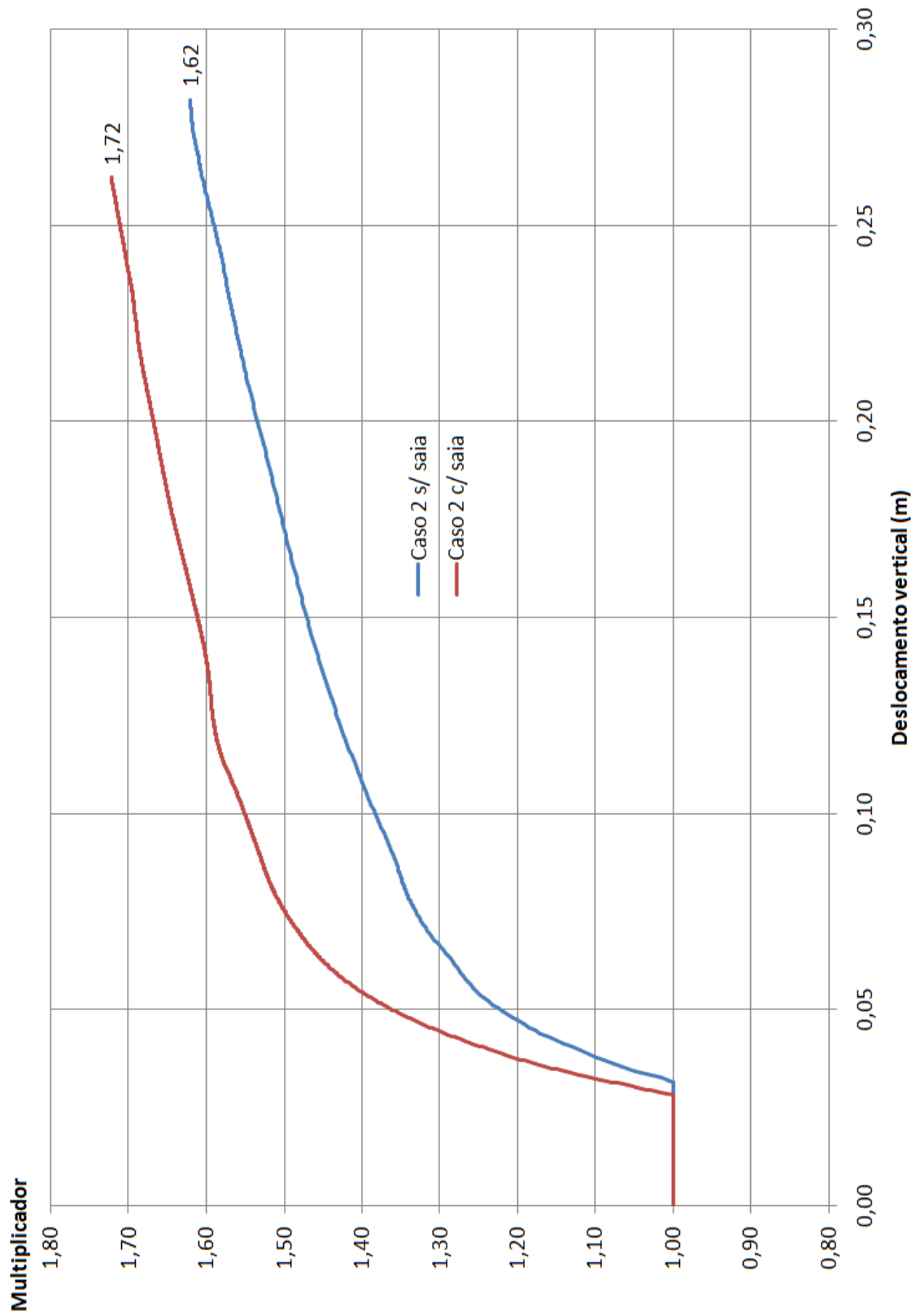
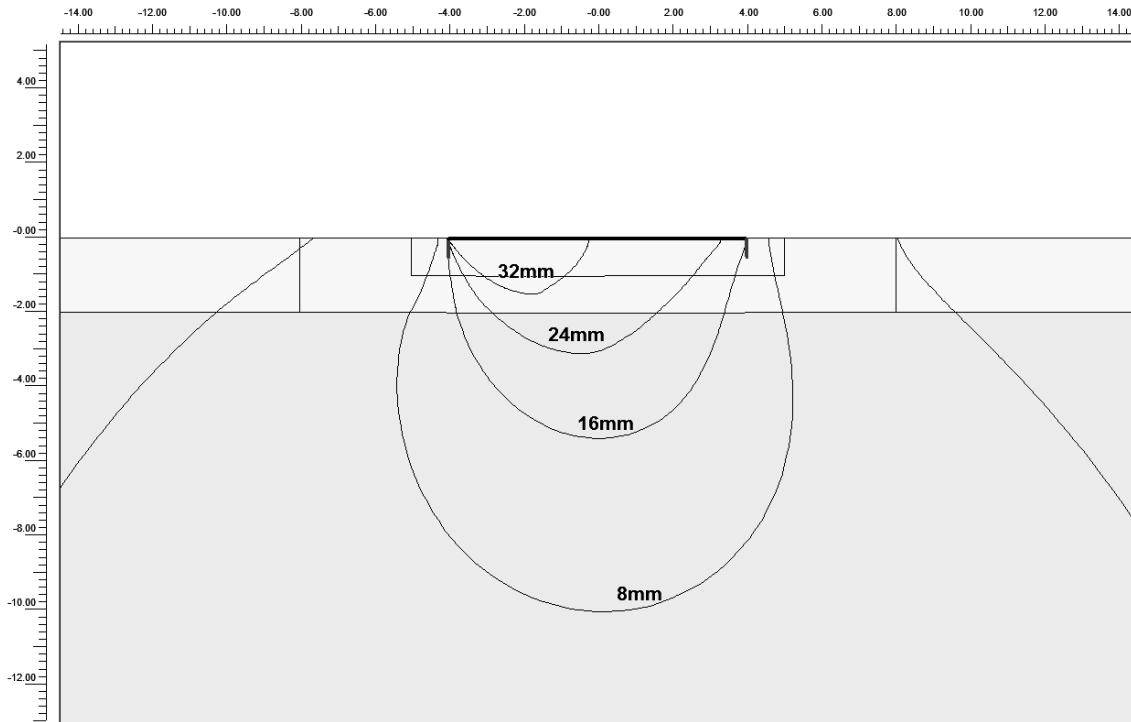
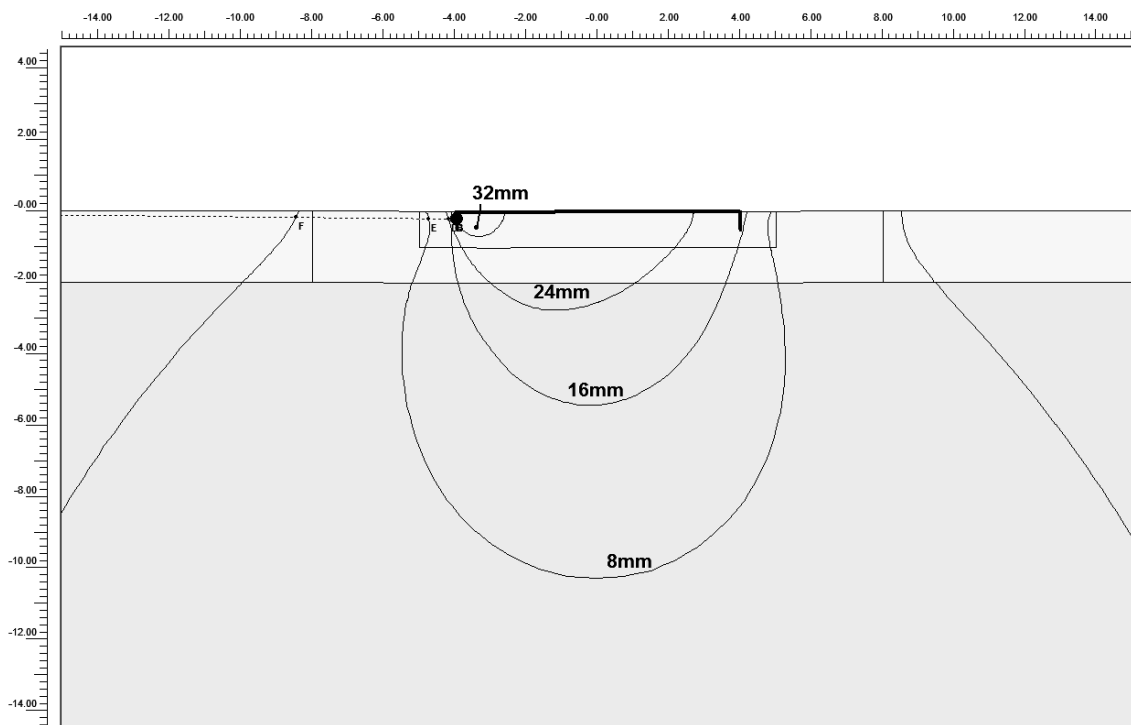


Figura 42. Multiplicador por deslocamento para o Caso 2 com e sem saia



**Figura 43. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 2 sem saia**



**Figura 44. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 2 com saia**

### 5.3.5.3. Caso 3

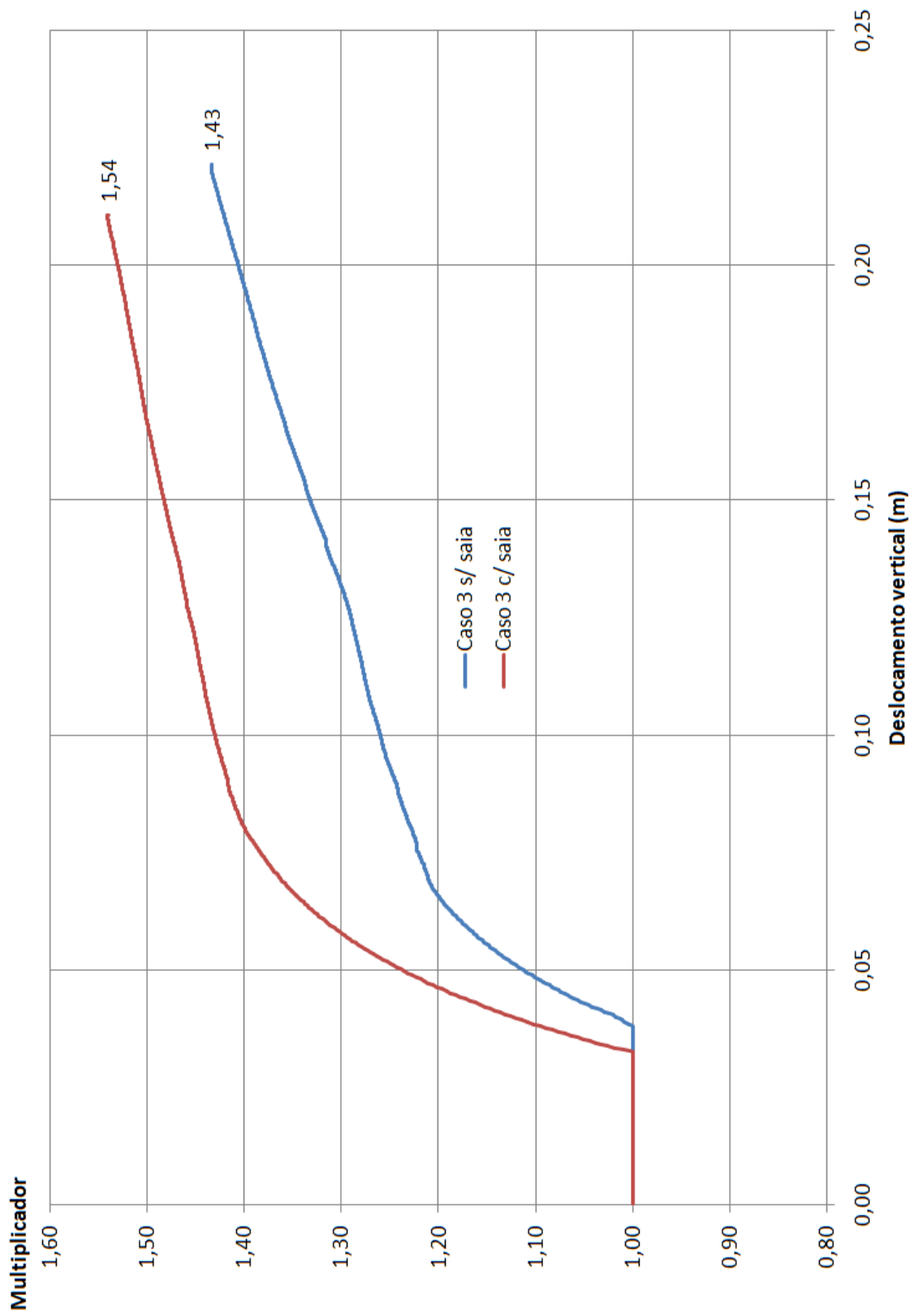
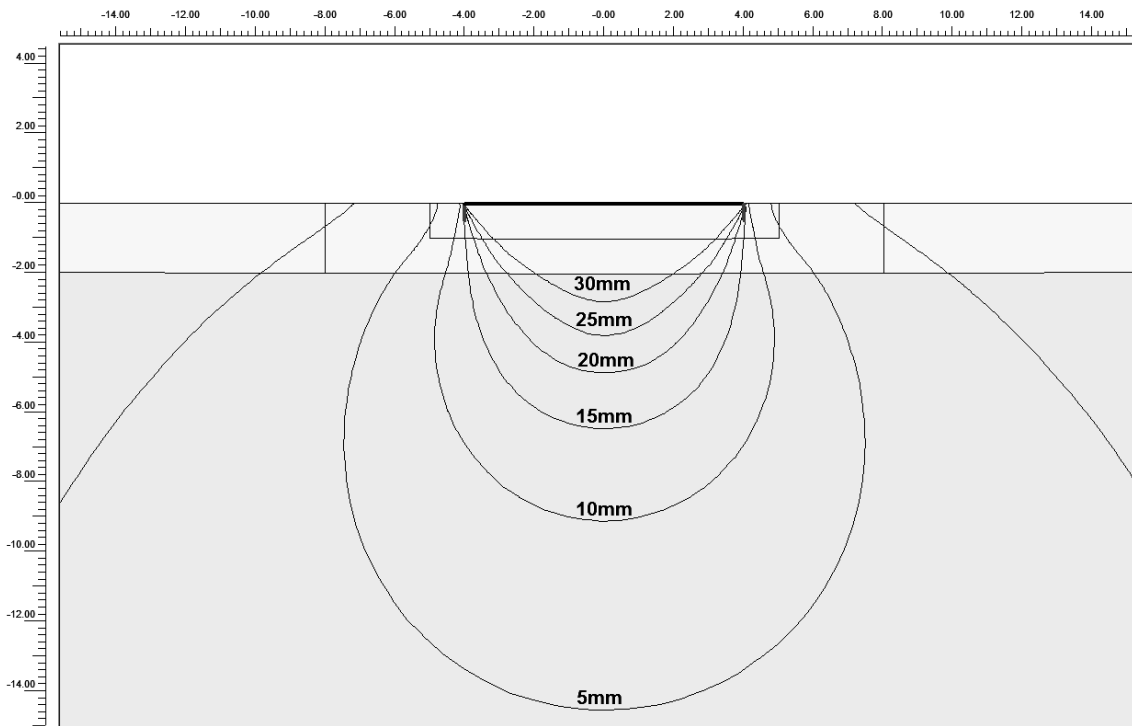
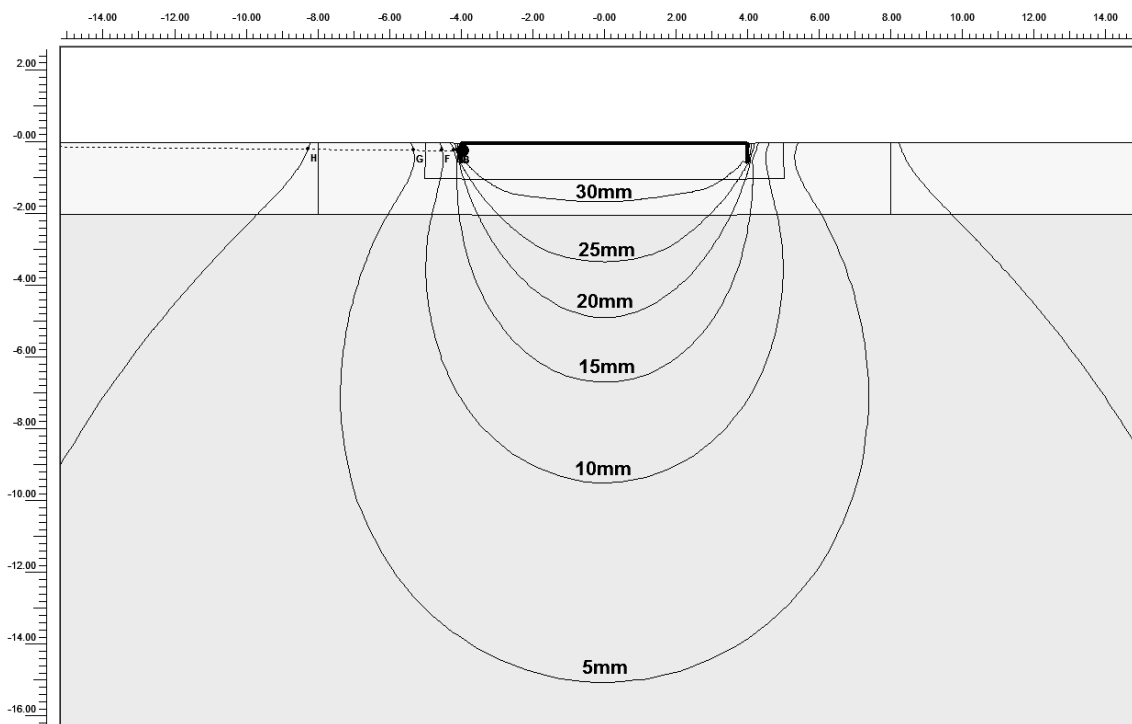


