

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA



Curso de Engenharia Civil  
Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas

## PROJETO DE SUPORTE MECÂNICO PARA CORREÇÃO DE VAOS LIVRES EM DUTOS RIGIDOS SUBMARINOS

ALEXANDRE CELLES CORDEIRO

Projeto de Final de Curso apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

---

Gilberto Bruno Ellwanger  
Prof. D.Sc., EP/UFRJ (Orientador)

---

Maria Cascão Ferreira de Almeida  
Prof. D.Sc., EP/UFRJ

---

José Renato Mendes de Sousa  
Prof. D.Sc., PEC/UFRJ

## RESUMO

Esse trabalho visa apresentar o projeto de um suporte mecânico para dutos rígidos submarinos, feito em aço do tipo pórtico plano com duas pernas, tendo sua modelagem estrutural feita parte em elementos finitos de placa, parte em elementos de barra, dando ênfase à parte estrutural e também apresentar o cálculo de proteção catódica e fundações. Nessa análise pode-se constatar que além da metodologia de suportaço de dutos por suporte mecânico ser viável no que se refere aos aspectos estruturais de tensões encontradas e limites das normas correspondentes, ela atende as necessidades de durabilidade que tal projeto exige.

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	HISTÓRICO	6
1.2	MOTIVAÇÃO	8
1.3	OBJETIVO	11
2	DESCRIÇÃO DE SUPORTE MECÂNICO	12
3	DADOS PRINCIPAIS DO SUPORTE MECÂNICO	14
3.1	DADOS AMBIENTAIS	14
3.2	COEFICIENTE DE ARRASTO ( $C_D$ )	14
3.3	ALTURA DO SUPORTE	14
3.4	FUNDAÇÃO DO SUPORTE	14
3.5	CONSIDERAÇÃO DO SOLO	15
4	CONCEPÇÃO ESTRUTURAL DO SUPORTE	16
4.1	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS SEÇÕES UTILIZADAS	16
5	ANÁLISE	17
5.1	METODOLOGIA APLICADA	17
5.1.1	ELEMENTOS DE BARRAS	17
5.1.2	ELEMENTOS DE PLACA	18
5.1.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	18
5.2	CARREGAMENTO	22
5.2.1	PESO PRÓPRIO	22
5.2.2	PESO DO DUTO	22
5.2.3	FORÇA DE ARRASTO	23
5.2.4	SUMÁRIO DOS CARREGAMENTOS APLICADOS	23
5.2.5	PONTO DE APLICAÇÃO DAS CARGAS	23
5.3	FUNDAÇÃO DO SUPORTE MECÂNICO	24
5.4	PROTEÇÃO CATÓDICA BASEADA NA DNV RP B 40124	
5.4.1	PROTEÇÃO CATÓDICA E SEUS PROCEDIMENTOS	24
6	DESENHOS TÉCNICOS DO SUPORTE	28
6.1	ARRANJO GERAL	28
7	VERIFICAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS	31
7.1	METODOLOGIA APLICADA	31
7.1.1	DEFINIÇÃO DE UNIT-CHECK SEGUNDO A API RP2A WSD 21 <sup>th</sup> :	31
7.1.2	DEFINIÇÃO DE UNIT-CHECK SEGUNDO A AISC Manual of Steel Construction ASD 9 <sup>th</sup> :	31
7.2	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL - SUPORTE	32
7.3	RESULTADOS DA ANÁLISE DA FUNDAÇÃO	35
8	INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA	37
8.1	METODOLOGIA APLICADA	37
8.2	VERIFICAÇÃO DA FUNDAÇÃO	37
9	ELEMENTOS ACESSÓRIOS	40

9.1	TORQUE NO SEM FIM DA HASTE TELESCÓPICA	40
9.2	VERIFICAÇÃO DE PINOS E CONECTORES	40
10	DISCUSSÃO DE RESULTADOS E PRINCIPAIS CONCLUSÕES	43
11	BIBLIOGRAFIA	44

# 1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo e gás natural sempre teve grande importância no cenário político-econômico em todo mundo. Estima-se que exista um grande potencial de petróleo em águas profundas e ultra profundas, o qual poderá vir a responder por parte considerável da extração petrolífera mundial.