Figura 45. Multiplicador por deslocamento para o Caso 3 com e sem saia



**Figura 46. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 3 sem saia**



**Figura 47. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 3 com saia**

### 5.3.5.4. Caso 4

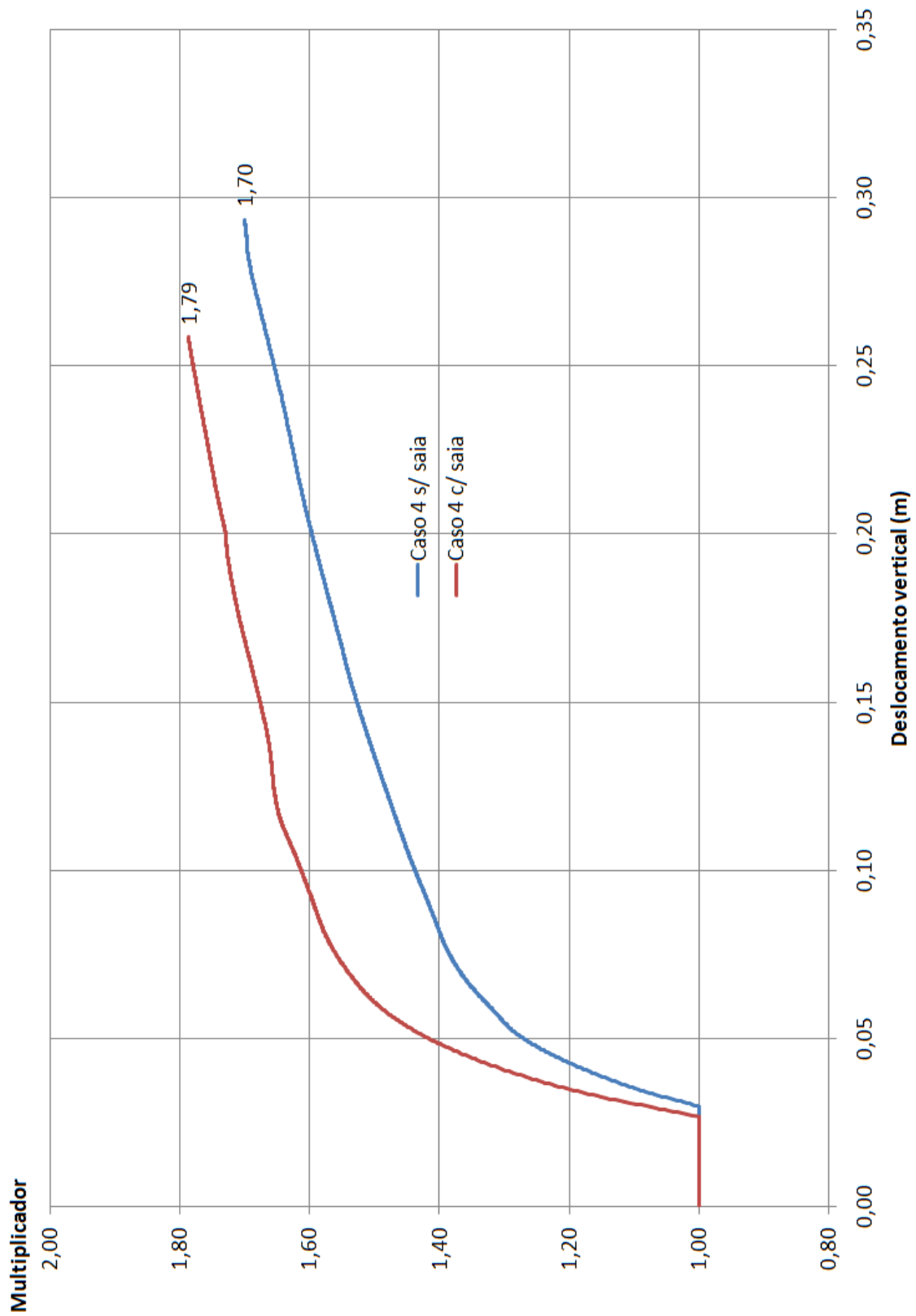
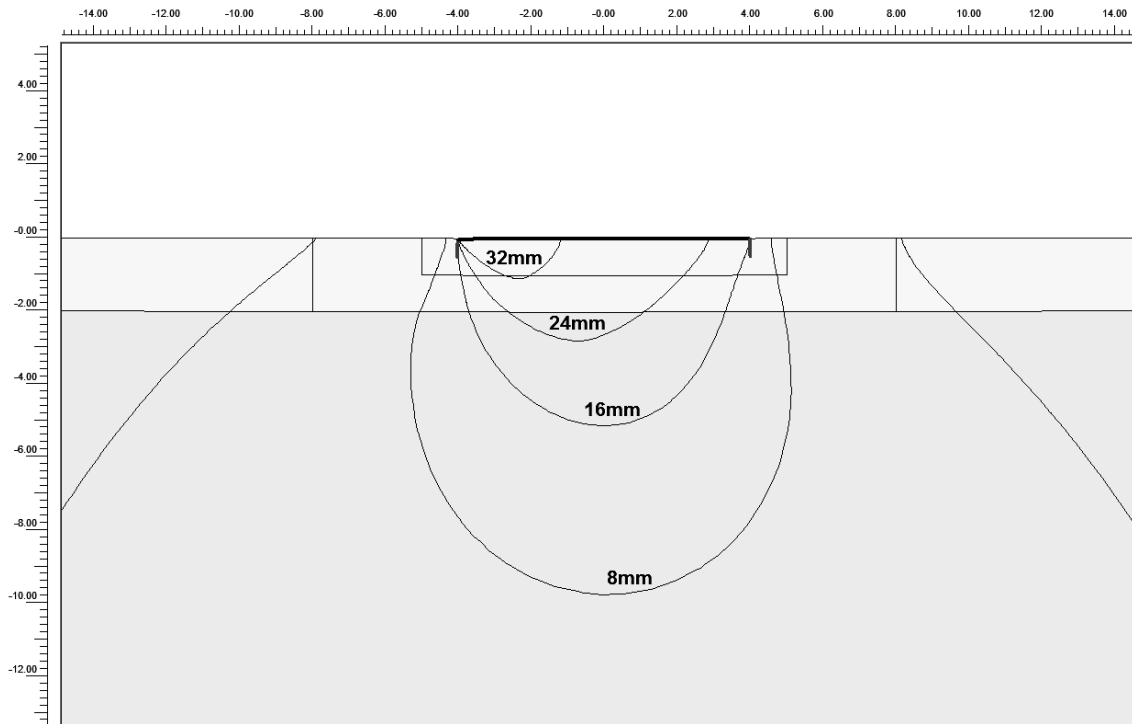
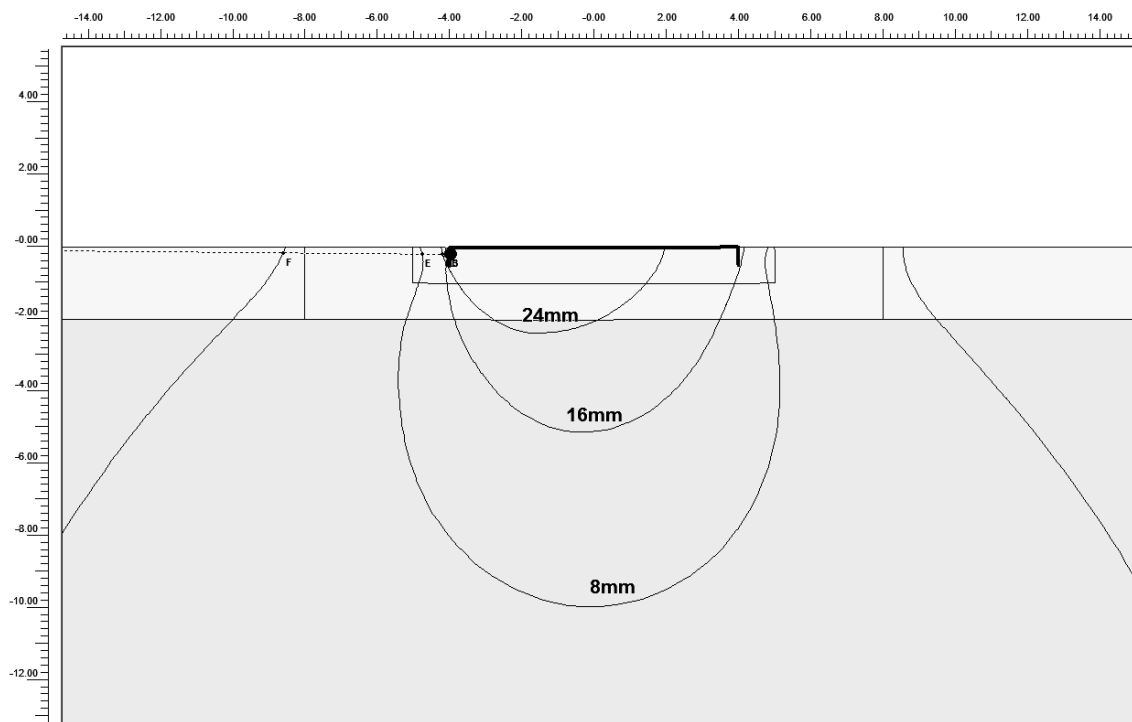


Figura 48. Multiplicador por deslocamento para o Caso 4 com e sem saia



**Figura 49. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 4 sem saia**



**Figura 50. Curvas de deslocamento vertical para o Caso 4 com saia**

## 5.4. Análise dos resultados

A Tabela 5 apresenta um resumo dos valores obtidos nos cálculos realizados. Os resultados analíticos e numéricos serão comentados nesta seção e comparados na seção seguinte.

**Tabela 5. Resumo dos valores obtidos**

Caso	Analítico API			Analítico Superfície de Ruptura			Numérico sem saia			Numérico com saia		
	FS	desloc. (mm)	Rot.	FS	desloc. (mm)	Rot.	FS	desloc. (mm)	Rot.	FS	desloc. (mm)	Rot.
1	1,57	55,0	-	1,88	46,0	-	1,94	24,9	-	2,08	23,2	-
2	1,16	68,0	0,0616	1,39	56,8	0,0515	1,62	31,4*	0,1282	1,72	28,2*	0,0917
3	1,15	70,5	-	1,38	58,9	-	1,43	37,5	-	1,54	33,2	-
4	1,20	63,5	0,0612	1,44	53,0	0,0511	1,70	29,6*	0,1124	1,79	26,9*	0,0824

\* deslocamento médio

### 5.4.1. Metodologia analítica

Pelos valores obtidos no cálculo analítico, pode-se notar que, para os casos de carga centralizada, o fator de segurança é inversamente proporcional ao peso total do conjunto. O deslocamento é diretamente proporcional ao aumento de peso, conforme esperado pela formulação analítica.

Nos casos com carga excêntrica, deve ser levado em conta a excentricidade resultante do carregamento sobre a área da fundação. Os casos 2 e 4 (com peso inferior) apresentaram fatores de segurança similares.

É notável também a influência da excentricidade do carregamento sobre a eficiência da fundação. O caso 2 apresenta peso total bem inferior ao caso 3 e, no entanto, é quase tão crítico para a fundação do equipamento quanto o caso de maior carregamento.

Os valores de deslocamento vertical apresentam o mesmo comportamento que o fator de segurança. Estes valores são relativamente altos quando comparados com os dados de campo após a instalação dos equipamentos.

O cálculo analítico das rotações, assim como o dos deslocamentos verticais é baseado em uma aproximação para fundação circular. Os valores das rotações obtidos

através do cálculo recomendado pela norma API são bastante baixos, indicando uma diferença de recalque entre uma ponta e outra do *manifold* inferior a 9mm, que é aceitável.

Ao analisar os resultados obtidos pela metodologia considerando a superfície de ruptura, vê-se que todos os resultados são superiores à metodologia API em cerca de 20%. Isto se deve ao fato de todos os valores calculados serem diretamente proporcionais à Su. A diferença do Su da primeira camada (adotada pela API) e do Su calculado pela superfície de ruptura é de 19,7%.

#### **5.4.2. Resultados numéricos**

Os resultados numéricos confirmam que o caso 3 é o caso crítico para o *manifold* estudado.

Quando se analisa os resultados de deslocamento, verifica-se que os casos de carregamento excêntrico apresentam deslocamentos maiores que os casos centralizados que possuem fatores de segurança menores. Isto ocorre devido à rotação do equipamento. Quando compára-se o deslocamento vertical médio dos casos excêntricos com o deslocamento dos casos centralizados, verifica-se que os resultados crescem juntamente com os fatores de segurança.

Os valores de deslocamentos nos casos excêntricos mostram uma diferença acentuada entre os dois lados do equipamento. Apesar desta diferença, a inclinação resultante não é expressiva.

Comparando o resultado numérico com saia, percebe-se que a influência da saia sobre a capacidade de carga é expressivo: aproximadamente 7% de ganho para casos de carregamento centralizado e aproximadamente 6% para casos de carregamento excêntrico. A influência da saia sobre o deslocamento esperado é ainda maior, chegando a diminuir o deslocamento máximo em até 13% e reduzindo a inclinação resultante do equipamento em cerca de 27%. Este aumento de capacidade de carga da fundação é expressivo e não é levado em consideração nos cálculos analíticos.



## 5.5. Comparação da metodologia analítica e numérica

As análises numéricas apresentam resultados melhores que as condições previstas pela metodologia API. Entretanto, quando os resultados das análises considerando a superfície de ruptura são comparados com os das análises numéricas, a diferença é significativamente menor, sendo bem similares os resultados para casos centrados sem saia. Pelos resultados das análises numéricas, através das curvas de deslocamento vertical, percebe-se que o comportamento do solo nas análises numéricas se aproxima da teoria de superfície de ruptura.

A seguir serão apresentadas comparações entre os resultados analíticos e numéricos.

### 5.5.1. Comparação da capacidade de carga

A Tabela 6 mostra uma comparação entre as capacidades de carga dos métodos numéricos e analíticos.

**Tabela 6. Comparação da capacidade de carga analítica x numérica**

Capacidade de carga	Numérico/API		Numérico/Superfície de Ruptura	
	sem saia	com saia	sem saia	com saia
Caso 1	1,236	1,325	1,032	1,106
Caso 2	1,397	1,483	1,165	1,237
Caso 3	1,243	1,339	1,036	1,116
Caso 4	1,417	1,492	1,181	1,243

Pode-se verificar que o resultado das análises numéricas são superiores à análise de acordo com a API. Para casos centralizados, os resultados são cerca de 24,0% superiores sem a saia e 33,2% considerando a saia. A diferença é ainda mais acentuada quando se trata de casos de carregamento excêntrico. Isto pode ser atribuído ao método de cálculo analítico, que aproxima a capacidade para uma área efetiva, descartar a influência de parte da área da fundação. Os resultados são aproximadamente 40,7% superiores sem a saia, e 48,7% com a saia.

Quando comparadas com os resultados provenientes do modelo considerando a superfície de ruptura, as análises numéricas também são superiores aos analíticos em todos os casos. Da mesma forma que quando comparados com os resultados da

metodologia API, os resultados numéricos beneficiam-se com a influência da saia, e apresentam resultados melhores para as condições excêntricas.

Um aspecto a se notar é que para os casos de carregamento centralizado há uma proximidade dos resultados da análise numérica sem saia com o resultado calculado pela superfície de ruptura. Pode-se concluir que o modelo de ruptura adotado aproxima-se mais da condição real esperada.

Para os casos centralizados os fatores de segurança das análises numéricas ficam acima dos fatores numéricos cerca de 3,4% sem a saia e 11,1% com a saia. Nos casos excêntricos a diferença cresce um pouco, para cerca de 17,3% sem a saia e 24,0% com saia.

### 5.5.2. Comparação dos valores de deslocamento vertical

A Tabela 7 mostra uma comparação entre os valores de deslocamento vertical dos métodos numéricos e analíticos.

**Tabela 7. Comparação do deslocamento vertical analítica x numérica**

Deslocamento vertical	Numérico/API		Numérico/Superfície de Ruptura	
	sem saia	com saia	sem saia	com saia
Caso 1	0,453	0,422	0,541	0,504
Caso 2	0,461	0,415	0,552	0,496
Caso 3	0,532	0,471	0,637	0,564
Caso 4	0,465	0,423	0,558	0,507

Para os valores de deslocamento vertical, as análises numéricas resultaram em valores bastante inferiores aos valores analíticos. Este resultado é reforçado pelos dados de campo, onde o deslocamento vertical, sob condições normais, se restringe a valores inferiores a 40mm. Com exceção do caso 3, os valores de deslocamento vertical das análises numéricas foram inferiores à metade dos valores esperados pelos cálculos analíticos.

Novamente os resultados com saia apresentaram ganho significativo em relação aos resultados sem saia.

### 5.5.3. Comparação dos valores de rotação

A Tabela 8 mostra uma comparação entre os valores de rotação dos métodos numéricos e analíticos.

**Tabela 8. Comparação da rotação analítica x numérica**

Rotação	Numérico/API		Numérico/Superfície de Ruptura	
	sem saia	com saia	sem saia	com saia
Caso 2	2,081	1,488	2,489	1,780
Caso 4	1,837	1,346	2,200	1,612

Os resultados para rotação foram piores nos cálculos numéricos do que analíticos. Mesmo os valores de rotação sendo baixos, a diferença de deslocamento vertical entre as extremidades do equipamento são acentuados.

Neste caso, a influência da saia é muito pronunciada. Isto pode ser atribuído à sua influência sobre as condições de contorno nas extremidades do equipamento.

## 6. ESTUDOS COMPLEMENTARES

A partir dos resultados e comparações realizadas no capítulo anterior, nota-se que o uso da saia tem grande influência sobre o resultado de capacidade de carga da fundação. Além disto, a norma exige fator de segurança para o carregamento da fundação do equipamento superior a 2,0 para o pior caso. Isto não ocorre no estudo de caso apresentado. Por estes motivos, foram realizados estudos complementares, analisando a influência da saia sobre o resultado analítico e calculando o aumento de área necessário para que o *manifold* do estudo de caso seja aprovado pela norma vigente.

### 6.1. Análise de influência da saia

Devido à clara influência da saia sobre os resultados numéricos, foi analisada uma metodologia para incluir a parcela da capacidade de carga associada à área da saia no cálculo analítico. A metodologia inclui o cálculo do atrito lateral sugerido pela teoria clássica, aumentando a capacidade de carga da fundação do equipamento. Análises numéricas com diferentes alturas de saia complementam o estudo.

#### 6.1.1. Metodologia analítica sugerida

Utilizando a formulação da API (2007) para capacidade axial de estacas, é possível somar a capacidade de carga devida ao atrito lateral da saia à capacidade de carga da chapa de fundo.

Para o cálculo da capacidade de carga da saia, utiliza-se a formulação:

$$Q_d = Q_f + Q_p = f \cdot A_s + q \cdot A_p \quad (6.1)$$

onde:

- $Q_f$  é a resistência ao atrito
- $Q_p$  é a resistência da ponta
- $f$  é a resistência por atrito unitária

- $A_s$  é a área lateral
- $q$  é a capacidade de carga unitária da ponta
- $A_p$  é a área da ponta

Adaptando esta equação ao problema em questão, pode-se fazer as seguintes considerações:

- Sendo a saia fabricada em chapa esbelta, a capacidade de resistência da ponta não será considerada.
- Para fundação rasa em argila subadensada ou normalmente adensada, a API (2007) recomenda  $f = Su$ .

Juntando a parcela de carga da saia à equação original de capacidade de carga (4.6), obtém-se:

$$Q = c \cdot N_c \cdot \left[ 1 + 0.2 \cdot \left( \frac{B'}{L'} \right) \right] \cdot A' + Su \cdot A_s \quad (6.2)$$

Para o estudo de caso em questão foram calculadas as capacidades de carga para diferentes alturas de saia: 0,25m, 0,50m, 0,75m e 1,00m. Alturas de saia superiores a 0,8m são consideradas não práticas devido à dificuldade de transporte do equipamento com saia de elevadas dimensões.

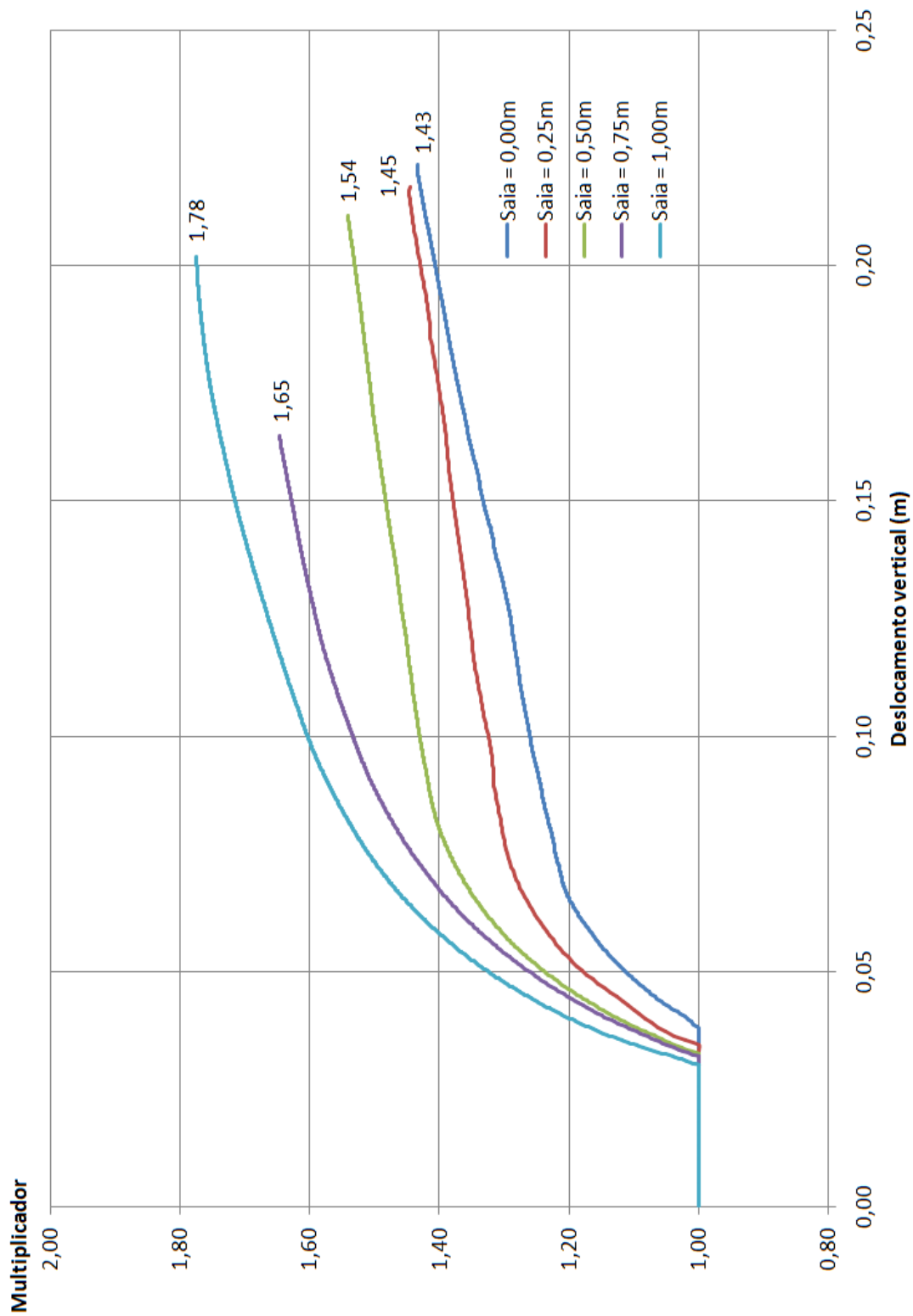
A Tabela 9 mostra os novos fatores de segurança para a condição crítica (condição 3) ao adicionar o termo de resistência da saia na equação de capacidade de carga da fundação. A memória de cálculo modificada é apresentada no Apêndice A.5.