No Brasil, o aumento da produção, e as recentes descobertas de grandes reservas de petróleo, localizadas nos mega-campos de Tupi com cerca de 5 a 8 bilhões de barris e da área “Pão de Açúcar” com 33 bilhões de barris (1), tem resultado, também, em grande impulso nas pesquisas acadêmicas ligadas ao projeto dos dutos de aço e itens acessórios, necessários ao transporte destes fluidos.

Hoje a Petrobras conta com 23.142 km de dutos (2) para o transporte de uma produção de 1918 mil barris por dia de petróleo. Como dessa produção mais de 80% do total vem do mar, o transporte via duto submarino tem uma grande importância econômica e o funcionamento da suportação dos dutos em águas profundas se torna essencial.

## 1.1 HISTÓRICO

Existe um pouco de disputa sobre quando o primeiro oleoduto foi construído. Historiadores russos dizem que transporte por oleoduto foi iniciado por Vladimir Shukhov na companhia de Branobel no ano de 1860 (3). Sem dúvida, os oleodutos são o caminho mais econômico para transportar quantidades grandes de óleo ou gás natural.

Os oleodutos são feitos de aço ou tubos de plástico com diâmetro interno tipicamente de 10 até 120 cm. O óleo é mantido em movimento por um sistema de estações de bombeamento construídas ao longo do duto e normalmente flui em velocidade de cerca de 1 a 6 m/s (4).

O petróleo não refinado contém quantidades variadas de cera, ou parafina, que em baixas temperaturas pode ocorrer a formação de depósitos dentro de um oleoduto. Frequentemente, estes oleodutos são inspecionados e limpos usando *pigs* que significam “pipeline inspection gauge” ou peça para inspeção de dutos.



Figura 1 - Smart PIG

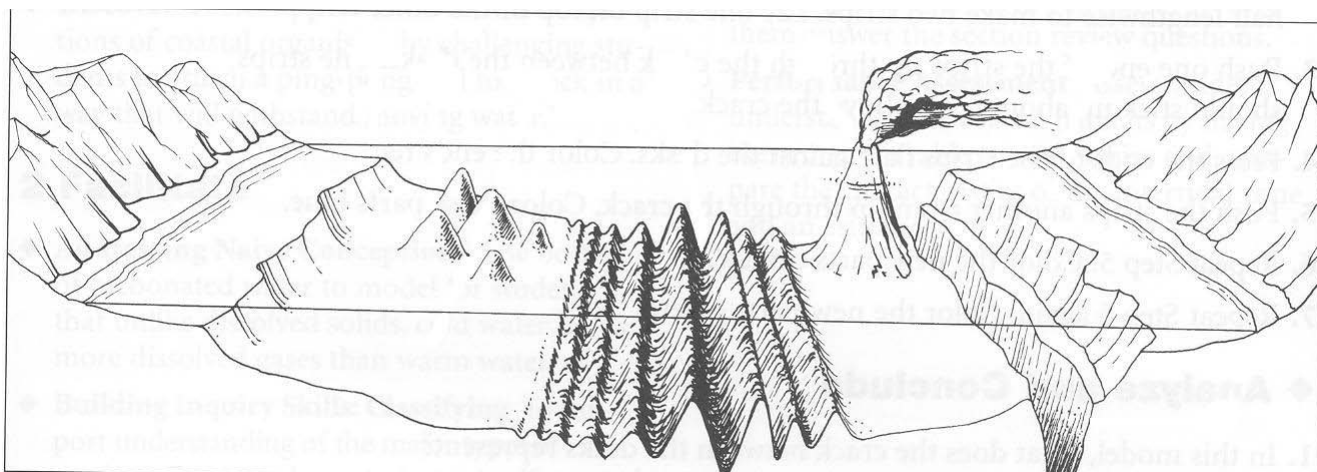
Estes dispositivos são lançados das *pig-launchers* e viajam pelo oleoduto para ser recebidos em qualquer outra estação à jusante, limpando testemunhos de cera e materiais que podem ter acumulado dentro da linha.