### 6.1.2. Resultado da análise numérica

Foram realizadas análises numéricas para o caso 3 para as diferentes alturas de saia consideradas no cálculo analítico. Foi utilizada a mesma metodologia e parâmetros dos cálculos numéricos anteriores.

A Figura 51 mostra os gráficos de multiplicadores para as 5 diferentes análises. A partir destes gráficos percebe-se que à medida que é aumentada a altura da saia, a capacidade de carga do solo aumenta, assim como a deflexão vertical esperada diminui.

Pode ser visto a partir deste gráfico que, com exceção da altura de saia 0,75m, existe uma diminuição gradual do deslocamento permitido até a ruptura do solo.



**Figura 51. Gráfico dos resultados numéricos do caso 3 para diferentes alturas de saia**

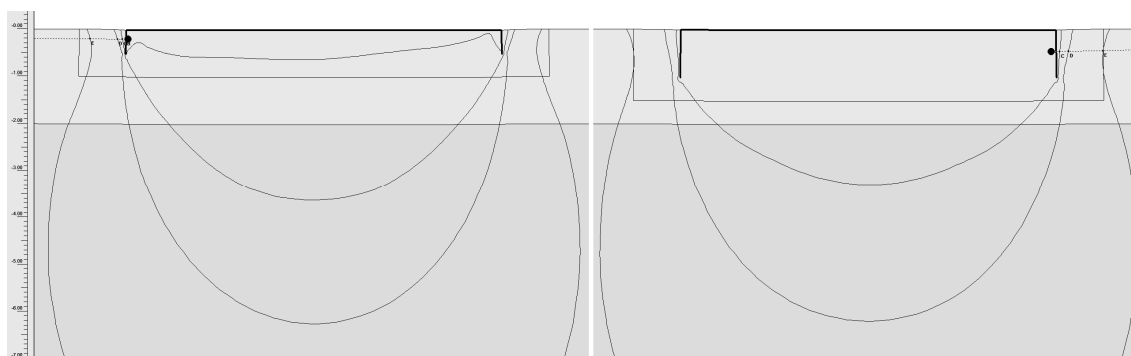
### 6.1.3. Comparação dos resultados

A seguir compara-se os resultados obtidos pela nova metodologia.

**Tabela 9. Resumo dos resultados utilizando nova metodologia**

CASO 3	Analítico API	Analítico Superfície de Ruptura	Numérico com saia
Saia (m)	FS	FS	FS
0	1,14	1,37	1,43
0,25	1,17	1,45	1,45
0,50	1,19	1,54	1,54
0,75	1,21	1,63	1,65
1,00	1,24	1,71	1,78

Através da Tabela 9 percebe-se que o aumento da altura da saia tem uma influência linear sobre o resultado calculado segundo fatores da API e pelo método considerando superfície de ruptura. No entanto, o aumento da saia incide em um aumento não linear da capacidade obtida pela análise numérica. Esta não-linearidade pode ser atribuída ao fato da superfície de ruptura originar da região próxima à ponta da saia. Assim, como a resistência ao cisalhamento do solo aumenta com a profundidade, o aumento da profundidade da saia aumenta também a resistência equivalente calculada pela superfície de ruptura. Este fenômeno pode ser visto nas figuras da seção 5.3.5 assim como na Figura 52.



**Figura 52. Início da superfície de ruptura para diferentes alturas de saia**

Comparando os resultados para o cálculo por superfície de ruptura com a análise numérica, obtém-se as relações mostradas na Tabela 10.

**Tabela 10. Comparação: analítico por superfície de ruptura x numérico**

CASO 3 Saia (m)	Numérico com saia / Analítico Superfície de Ruptura
0	1,043
0,25	1,000
0,50	1,000
0,75	1,012
1,00	1,041

A comparação realizada mostra que o método adotando a superfície de ruptura com saia aproxima-se da solução numérica em uma faixa de dados. Para o caso estudado, a diferença entre os dois métodos varia entre 0 e 4,3%. Esta diferença pode ser atribuída a diferentes fatores: erro na avaliação da resistência ao cisalhamento, fator de correção de forma do equipamento inadequado, não-linealidades do problema.

Apesar da diferença entre os dois métodos, pode-se considerar que a metodologia analítica proposta atende a aplicação prática para este problema, gerando resultados iguais ou um pouco conservadores em relação à solução numérica.

## **6.2. Aumento requerido da estrutura**

O estudo de caso apresentado não atende o requisito da norma, que exige fator de segurança 2,0 para a condição crítica para a estrutura. Desta forma, nesta seção, é estudado o aumento de área e/ou saia necessário sob o ponto de vista de cada método de análise.

O aumento de área da fundação necessária para atender os requisitos da norma acarreta em aumento da estrutura e, conseqüentemente, de peso do equipamento. De forma a facilitar a quantificação do aumento de peso, valores de peso para aumento de área e aumento de saia foram estimados:

- Peso por metro quadrado da sub-base: 186,70 kg.
- Peso por centímetro da saia: 27,53 kg.



### 6.2.1. Metodologia convencional

Seguindo a metodologia convencional adotada pela indústria, obtém-se os valores necessários de área mostrados na Tabela 11. O cálculo sugerido pela API leva a um aumento de área de 74%. Já pela metodologia da resistência média na superfície de ruptura, o aumento necessário é significativamente menor, aproximadamente 45%. Como visto na seção 5.5.1, a análise convencional por superfície de ruptura aproxima-se mais do caso real, mas não considera a saia.

O aumento de peso estimado para o cálculo pela API pode ser considerado muito alto, aumentando o peso da sub-base em 88,6%. No caso do cálculo utilizando a superfície de ruptura, o aumento de peso da sub-base fica em 54%.

**Tabela 11. Aumento de área necessário pela metodologia convencional**

	Analítico API	Analítico Superfície de Ruptura
Área necessária	111,5m <sup>2</sup>	92,9m <sup>2</sup>
Aumento dimensional	2,56m	1,64m
Aumento percentual da área	74,2%	45,2%
Aumento no peso	8866 kg	5396 kg

### 6.2.2. Metodologia convencional incluindo saia

Considerando a influência da saia, há uma diminuição na área necessária para atender o fator determinado pela norma. A Tabela 12 resume os dados encontrados considerando alturas de saia até 75cm. Pode ser percebido a consideração da saia (originalmente 50cm) no cálculo analítico pode resultar em uma grande economia na quantidade de área necessária para atender a norma, e, conseqüentemente, economia em peso de estrutura.

Considerando o valor estimado de peso, pode ser percebido que a inclusão de saia para uma fundação calculada segundo a metodologia API não oferece vantagem. No caso do cálculo considerando a superfície de ruptura, a inclusão da saia permite uma economia de peso de aproximadamente 692kg (aproximadamente 7% do peso da sub-base) quando comparado com a solução .

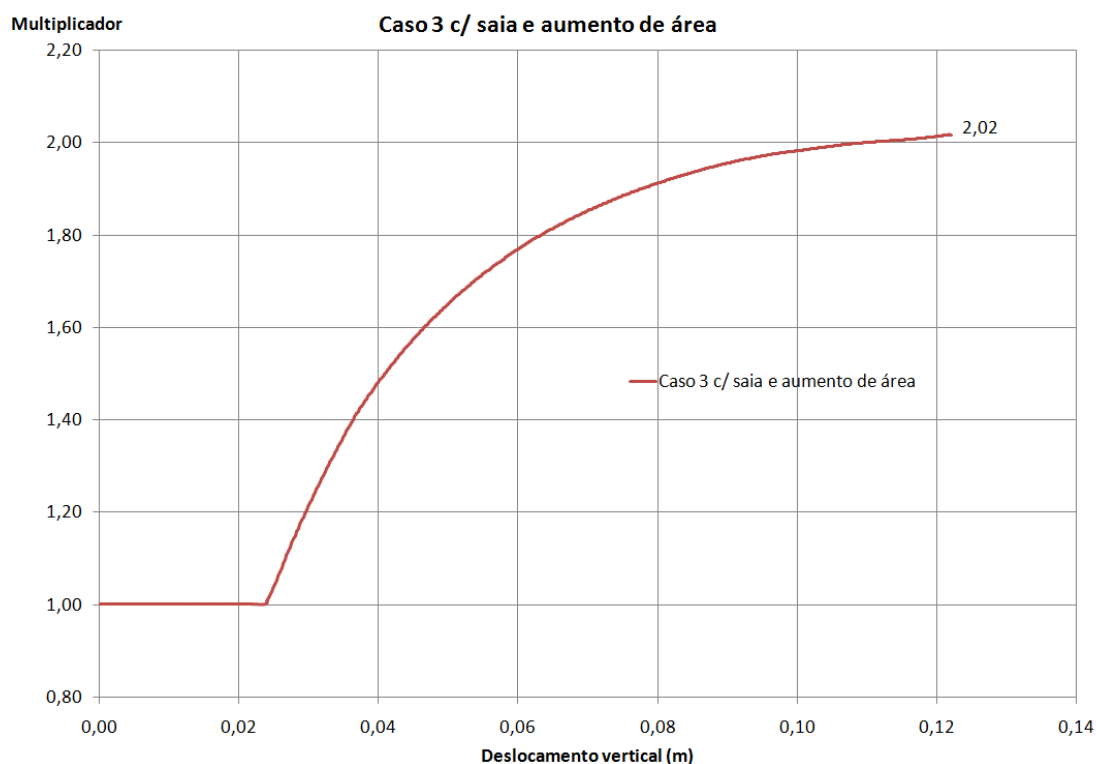
**Tabela 12. Aumento de área necessário considerando saia**

Tamanho de saia	Analítico API		Analítico Superfície de Ruptura	
	Aumento percentual de área	Aumento no peso	Aumento percentual de área	Aumento no peso
0	74,2%	8866 kg	45,2%	5396 kg
0,25	71,0%	9104 kg	38,1%	5173 kg
0,50	67,7%	9330 kg	30,5%	4884 kg
0,75	65,8%	9722 kg	23,8%	4704 kg

### 6.2.3. Cálculo numérico de aumento da área

Para validar o cálculo realizado na seção anterior, foi realizada uma análise numérica refletindo os valores de aumento de área para uma altura de saia de 75cm.

A Figura 53 mostra o resultado da análise numérica. Para a condição necessária prevista pelo método corrigido (aumento de área de 23,8% para saia de 75cm), a solução numérica resultou em um fator de segurança de 2,02. Este resultado apresenta uma diferença para a solução analítica de 1,0%, demonstrando a proximidade dos resultados entre a solução analítica sugerida e a solução numérica.



**Figura 53. Resultado numérico para a condição necessária prevista pelo método analítico sugerido.**

## **7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A indústria do petróleo está buscando cada vez mais recursos nos oceanos. Desta forma, a análise de fundações submarinas é de grande importância para o progresso da indústria.

O aprimoramento do cálculo de fundação leva a uma otimização dos equipamentos e estruturas, podendo levar a uma redução de peso. Isto acarreta em maior eficiência dos equipamentos e menores custos de instalação e manutenção.

As comparações realizadas nesta dissertação mostraram que é necessário maior aprimoramento nas metodologias de cálculo utilizadas atualmente. A norma API-RP 2A-WSD adotada para os cálculos de fundação encontra-se na revisão 3 (2007), mas a formulação para fundações rasas não mudou desde sua publicação em 2000.

A comparação dos diferentes métodos permitiu a verificação da precisão do método comumente aceito na indústria: o método de superfície de ruptura. Apesar deste método não considerar a utilização da saia, ele não é tão conservador quanto o método sugerido pela API.

Foi verificada uma grande diferença entre os valores de deslocamentos dos diferentes métodos. Esta diferença pode ser atribuída às aproximações nas formulações sugeridas pela API. Apesar de serem conservadores, os valores encontrados pela metodologia analítica não acarretaram na alteração da geometria da fundação.

O estudo de caso realizado permitiu também a verificação da grande influência da saia sobre a capacidade de carga da fundação. A consideração da capacidade adicional promovida pela saia permite reduzir a área da fundação e, conseqüentemente, diminuir o peso do equipamento.

A metodologia sugerida para adição da contribuição da saia obteve resultados similares aos obtidos pela análise numérica para o caso estudado. No entanto, novos estudos se fazem necessários antes de considerar formulação sugerida aplicável para diferentes equipamentos e carregamentos.

Novas análises numéricas podem ser realizadas para verificação da influência de fatores como a interface entre o solo e o equipamento através de elementos de interface, e a influência do carregamento em outro eixo do equipamento, através de análise tridimensional. Faz-se necessário também a realização de estudos do comportamento da fundação à longo prazo, realizando cálculos com o solo no estado drenado.

Devido à grande variedade de fatores que influenciam nos cálculos dos equipamentos, a metodologia sugerida pode ser considerada prematura, necessitando de estudos mais aprofundados para ser consolidada. Recomenda-se, portanto:

- Aplicação da metodologia sugerida para diferentes casos.
- Comparação com outras normas aplicáveis.
- Análise de outros equipamentos do arranjo submarino.
- Análise considerando elementos de interface.
- Análise tridimensional.
- Estudos do comportamento da fundação à longo prazo.

Dentro do contexto em que se encontra a indústria do petróleo, principalmente no Brasil, com a descoberta das jazidas do pré-sal, a indústria necessitará de uma grande quantidade de equipamentos. Desta forma, a otimização das estruturas dos equipamentos pode acarretar em grande economia para as empresas do ramo.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLERSMA, H.G.B., 2005, *Centrifuge tests on improving offshore foundation systems*, Em: *Proceedings of the First International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, ISFOG, Perth, Australia, 19 a 21 de Setembro de 2005.

API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2007, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*, API-RP-2A – WSD, 21st Edition, USA.

CAPUTO, H.P., 2003, *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*, Livros Técnicos e Científicos Editora.

COLLIAT, J. L., 2002, “*Anchors for Deepwater to Ultradeepwater Moorings*”, In: *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, Paper 14306, Houston, Texas, 6 - 9 May.

GOURVENEC, S., 2007, *Failure Envelopes for Offshore Shallow Foundations Under General Loading*, Centre of Offshore Foundation Systems, University of Westerns Australia

KRUGMAN, P., 2008, *Feelin a bit peaked*. Disponível em: <<http://krugman.blogs.nytimes.com/2008/02/19/feeling-a-bit-peaked/>>. Acesso em: 10 jun. 2009, 22:00:00.

OSMAN, A.S. *et al.*, 2007, *Simple Prediction of the Undrained Displacement of a Circular Foundation on Non-linear Soil*, *Géotechnique* 57.

PARKER, E.J. *et al.*, 2009, *Geohazard Risk Assessment—Vulnerability of Subsea Structures to Geohazards—Some Risk Implications*, OTC, Houston, Estados Unidos, 4 a 7 de Maio.

PETROBRAS, *Linha do Tempo*. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/EspacoConhecer/APetrobras/linhatempo.asp>>. Acesso em: 17 ago. 2009, 21:00:00

PINTO, C. S., 2000, *Curso Básico de Mecânica dos Solos*, São Paulo, SP, Brasil, Oficina de Textos.

PLAXIS, 2002, *Plaxis Version 8 Reference Manual*.

PLAXIS, 2002, *Plaxis Version 8 Scientific Manual*.

SCIENCE CLARIFIED, *Oil Drilling*. Disponível em:

<<http://www.scienceclarified.com/Mu-Oi/Oil-Drilling.html>>. Acesso em: 10 jun. 2009, 19:00:00

SOUSA, R. *História do Petróleo no Brasil*. Disponível em:

<<http://www.brasilecola.com/brasil/historia-do-petroleo-no-brasil.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2009, 20:10:00

STOCK, P, MAXWELL, *Especificação Técnica Para Manifolds Submarinos*, ET-3000.00-1514-270-PEK-001\_Rev. D, Petrobras, 10/08/2007.

TERZAGHI, K., 1943, *Theoretical Soil Mechanics*, New York: John Wiley & Sons.

VELLOSO, D. A., LOPES, R. F., 1996, *Fundações: Fundações Profundas*. v. 2, Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ.

WEED, G. *About Oil Drilling in the Ocean*. Disponível em:

<[http://www.ehow.com/about\\_4672536\\_oil-drilling-ocean.html](http://www.ehow.com/about_4672536_oil-drilling-ocean.html)>. Acesso em: 10 jun. 2009, 20:00:00

WHITE, D.J., MACONOCHIE, A.J. *et al.*, 2005, *An investigation into the vertical bearing capacity of perforated mudmats*, Em: *Proceedings of the First International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, ISFOG, Perth, Australia, 19 a 21 de Setembro de 2005.

ZHAO, S.F., LUAN, M.T., LU, A.Z., 2005, *Numerical analysis of bearing capacity of foundation under combined loading*, Em: *Proceedings of the First International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, ISFOG, Perth, Australia, 19 a 21 de Setembro de 2005.

# A. APÊNDICES

## A.1 Memória de cálculo Analítico

A seguir, é apresentada a memória de cálculo analítica para capacidade de carga e deslocamentos.

### MEMÓRIA DE CÁLCULO ANALÍTICO PARA FUNDAÇÃO DE MANIFOLD

#### 1) DADOS DE ENTRADA:

##### 1.1) DADOS DO MANIFOLD:

Peso (no ar) da base do Manifold	$P_{man} := 70000 \cdot \text{kgf}$	
Peso (no ar) da sub-base	$P_{sub} := 10000 \cdot \text{kgf}$	
Peso (no ar) do conjunto base+sub-base	$P_{conj} := P_{man} + P_{sub}$	$P_{conj} = 80000 \text{ kgf}$
Peso (no ar) dos MCVs	$P_{mcv} := 4500 \cdot \text{kgf}$	
Quantidade de MCVs	$N_{mcv} := 8$	
Peso (no ar) dos Módulos	$P_{mod} := 12000 \cdot \text{kgf}$	
Quantidade de Módulos	$N_{mod} := 4$	
Largura da Base	$L := 8.0 \cdot \text{m}$	
Comprimento da Base	$C := 8.0 \cdot \text{m}$	
Área da Base da Fundação	$A := (L \cdot C)$	$A = 64 \text{ m}^2$

##### 1.2) DADOS DO SOLO MARINHO: Dados de solo do Campo de Roncador

Inclinação do Talude - 0°		
Resistência ao cisalhamento (não drenado), h=profundidade: ( $0 < h < 2.0$ metros)		$S_u = 5 \text{ kPa}$
Resistência ao cisalhamento (não drenado), h=profundidade: ( $h > 2.0$ metros)		$S_u = ( 2 + 1.5 h ) \text{ kPa}$
Valor de $S_u$ considerando área de influência: Considerando-se as dimensões da base do equipamento e a área de influência no solo, o valor de $S_u$ adotado no cálculo corresponde a média ponderada das resistências das camadas atuantes, ou seja $S_u = 5.987 \text{ kPa}$ .		$S_u = 5.987 \text{ kPa}$
Coefficiente de Poisson para solo coesivo		$\nu := 0.3$
Young Modulus		$E = 400 S_u$
Shear Modulus		$G_s = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$

### 1.3) PREMISSAS DE PROJETO

Fator de majoração de carga aplicável aos equipamentos que não terão a confirmação do seu peso através processo de pesagem (API)	$\gamma_f := 1.3$
Para cálculo realizado de acordo com a API, utilizaremos $S_u$ da camada afetada	$S_{u0} := 5.00 \text{ kPa}$
Para cálculo realizado de acordo com a metodologia aprovada pelo CENPES, utilizaremos $S_u$ da área de influência	$S_{u1} := 5.987 \text{ kPa}$
Fator de capacidade de carga (solo coesivo $\psi = 0$ ) (API fig.C6.13.1-1)	$N_c := 5.14$
Fator de capacidade de carga (solo coesivo $\psi = 0$ ) (API fig.C6.13.1-1)	$N_q := 1$
Fator de correção de forma da fundação (retangular)	$S_c := (1) + \left(0.2 \cdot \frac{L}{C}\right)$
	$S_c = 1.2$

## 2) DADOS DE SAÍDA

### 2.1) VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DA FUNDAÇÃO

#### 2.1.1 - CAPACIDADE DE CARGA NO MUDMAT

Capacidade de carga no Mudmat	$Q_{ult} := S_u \cdot N_c \cdot S_c$	$Q_{ult} = \left(\frac{3145}{3766}\right) \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$
-------------------------------	--------------------------------------	--

### 2.2) TENSÕES ATUANTES E DEFORMAÇÕES NOS DIFERENTES CASOS DE CARREGAMENTOS

#### 2.2.1) CASO 1 - INSTALAÇÃO DO MANIFOLD

Nesta análise foi considerado o peso do Manifold na condição de instalação, ou seja, com todos os módulos montados. Está sendo considerado uma posição do CG centralizada em relação ao centro geométrico da Fundação.

Peso total no caso 1	$P_{t1} := P_{conj} + P_{mod} \cdot N_{mod}$	$P_{t1} = 128000 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG em relação ao centro geométrico da Fundação	$X_{cg1} := 0 \text{ mm}$ $Y_{cg1} := 0 \text{ mm}$	
Excentricidade no Comprimento	$e_{C1} := \frac{(X_{cg1}) \cdot P_{t1}}{P_{t1}}$	$e_{C1} = 0 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base	$C_1 := (C - 2 \cdot e_{C1})$	$C_1 = 8 \text{ m}$



Excentricidade na Largura	$eL1 := \frac{(Ycg1) \cdot Pt1}{Pt1}$	$eL1 = 0 \text{ m}$
Largura efetiva da Base	$L1 := (L - 2 \cdot eL1)$	$L1 = 8 \text{ m}$
Área efetiva (carregamento excêntrico)	$A1 := ((L1 \cdot C1))$	$A1 = 64 \text{ m}^2$
Tensão atuante na Instalação do Manifold	$\sigma1 := \left( \frac{Pt1}{A1} \right)$	$\sigma1 = 2000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$
Fator de segurança na instalação do Manifold	$FS1 := \frac{Qult}{\sigma1}$	$FS1 = \left( \frac{1.57}{1.88} \right)$
Raio da área circular similar a área retangular	$R1 := \sqrt{\frac{A1}{\pi}}$	
Peso submerso do Manifold	$Ps1 := Pt1 \cdot 0.87$	
Recalque vertical	$Rv1 := \left( \frac{1 - \nu}{4 \cdot Gs \cdot R1} \right) \cdot Ps1$	$Rv1 = \left( \frac{55}{46} \right) \text{ mm}$

## 2.2.2) CASO 2 - INSTALAÇÃO DOS MCVS EM CONDIÇÃO DE DESALINHAMENTO MÁXIMO

Nesta análise foi considerado o assentamento dos MCVs 1 a 5

Cargas consideradas: Peso do manifold, sub-base, módulos removíveis e MCVs 1 a 5

Peso total no caso 2	$Pt2 := Pt1 + 5 \cdot Pmcv$	$Pt2 = 150500 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG dos MCVs em relação ao centro geométrico da Fundação	$Xcg_{max} := 3.25 \text{ m}$ $Ycg_{max} := 3.25 \text{ m}$	
Excentricidade no Comprimento	$eC2 := \left  \frac{Pmcv \cdot -3.25 \text{ m} + Pmcv \cdot 0 \text{ m} + 3Pmcv \cdot 3.25 \text{ m}}{Pt2} \right $	$eC2 = 0.194 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base	$C2 := [C - (2 \cdot eC2)]$	$C2 = 7.61 \text{ m}$

Excentricidade na Largura	$eL2 := \frac{Pm_{cv} \cdot -3.25m + Pm_{cv} \cdot 0m + 3Pm_{cv} \cdot 3.25m}{Pt2}$	$eL2 = 0.194m$
Largura efetiva da Base	$L2 := (L - 2 \cdot eL2)$	$L2 = 7.61m$
Área efetiva (carregamento excêntrico)	$A2 := ((L2 \cdot C2))$	$A2 = 57.9m^2$
Tensão atuante na Instalação dos MCVs	$\sigma2 := \frac{Pt1 + (5 \cdot Pm_{cv}) \cdot yf}{A2}$	$\sigma2 = 2714 \frac{kgf}{m^2}$
Fator de segurança na instalação dos MCVs	$FS2 := \frac{Qult}{\sigma2}$	$FS2 = \begin{pmatrix} 1.16 \\ 1.39 \end{pmatrix}$
Raio da área circular similar a área retangular	$R2 := \sqrt{\frac{A2}{\pi}}$	
Peso submerso do Manifold	$Ps2 := Pt2 \cdot 0.87$	
Recalque vertical	$Rv2 := \left( \frac{1 - \nu}{4 \cdot Gs \cdot R2} \right) \cdot Ps2$	$Rv2 = \begin{pmatrix} 68 \\ 56.8 \end{pmatrix} mm$
Momento	$M2 := eC2 \cdot Ps2$	
Deformação angular	$\theta2 := \left[ \frac{3(1 - \nu)}{8Gs \cdot R2^3} \right] \cdot M2$	$\theta2 = \begin{pmatrix} 0.0616 \\ 0.0515 \end{pmatrix} deg$
Diferença de recalque devido à def. angular	$h2 := L \cdot \sin(\theta2)$	$h2 = \begin{pmatrix} 8.604 \\ 7.185 \end{pmatrix} mm$

### 2.2.3) CASO 3 - INSTALAÇÃO DE TODOS OS MCVS

Peso total no caso 2	$Pt3 := Pt1 + Nmcv \cdot Pm_{cv}$	$Pt3 = 164000 kgf$
Deslocamento do CG dos MCVs em relação ao centro geométrico da Fundação	$Xcg3 := 0mm$ $Ycg3 := 0mm$	
Excentricidade no Comprimento	$eC3 := \left  \frac{Pt3 \cdot Xcg3}{Pt3} \right $	$eC3 = 0m$
Comprimento efetivo da Base	$C3 := [C - (2 \cdot eC3)]$	$C3 = 8m$

Excentricidade na Largura	$eL3 := \left  \frac{Pt3 \cdot Ycg3}{Pt3} \right $	$eL3 = 0 \text{ m}$
Largura efetiva da Base	$L3 := (L - 2 \cdot eL3)$	$L3 = 8 \text{ m}$
Área efetiva (carregamento excentrico)	$A3 := (L3 \cdot C3)$	$A3 = 64 \text{ m}^2$
Tensão atuante após a Instalação dos MCVs	$\sigma3I := \left( \frac{Pt1 + Pmcv \cdot Nmcv \cdot \gamma_f}{A3} \right)$	$\sigma3I = 2731 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$
Fator de segurança na instalação de todas as conexões verticais	$FS3 := \frac{Qult}{\sigma3I}$	$FS3 = \left( \begin{matrix} 1.15 \\ 1.38 \end{matrix} \right)$
Raio da área circular similar a área retangular	$R3 := \sqrt{\frac{A3}{\pi}}$	
Peso submerso do Manifold	$Ps3 := (Pt3) \cdot 0.87$	
Recalque vertical	$Rv3 := \left( \frac{1 - \nu}{4 \cdot Gs \cdot R3} \right) \cdot Ps3$	$Rv3 = \left( \begin{matrix} 70.5 \\ 58.9 \end{matrix} \right) \text{ mm}$

#### 2.2.4) CASO 4 - TODOS OS MCVS INSTALADOS E RETIRADA DE 2 MÓDULOS

Peso total no caso 4	$Pt4 := Pconj + Nmcv \cdot Pmcv + 2 \cdot Pmod$	$Pt4 = 140000 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG dos Módulos em relação ao centro geométrico da Fundação	$Xcg4 := 1200 \cdot \text{mm}$ $Ycg4 := 1200 \cdot \text{mm}$	
Excentricidade no Comprimento	$eC4 := \left  \frac{(2 \cdot Pmod) \cdot Xcg4}{Pt4} \right $	$eC4 = 0.206 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base	$C4 := [C - (2 \cdot eC4)]$	$C4 = 7.59 \text{ m}$
Excentricidade na Largura	$eL4 := \left  \frac{(2 \cdot Pmod) \cdot Ycg4}{Pt4} \right $	$eL4 = 0.206 \text{ m}$
Largura efetiva da Base	$L4 := (L - 2 \cdot eL4)$	$L4 = 7.59 \text{ m}$
Área efetiva (carregamento excêntrico)	$A4 := (L4 \cdot C4)$	$A4 = 57.6 \text{ m}^2$