Assim como a origem do primeiro oleoduto, não há como precisar quando se construiu ou se definiu a primeira suportaçãõ de um duto submarino. Sabe-se apenas que os pioneiros neste tipo de soluçãõ sãõ os noruegueses quando do projeto e construçãõ de dutos instalados no Mar do Norte.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

As pessoas exploraram os oceanos há milhares de anos. Até recentemente, porém, o fundo do oceano não tinha sido estudado. Por causa da escuridão, das baixas temperaturas, e pressão extrema, cientistas tiveram que desenvolver tecnologia para habilitá-los a estudar o chão de oceano fundo. Aquela tecnologia inclui sonar, scuba, submersíveis, satélites, ROVs, e cartografia de gravidade. O desenvolvimento de sonar foi muito importante para mapear o fundo do oceano. Sonar, que é a abreviatura de *sound navigation and ranging*, é um sistema que usa ondas de som para calcular a distância para um objeto. O equipamento de sonar em um navio envia pulsações de som que ricocheteiam no leito marinho. O equipamento então mede o tempo de retorno das ondas de som ao navio. O tempo de retorno é diretamente proporcional à distância entre o navio e o leito marinho. Usando o sonar, cientistas podiam desenvolver mapas detalhados do leito marinho.

Uma vez que cientistas podiam mapear o leito marinho, eles descobriram algo surpreendente. O leito marinho não era plano, uma planície arenosa estirando entre os continentes, como se achava. De fato, o leito marinho era rochoso e dramaticamente montanhoso.



**Figura 1 – Representação de um relevo submarino**

A sustentação ou ancoragem têm suportação dos dutos submarinos, sido estudado ao longo dos anos em função basicamente de problemas e dificuldades encontrados pelos projetistas para vencer a batimetria irregular do leito marinho, bem como dos eventuais obstáculos existentes no fundo do mar.



Vários tipos de ancoragem já foram concebidos e testados ao longo destes anos utilizando como materiais a argamassa, o concreto e o aço. Como exemplo, pode-se incluir os “grout bags” que são compostos basicamente de sacos de cimento ou argamassa dispostos lado a lado formando uma “pirâmide”.