Tensão atuante após a retirada de 2 módulos

$$\sigma_4 := \left( \frac{P_{conj} + 2 \cdot P_{mod} + P_{mcv} \cdot N_{mcv} \cdot \gamma_f}{A_4} \right)$$

$$\sigma_4 = 2619 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Fator de segurança na instalação de todas as conexões verticais

$$FS_4 := \frac{Q_{ult}}{\sigma_4}$$

$$FS_4 = \begin{pmatrix} 1.2 \\ 1.44 \end{pmatrix}$$

Raio da área circular similar a área retangular

$$R_4 := \sqrt{\frac{A_4}{\pi}}$$

Peso submerso do Manifold

$$P_{s4} := P_{t4} \cdot 0.87$$

Recalque vertical

$$R_{v4} := \left( \frac{1 - \nu}{4 \cdot G_s \cdot R_4} \right) \cdot P_{s4}$$

$$R_{v4} = \begin{pmatrix} 63.5 \\ 53 \end{pmatrix} \text{mm}$$

Momento

$$M_4 := e_{C4} \cdot P_{s4}$$

Deformação angular

$$\theta_4 := \left[ \frac{3(1 - \nu)}{8G_s \cdot R_4^3} \right] \cdot M_4$$

$$\theta_4 = \begin{pmatrix} 0.0612 \\ 0.0511 \end{pmatrix} \text{deg}$$

Diferença de recalque devido à def. angular

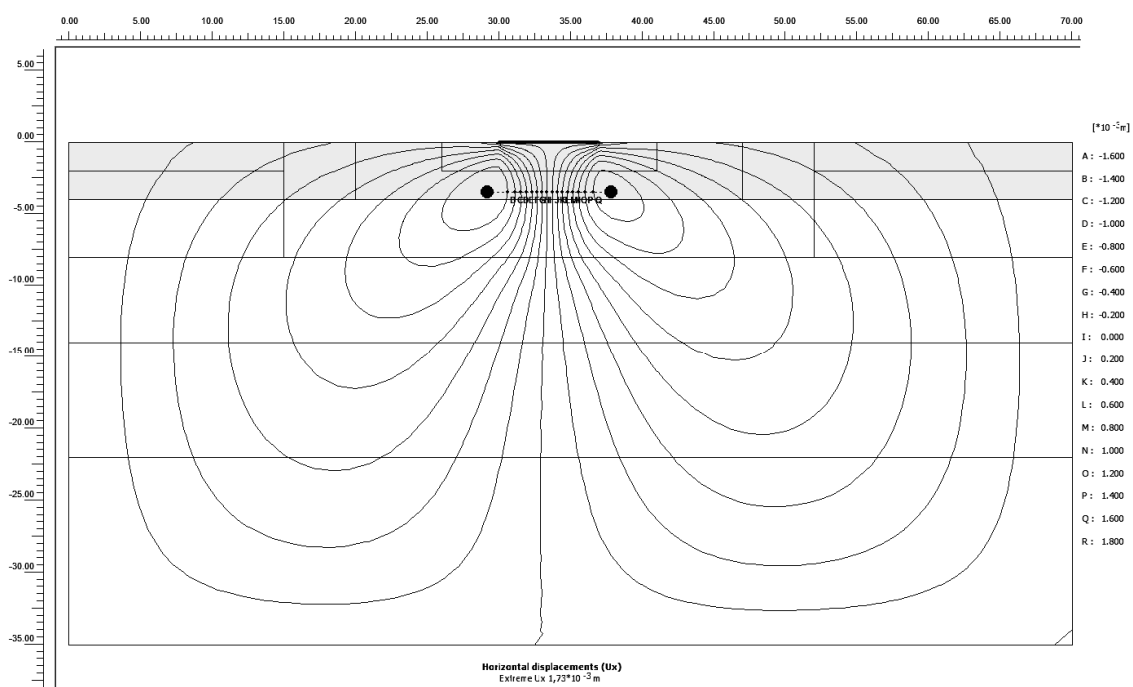
$$h_4 := L \cdot \sin(\theta_4)$$

$$h_4 = \begin{pmatrix} 8.548 \\ 7.138 \end{pmatrix} \text{mm}$$

## A.2 Estudo de condições de contorno

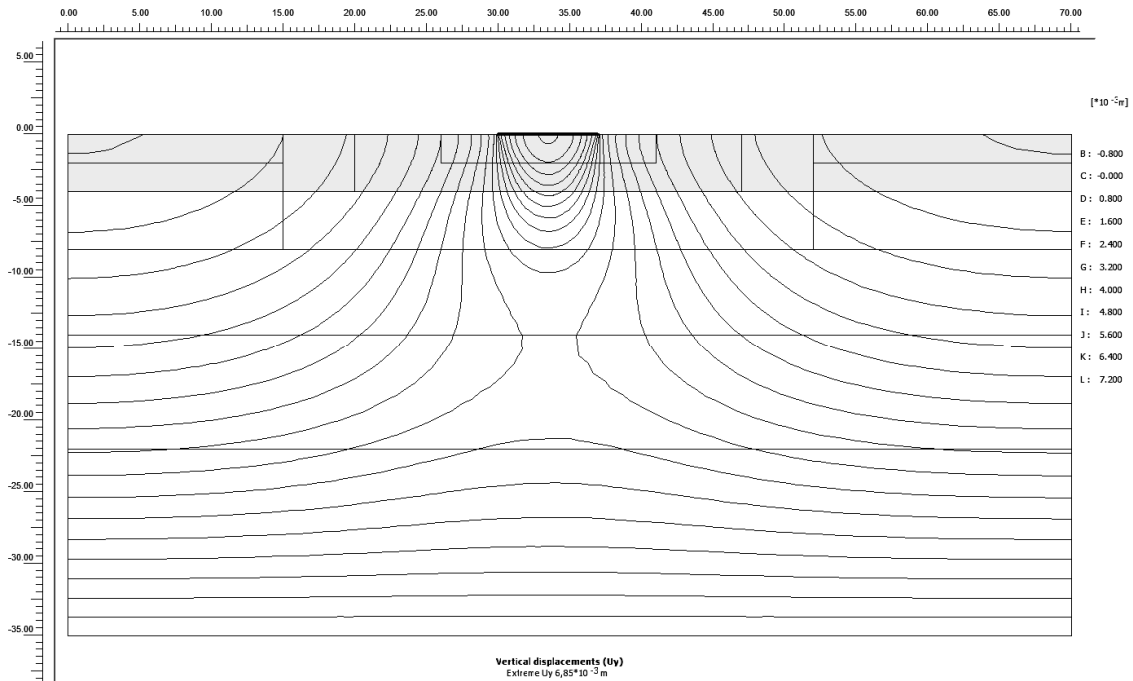
A seguir, é apresentado o estudo de condições de contorno que resultou nas dimensões da área de controle do modelo analisado.

A figura A1 mostra o deslocamento horizontal do solo em uma área de controle de 70m de largura com 35m de profundidade. Pode ser verificada a grande influência das laterais do modelo sobre o deslocamento horizontal.



**Figura A1 – deslocamento horizontal do solo em área de 70m x 35m**

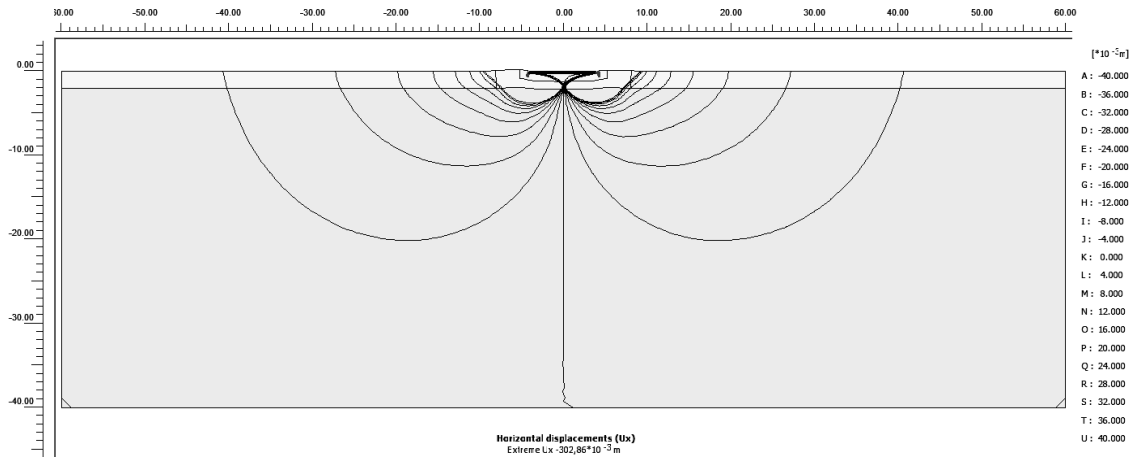
A figura A2 mostra o deslocamento vertical do solo em uma área de controle de 70m de largura com 35m de profundidade. Pode ser verificada a grande influência das laterais do modelo sobre o deslocamento vertical. Pode ser verificado ainda uma pequena influência da profundidade sobre o deslocamento vertical.



**Figura A2 – deslocamento vertical do solo em área de 70m x 35m**

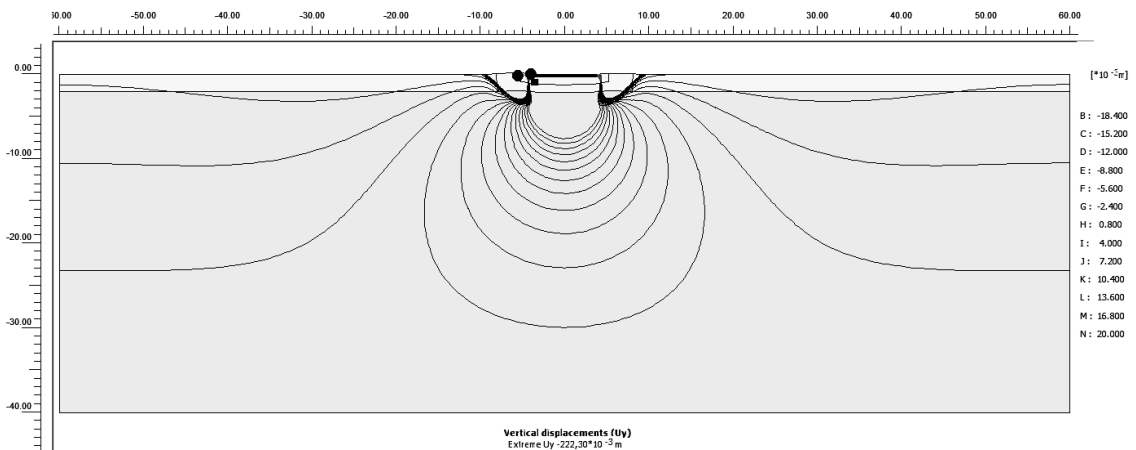
Baseando-se nestas verificações, foram aumentadas a largura e profundidade do modelo de forma a eliminar ou minimizar as influências das laterais sobre o modelo.

A figura A3 mostra o deslocamento horizontal do solo em uma área de controle de 120m de largura com 40m de profundidade. Pode ser verificada que a influência das laterais do modelo sobre o deslocamento horizontal é praticamente nula.



**Figura A3 – deslocamento horizontal do solo em área de 120m x 40m**

A figura A4 mostra o deslocamento vertical do solo em uma área de controle de 120m de largura com 40m de profundidade. Pode ser verificada que a influência das laterais do modelo sobre o deslocamento vertical é praticamente nula.

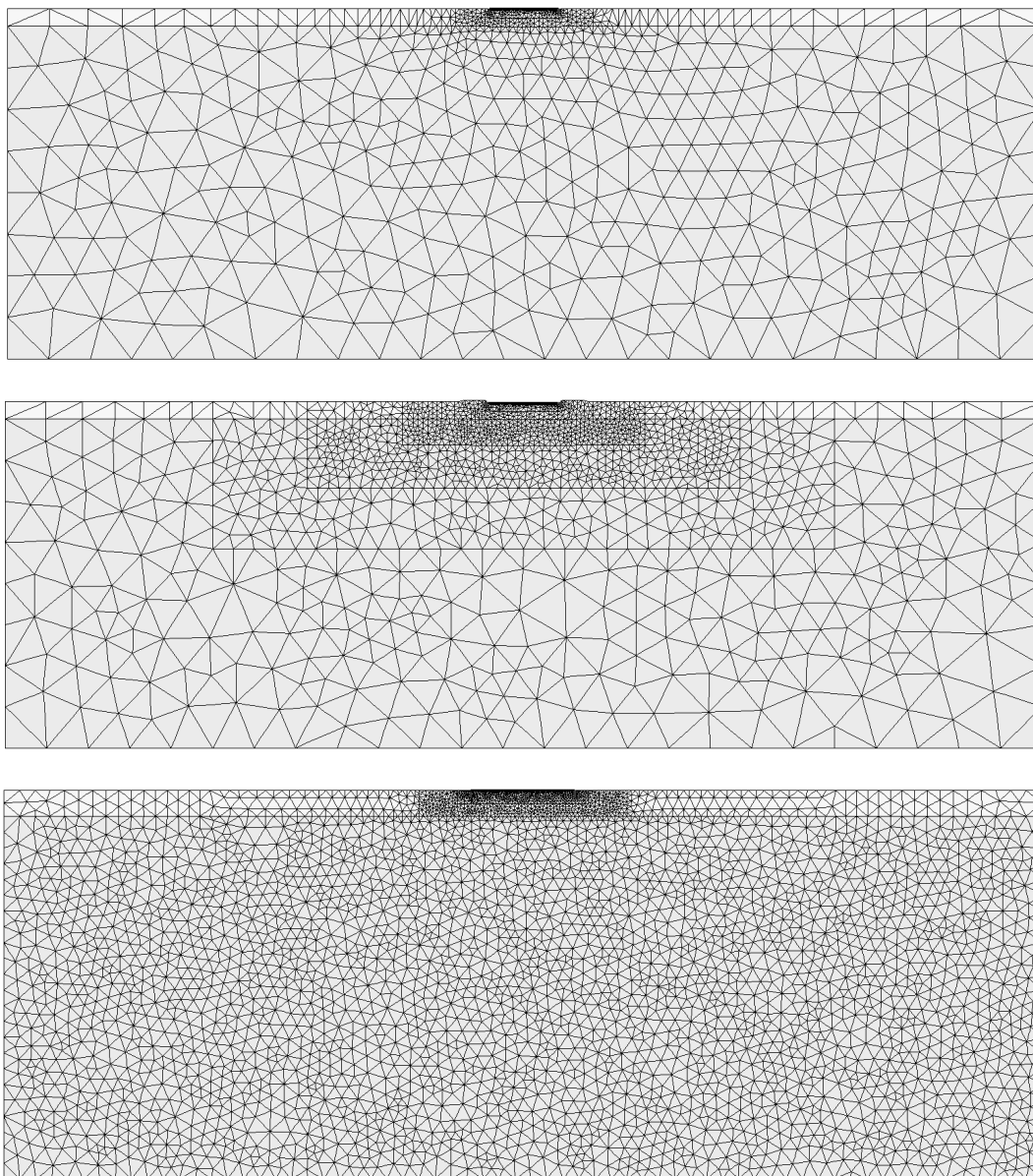


**Figura A4 – deslocamento vertical do solo em área de 120m x 40m**

### **A.3 Análise de sensibilidade da malha**

Nesta seção os resultados de diferentes análises com diferentes malhas é mostrado. O refinamento da malha pode melhorar o resultado das análises, porém com um custo de tempo adicional de processamento.

Três níveis de geometria e refinamento de malha foram analisados, com 1463, 3113 e 7849 elementos, como mostra a figura A5.



**Figura A5 –malhas com 1463, 3113 e 7849 elementos**

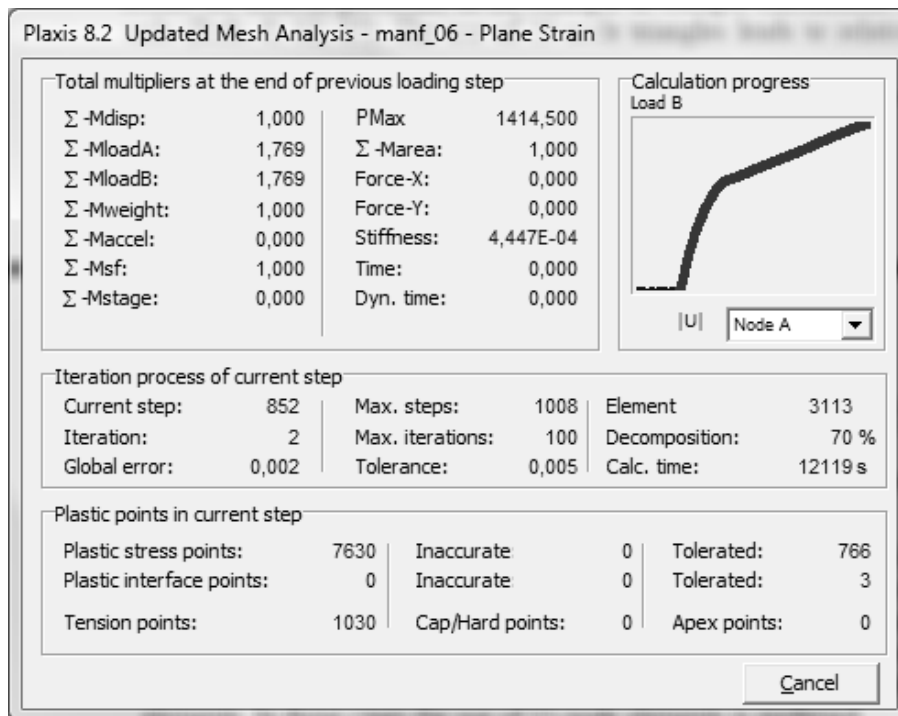


Para um mesmo caso, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Tabela A1.

**Tabela A1 – Comparação entre diferentes malhas**

Número de elementos	Tempo de processamento	Resultado (multiplicador)
1463	2640s	1,786
3113	14416s	1,780
7849	22087s	1,778

A figura A6 mostra o andamento da análise para um caso com 3113 nós. Na figura, a análise está sendo calculada há 12119s.



**Figura A6 – análise com 3113 elementos em andamento**

A partir dos resultados obtidos com os diferentes níveis de refinamento, foi escolhido o nível de refinamento com 1463 elementos, pois obteve resultados bastante próximos aos obtidos em análises mais refinadas e mais demoradas. Além deste fato, seus resultados foram um pouco mais conservadores que as análises refinadas, dando segurança em prosseguir com a análise menos refinada.

#### **A.4 Análise da influência do módulo de elasticidade**

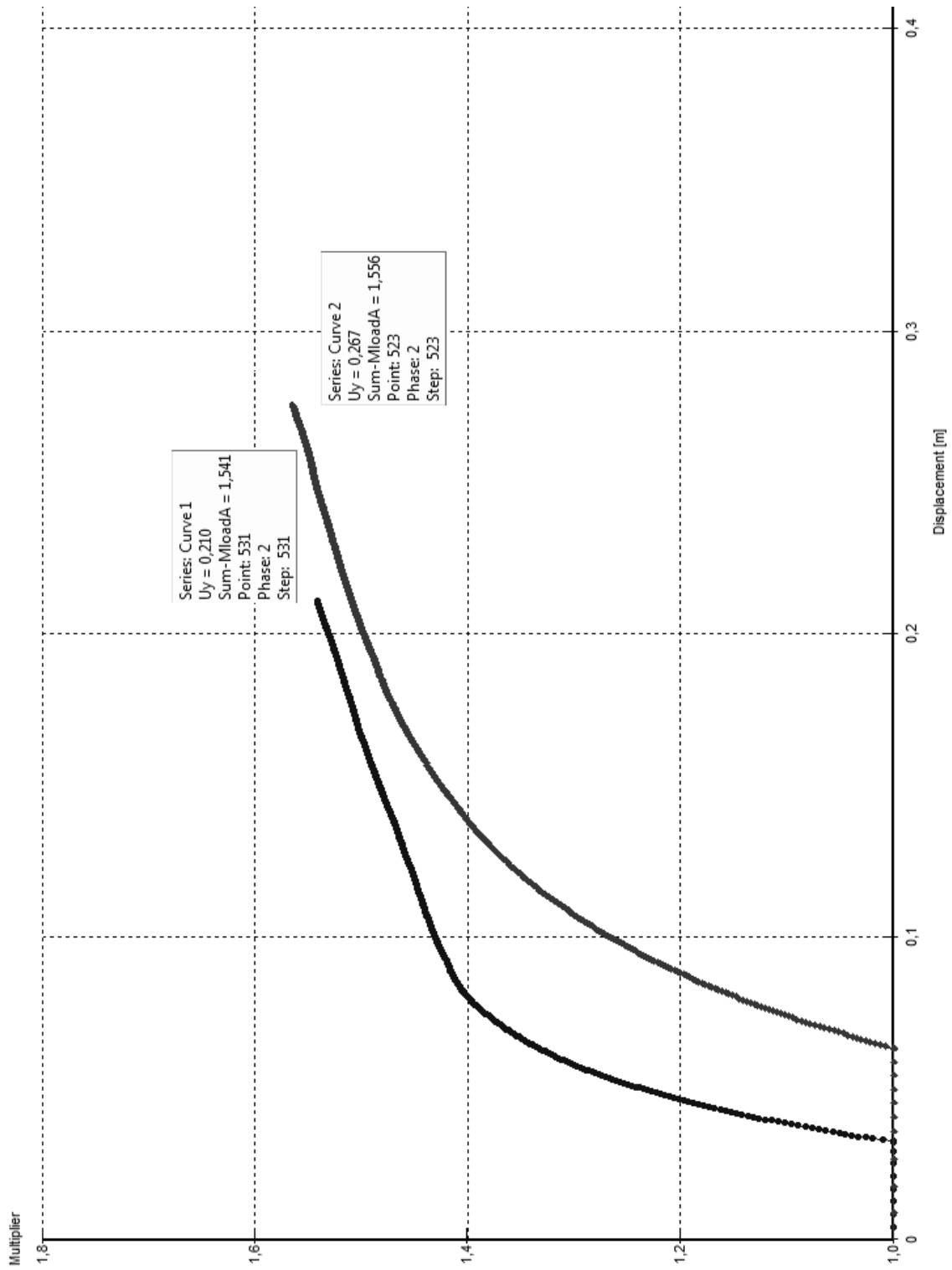
De acordo com a norma, o valor do módulo de elasticidade do solo pode ser estimado através de:

$$200 \cdot S_u \leq E \leq 400 \cdot S_u$$

Para avaliar a influência desta variável, realizou-se uma análise comparativa de fator de segurança e deslocamento para um mesmo caso, utilizando  $E=200S_u$  e  $E=400S_u$ . O gráfico de multiplicadores por deslocamento é mostrado na página seguinte.

Pode ser visto na figura A7 que, para um mesmo carregamento, o deslocamento inicial foi proporcional: 32mm e 63mm. No caso do fator de segurança, as duas análises obtiveram resultados parecidos: 1,541 e 1,556.

Como os deslocamentos esperados são da ordem de 40mm, e não há grandes diferenças entre o resultado de fator de segurança, optou-se realizar os cálculos considerando  $E=400S_u$ .



**Figura A7 – gráfico de multiplicador x deslocamento com E=200Su e E=400Su.**

## A.5 Memória de cálculo analítica considerando capacidade da saia

A seguir será apresentada a memória de cálculo analítica modificada para consideração da saia.

### MEMÓRIA DE CÁLCULO ANALÍTICO PARA FUNDAÇÃO DE MANIFOLD

#### 1) DADOS DE ENTRADA:

##### 1.1) DADOS DO MANIFOLD:

Peso (no ar) da base do Manifold	$P_{man} := 70000 \cdot \text{kgf}$	
Peso (no ar) da sub-base	$P_{sub} := 10000 \cdot \text{kgf}$	
Peso (no ar) do conjunto base+sub-base	$P_{conj} := P_{man} + P_{sub}$	$P_{conj} = 80000 \text{ kgf}$
Peso (no ar) dos MCVs	$P_{mcv} := 4500 \cdot \text{kgf}$	
Quantidade de MCVs	$N_{mcv} := 8$	
Peso (no ar) dos Módulos	$P_{mod} := 12000 \cdot \text{kgf}$	
Quantidade de Módulos	$N_{mod} := 4$	
Largura da Base	$L := 8.0 \cdot \text{m}$	
Comprimento da Base	$C := 8.0 \cdot \text{m}$	
Área da Base da Fundação	$A := (L \cdot C)$	$A = 64 \text{ m}^2$
Espessura da Saia ( Sub-base )	$t := 10 \cdot \text{mm}$	
Alturas da Saia analisadas:	$h_0 := 0.0 \cdot \text{m}$	
	$h_1 := 0.25 \cdot \text{m}$	
	$h_2 := 0.50 \cdot \text{m}$	
	$h_3 := 0.75 \cdot \text{m}$	
	$h_4 := 1.00 \cdot \text{m}$	

##### 1.2) DADOS DO SOLO MARINHO: Dados de solo do Campo de Roncador

Inclinação do Talude - 0°		
Resistência ao cisalhamento (não drenado), h=profundidade: ( $0 < h < 2.0$ metros)		$S_u = 5 \text{ kPa}$
Resistência ao cisalhamento (não drenado), h=profundidade: ( $h > 2.0$ metros)		$S_u = ( 2 + 1.5 h ) \text{ kPa}$
Valor de $S_u$ considerando área de influência: Considerando-se as dimensões da base do equipamento e a área de influência no solo, o valor de $S_u$ adotado no cálculo corresponde a média ponderada das resistências das camadas atuantes, ou seja $S_u = 5.987 \text{ kPa}$ .		$S_u = 5.987 \text{ kPa}$
Coefficiente de Poisson para solo coesivo		$\nu := 0.3$

Young Modulus

$$E = 400 \cdot Su$$

Shear Modulus

$$Gs = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

### 1.3) PREMISSAS DE PROJETO

Fator de majoração de carga aplicável aos equipamentos que não terão a confirmação do seu peso através processo de pesagem (API)

$$\gamma_f := 1.3$$

Para cálculo realizado de acordo com a API, utilizaremos Su da camada afetada

$$Su0 := 5.00 \text{ kPa}$$

Para cálculo realizado de acordo com a metodologia aprovada pelo CENPES, utilizaremos Su da área de influência, corrigido de acordo com a altura da saia

$$Su1 := \left( 5.987 + 1.1 \cdot \frac{h}{m} \right) \cdot \text{kPa}$$

$$Su1 = \begin{pmatrix} 5.987 \\ 6.262 \\ 6.537 \\ 6.812 \\ 7.087 \end{pmatrix} \text{ kPa}$$

Fator de capacidade de carga (solo coesivo  $\psi = 0$ ) (API fig.C6.13.1-1)

$$Nc := 5.14$$

Fator de capacidade de carga (solo coesivo  $\psi = 0$ ) (API fig.C6.13.1-1)

$$Nq := 1$$

Fator de correção de forma da fundação (retangular)

$$Sc := (1) + \left( 0.19 \cdot \frac{L}{C} \right)$$

$$Sc = 1.19$$

### 1.4) FATORES DA SAIA

Fator de correlação

$$\alpha := 1$$

Capacidade de resistência ao atrito

$$flat := \alpha \cdot Su0$$

$$flat = 5 \text{ kPa}$$

Área lateral

$$Alat := [(2 \cdot h \cdot L) + (2 \cdot h \cdot C)]$$

$$Alat = \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 16 \\ 24 \\ 32 \end{pmatrix} \text{ m}^2$$

Resistência lateral da saia

$$Qlat := flat \cdot Alat$$

$$Qlat = \begin{pmatrix} 0 \\ 4079 \\ 8158 \\ 12237 \\ 16315 \end{pmatrix} \text{ kgf}$$

Resistência total da saia	$Q_{saia} := Q_{lat}$	$Q_{saia} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4079 \\ 8158 \\ 12237 \\ 16315 \end{pmatrix} \text{ kgf}$
---------------------------	-----------------------	--

## 2) DADOS DE SAÍDA

### 2.1) VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DA FUNDAÇÃO

#### 2.1.1 - CAPACIDADE DE CARGA NO MUDMAT

Capacidade de carga no Mudmat	API	$Q_{ult0} := Su0 \cdot Nc \cdot Sc$	$Q_{ult0} = 3119 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$
	CENPES	$Q_{ult1} := Su1 \cdot Nc \cdot Sc$	$Q_{ult1} = \begin{pmatrix} 3734 \\ 3906 \\ 4077 \\ 4249 \\ 4420 \end{pmatrix} \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

### 2.2) TENSÕES ATUANTES E DEFORMAÇÕES NOS DIFERENTES CASOS DE CARREGAMENTOS

#### 2.2.1) CASO 1 - INSTALAÇÃO DO MANIFOLD

Nesta análise foi considerado o peso do Manifold na condição de instalação, ou seja, com todos os módulos montados. Está sendo considerado uma posição do CG centralizada em relação ao centro geométrico da Fundação.