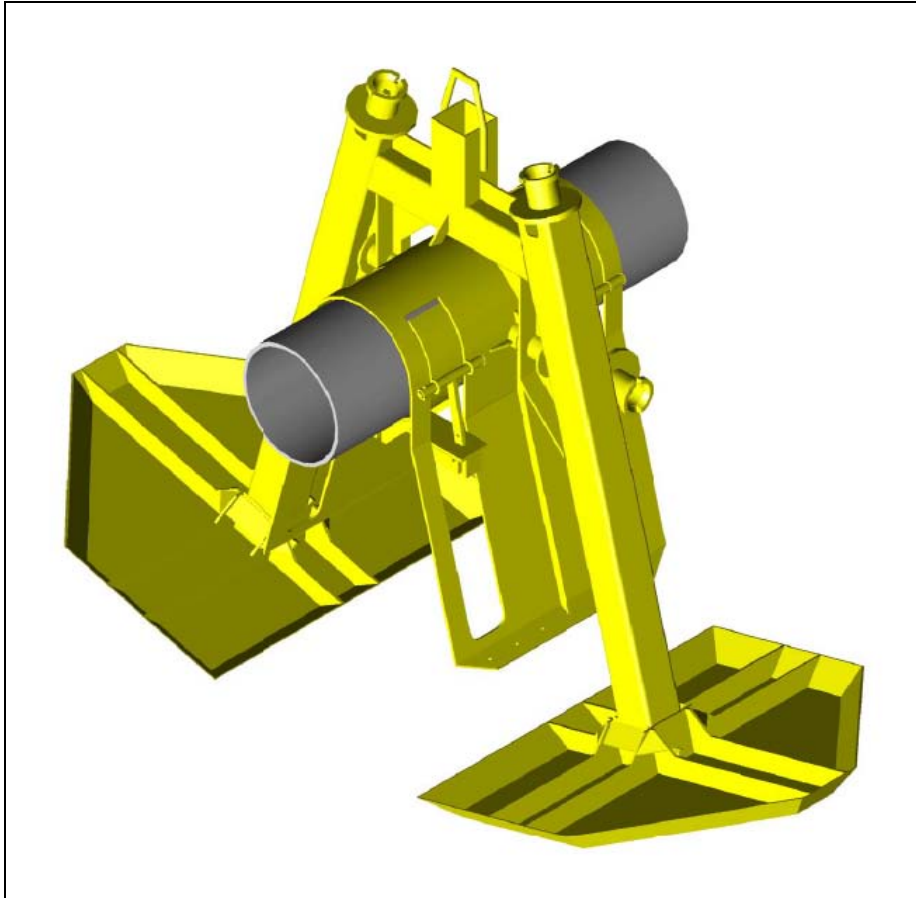
**Figura 2 - Exemplo de Groutbag**

Outro tipo de fundação para dutos rígidos são as mantas de concreto. As mantas de concreto as quais são compostas por blocos de concreto unidos por cabos de polipropileno conferindo uma grande maleabilidade ao conjunto, conforme apresentado na Figura 3.



**Figura 3 - Exemplo de manta de concreto**

Por fim, também são utilizados os suportes mecânicos, os quais são estruturas em aço adequadamente projetadas para atender a situações onde nenhuma das soluções anteriores é aplicável. As Figuras 4 e 5 apresentam exemplos de suportes mecânicos.



**Figura 4 - Exemplo de suporte mecânico.**



**Figura 5 - Exemplo de suporte mecânico instalado no duto**

### **1.3 OBJETIVO**

O escopo deste trabalho abrange:

uma explanação sobre vãos livres em dutos submarinos; e

análise de um suporte mecânico tradicional para dutos submarinos em aço tendo como foco seu dimensionamento estrutural é, também, abordando aspectos relacionados à proteção catódica e à fundação.

## 2 DESCRIÇÃO DE SUPORTE MECÂNICO

Os vãos livres são definidos de acordo com exigências de conforto, fadiga e flambagem, as quais são premissas existentes na norma DNV.RP.F105 – ITEM 6, que é a norma mais atual sobre o assunto. Nela, constam recomendações sobre:

- modelagem estrutural;
- modelagem da interação solo-estrutura (duto);
- modelagem dos carregamentos;
- uma análise estática para obter a configuração estática do duto;
- uma extração modal para obter as frequências naturais e modos de vibração *in-line* e *cross-flow* nos vãos livres;
- uma análise de resposta para obter as variações de tensões existentes no duto devidas a carregamentos de operação e ambientais.

Essas análises visam a definição de um vão livre admissível para o cenário existente. Caso o vão existente seja maior que o admissível, há a necessidade de se adequar o vão ao qual o duto será submetido para um que ele suporte e atenda aos requisitos de vida útil. O suporte mecânico é um dispositivo que tem esta função, de interromper ou dividir o vão adequando-o às exigências normativas.

Aspectos associados à correção de vão livre por uso de suportes mecânicos são exemplificadas nas Figuras 6 a 8 a seguir.