Peso total no caso 1	$Pt1 := P_{conj} + P_{mod} \cdot N_{mod}$	$Pt1 = 128000 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG em relação ao centro geométrico da Fundação	$X_{cg1} := 0 \text{ mm}$ $Y_{cg1} := 0 \text{ mm}$	
Excentricidade no Comprimento	$eC1 := \frac{(X_{cg1}) \cdot Pt1}{Pt1}$	$eC1 = 0 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base	$C1 := (C - 2 \cdot eC1)$	$C1 = 8 \text{ m}$
Excentricidade na Largura	$eL1 := \frac{(Y_{cg1}) \cdot Pt1}{Pt1}$	$eL1 = 0 \text{ m}$
Largura efetiva da Base	$L1 := (L - 2 \cdot eL1)$	$L1 = 8 \text{ m}$

Área efetiva (carregamento excêntrico)		$A1 := L1 \cdot C1$	$A1 = 64 \text{ m}^2$
Fator de segurança na instalação do Manifold	API	$FS1_0 := \frac{Qult0 \cdot A1 + Qsaia}{Pt1}$	$FS1_0 = \begin{pmatrix} 1.56 \\ 1.59 \\ 1.62 \\ 1.65 \\ 1.69 \end{pmatrix}$
	Ruptura	$FS1_1 := \frac{Qult1 \cdot A1 + Qsaia}{Pt1}$	$FS1_1 = \begin{pmatrix} 1.87 \\ 1.98 \\ 2.1 \\ 2.22 \\ 2.34 \end{pmatrix}$

### 2.2.2) CASO 2 - INSTALAÇÃO DOS MCVS EM CONDIÇÃO DE DESALINHAMENTO MÁXIMO

Nesta análise foi considerado o assentamento dos MCVs 1 a 5  
 Cargas consideradas: Peso do manifold, sub-base, módulos removíveis e MCVs 1 a 5

Peso total no caso 2		$Pt2 := Pt1 + 5 \cdot Pmcv$	$Pt2 = 150500 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG dos MCVs em relação ao centro geométrico da Fundação		$Xcg_{max} := 3.25 \text{ -m}$ $Ycg_{max} := 3.25 \text{ -m}$	
Excentricidade no Comprimento		$eC2 := \left  \frac{Pmcv \cdot -3.25 \text{ -m} + Pmcv \cdot 0 \text{ -m} + 3 \cdot Pmcv \cdot 3.25 \text{ -m}}{Pt2} \right $	$eC2 = 0.194 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base		$C2 := [C - (2 \cdot eC2)]$	$C2 = 7.61 \text{ m}$
Excentricidade na Largura		$eL2 := \frac{Pmcv \cdot -3.25 \text{ -m} + Pmcv \cdot 0 \text{ -m} + 3 \cdot Pmcv \cdot 3.25 \text{ -m}}{Pt2}$	$eL2 = 0.194 \text{ m}$
Largura efetiva da Base		$L2 := (L - 2 \cdot eL2)$	$L2 = 7.61 \text{ m}$
Área efetiva (carregamento excêntrico)		$A2 := ((L2 \cdot C2))$	$A2 = 57.9 \text{ m}^2$

Fator de segurança na instalação dos MCVs	API	$FS2_0 := \frac{Qult0 \cdot A2 + Qsaia}{Pt1 + (5 \cdot Pmcv) \cdot \gamma f}$	$FS2_0 = \begin{pmatrix} 1.15 \\ 1.17 \\ 1.2 \\ 1.23 \\ 1.25 \end{pmatrix}$
	Ruptura	$FS2_1 := \frac{Qult1 \cdot A2 + Qsaia}{Pt1 + (5 \cdot Pmcv) \cdot \gamma f}$	$FS2_1 = \begin{pmatrix} 1.38 \\ 1.46 \\ 1.55 \\ 1.64 \\ 1.73 \end{pmatrix}$

### 2.2.3) CASO 3 - INSTALAÇÃO DE TODOS OS MCVS

Peso total no caso 2	$Pt3 := Pt1 + Nmcv \cdot Pmcv$	$Pt3 = 164000 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG dos MCVs em relação ao centro geométrico da Fundação	$Xcg3 := 0 \text{ -mm}$ $Ycg3 := 0 \text{ -mm}$	
Excentricidade no Comprimento	$eC3 := \left  \frac{Pt3 \cdot Xcg3}{Pt3} \right $	$eC3 = 0 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base	$C3 := [C - (2 \cdot eC3)]$	$C3 = 8 \text{ m}$
Excentricidade na Largura	$eL3 := \left  \frac{Pt3 \cdot Ycg3}{Pt3} \right $	$eL3 = 0 \text{ m}$
Largura efetiva da Base	$L3 := (L - 2 \cdot eL3)$	$L3 = 8 \text{ m}$
Área efetiva (carregamento excentrico)	$A3 := (L3 \cdot C3)$	$A3 = 64 \text{ m}^2$

Fator de segurança na instalação de todas as conexões verticais	API	$FS3_0 := \frac{Qult0 \cdot A3 + Qsaia}{Pt1 + (Nmcv \cdot Pmcv) \cdot \gamma f}$	$FS3_0 = \begin{pmatrix} 1.14 \\ 1.17 \\ 1.19 \\ 1.21 \\ 1.24 \end{pmatrix}$
	Ruptura	$FS3_1 := \frac{Qult1 \cdot A3 + Qsaia}{Pt1 + (Nmcv \cdot Pmcv) \cdot \gamma f}$	$FS3_1 = \begin{pmatrix} 1.37 \\ 1.45 \\ 1.54 \\ 1.63 \\ 1.71 \end{pmatrix}$



#### 2.2.4 CASO 4 - TODOS OS MCVS INSTALADOS E RETIRADA DE 2 MÓDULOS

Peso total no caso 4	$Pt4 := Pconj + Nmcv \cdot Pmcv + 2 \cdot Pmod$	$Pt4 = 140000 \text{ kgf}$
Deslocamento do CG dos Módulos em relação ao centro geométrico da Fundação	$Xcg4 := 1200 \text{ mm}$ $Ycg4 := 1200 \text{ mm}$	
Excentricidade no Comprimento	$eC4 := \left  \frac{(2 \cdot Pmod) \cdot Xcg4}{Pt4} \right $	$eC4 = 0.206 \text{ m}$
Comprimento efetivo da Base	$C4 := [C - (2 \cdot eC4)]$	$C4 = 7.59 \text{ m}$
Excentricidade na Largura	$eL4 := \left  \frac{(2 \cdot Pmod) \cdot Ycg4}{Pt4} \right $	$eL4 = 0.206 \text{ m}$
Largura efetiva da Base	$L4 := (L - 2 \cdot eL4)$	$L4 = 7.59 \text{ m}$
Área efetiva (cargamento excêntrico)	$A4 := (L4 \cdot C4)$	$A4 = 57.6 \text{ m}^2$

Fator de segurança na instalação de todas as conexões verticais

API

$$FS4_0 := \frac{Qult0 \cdot A4 + Qsaia}{Pconj + 2 \cdot Pmod + (Nmcv \cdot Pmcv) \cdot \gamma_f}$$

$$FS4_0 = \begin{pmatrix} 1.19 \\ 1.22 \\ 1.25 \\ 1.27 \\ 1.3 \end{pmatrix}$$

Ruptura

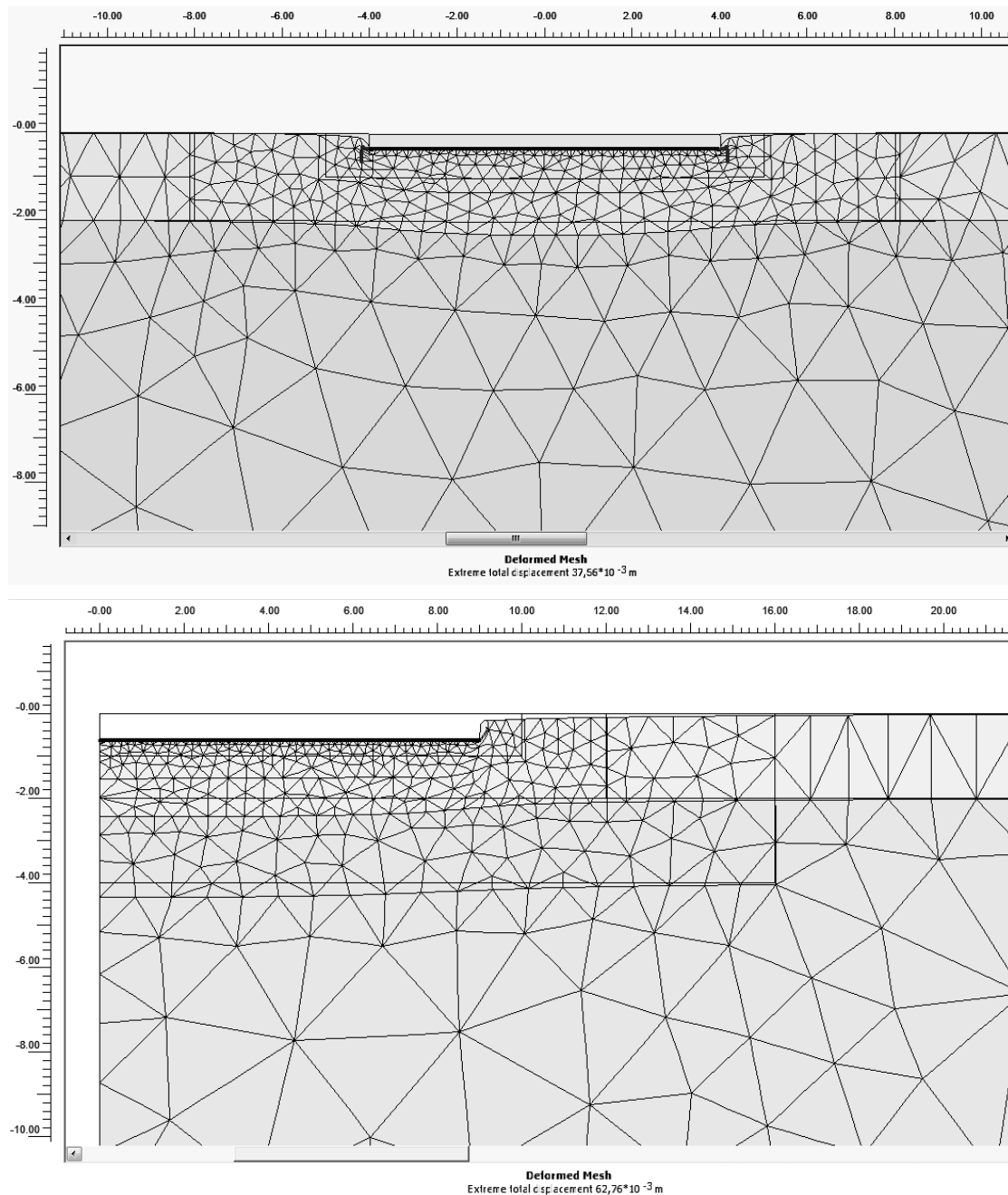
$$FS4_1 := \frac{Qult1 \cdot A4 + Qsaia}{Pconj + 2 \cdot Pmod + (Nmcv \cdot Pmcv) \cdot \gamma_f}$$

$$FS4_1 = \begin{pmatrix} 1.43 \\ 1.52 \\ 1.61 \\ 1.7 \\ 1.8 \end{pmatrix}$$

## A.6 Cálculo de deformações através de análise axissimétrica

Nesta seção é comparado os resultados dos cálculos de deformações para um caso. Para o caso 3, os resultados dos cálculos analíticos e análise numérica plana são comparados com o resultado de uma análise axissimétrica.

A Figura A8 mostra os resultados de análises numéricas plana e axissimétrica.



**Figura A8 – Malhas deformadas de análise plana e axissimétrica, respectivamente.**

Para um mesmo caso, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Tabela A2.

**Tabela A2 – Comparação entre os diferentes resultados de deformação**

Tipo de análise	Deformação (mm)
Analítica	70,5
Analítica Superfície de Ruptura	58,9
Numérica plana	37,5
Numérica Axissimétrica	62,8

Pelos resultados da tabela pode ser visto que a análise numérica axissimétrica apresenta resultado próximo ao resultado do cálculo analítico por superfície de ruptura, mostrando que a aproximação por superfície de ruptura está mais próximo do resultado real que apenas considerar a resistência da camada superior.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)