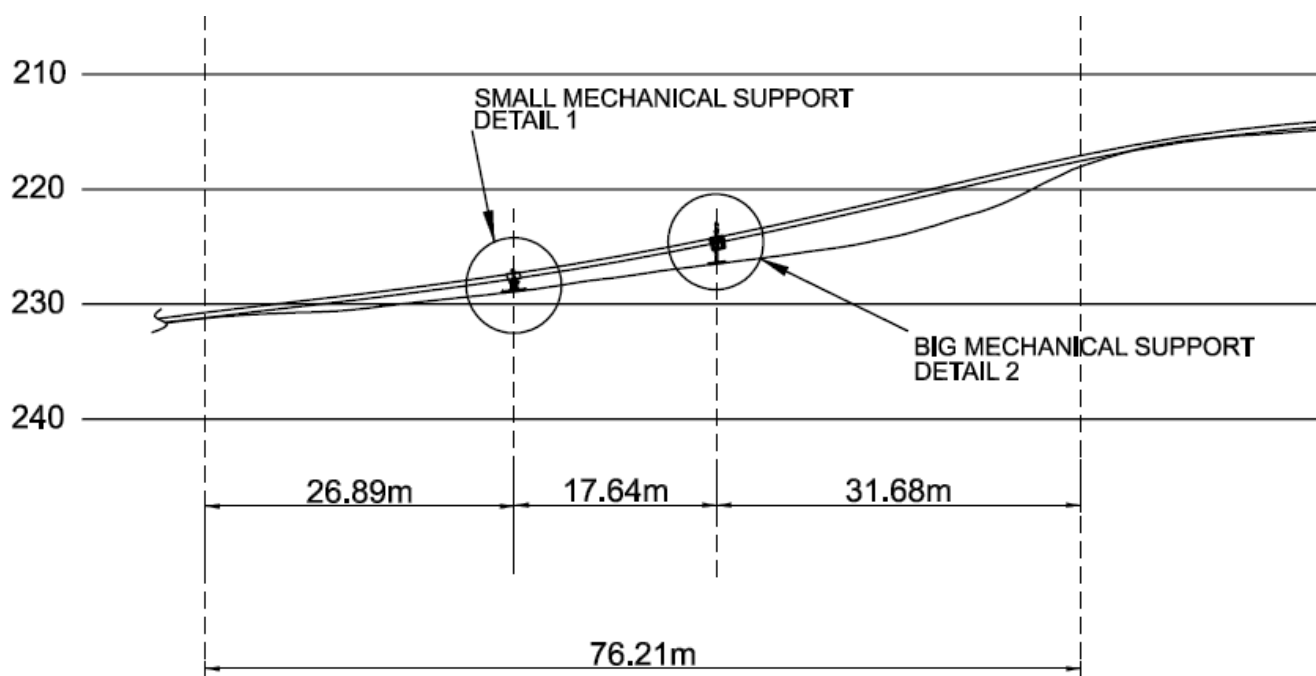
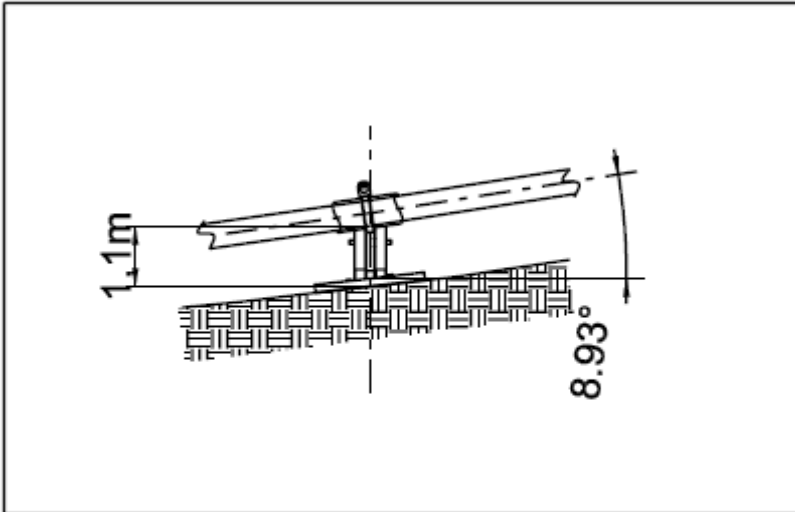
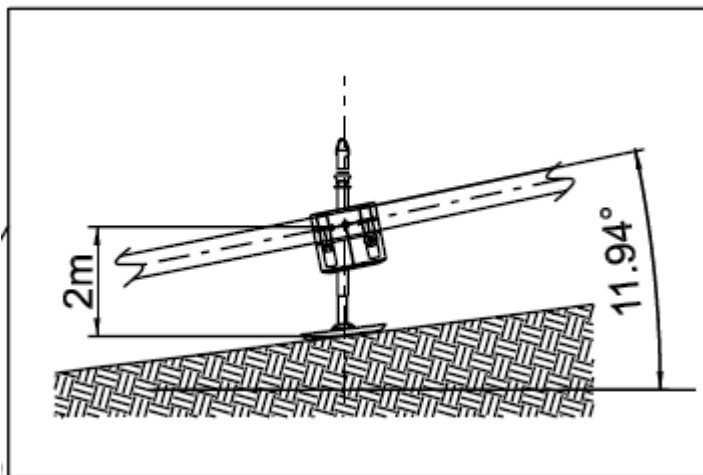


Figura 6 - Perfil longitudinal de duto com correção através de suportes mecânicos.



**Figura 7 - Exemplo de suporte mecânico para pequenas alturas**

O suporte mecânico apresentado na Figura 7 é do tipo “canivete” e pode ser utilizado em correções de vão livre nas quais a altura do vão em questão é pequena.



**Figura 8 - Exemplo de suporte mecânico para grandes alturas**

O suporte mecânico apresentado na Figura 8 é do tipo “cavelete” e pode ser utilizado em correções de vão livre nas quais a altura do vão em questão tem profundidades variando entre 2m e 4m.

A prática recomenda os limites indicados na Tabela 1 para a escolha da fundação dos dutos.

Declividade do Leito Marinho	Altura do Vão		
	< 1m	1m < h < 3m	> 3m
0 a 3 graus	Grout Bags	Grout Bags	Suporte Mecânico
3 a 6 graus	Grout Bags	Grout Bags ou Suporte Mecânico	Suporte Mecânico
> 6 graus	Grout Bags ou Suporte Mecânico	Suporte Mecânico	Suporte Mecânico

Tabela 1 – Limites sugeridos para a escolha de fundação de dutos submarinos.

### 3 DADOS PRINCIPAIS DO SUPORTE MECÂNICO

#### 3.1 DADOS AMBIENTAIS

O dado ambiental consiste apenas na aplicação da intensidade de corrente, visto que na profundidade de instalação proposta o suporte e a respectiva linha está livre da influência dos orbitais das ondas.

No exemplo a ser desenvolvido, esta corrente atuante terá a velocidade de 1,65m/s e ângulo de incidência de 60°.

#### 3.2 COEFICIENTE DE ARRASTO ( $C_D$ )

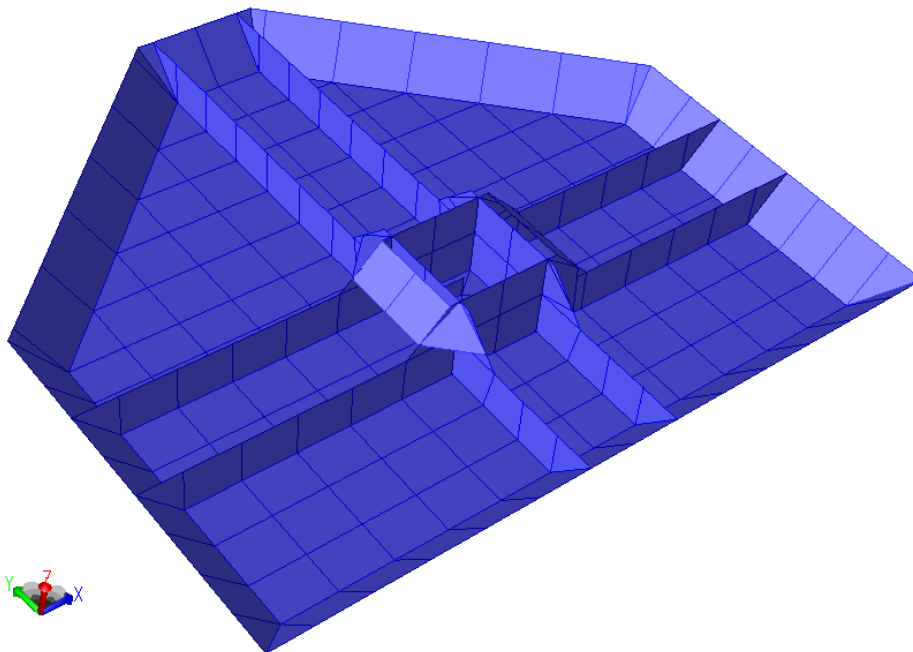
O coeficiente de arrasto é definido pela norma API-RP-2A e deverá ter o valor de  $C_D=0.7$

#### 3.3 ALTURA DO SUPORTE

O suporte é dotado de pernas telescópicas, e a análise será feita para a maior altura de 5.7m.

#### 3.4 FUNDAÇÃO DO SUPORTE

A fundação do suporte mecânico é do tipo rasa e foi modelada segundo o método dos elementos finitos, utilizando elementos isoparamétricos, com o auxílio do programa SACS e sua geometria está apresentada na Figura 9:



**Figura 9 - Isométrico da Fundação.**

As características das placas adotadas serão:

As placas da base terão a espessura de 19.0mm, os enrijecedores serão de 12.5mm e as abas laterais de 6.3mm. O aço utilizado é o ASTM A572 Grau 50.

### 3.5 CONSIDERAÇÃO DO SOLO

A análise do suporte mecânico foi realizada baseando-se no pressuposto de que os apoios da estrutura são apoios rígidos no que se refere a todos os graus de liberdade de translação e a um grau de liberdade de rotação. Na ilustração, as restrições de deslocamento são representadas pelo número 1 e as liberações pelo número 0.

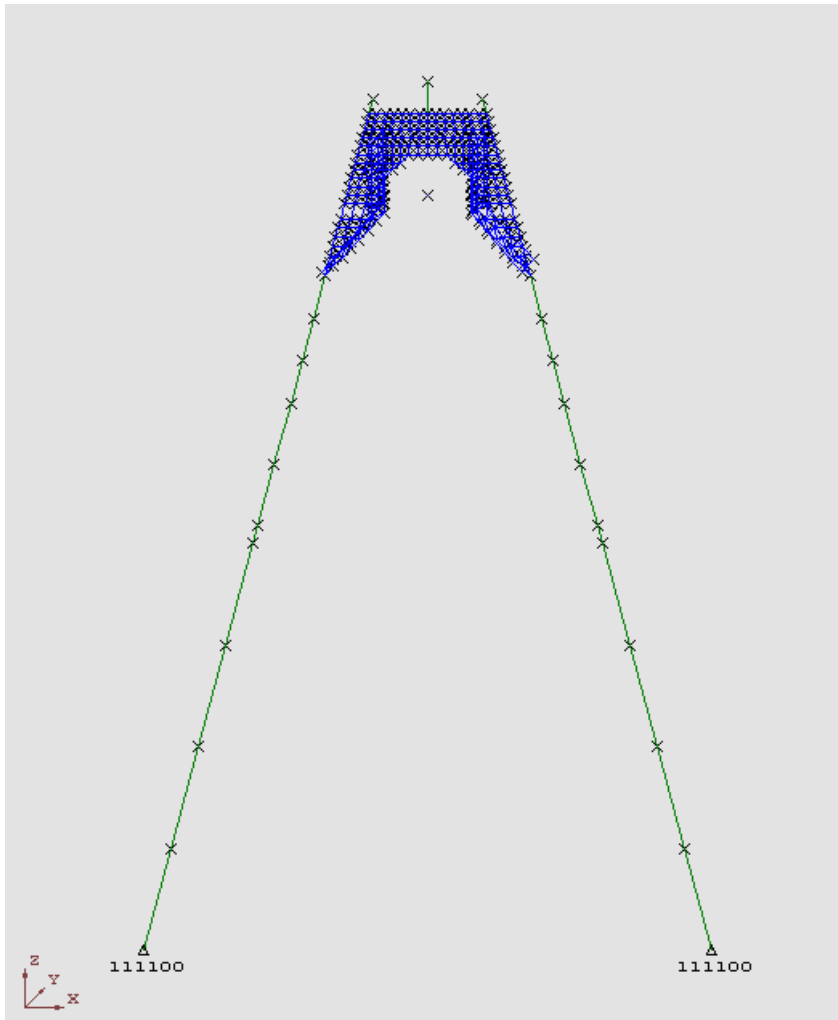


Figura 10 - Condições de contorno.

## 4 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL DO SUPORTE

Para a análise e verificação estrutural, foi elaborado um modelo matemático utilizando barras e placas conforme a Figura 11:

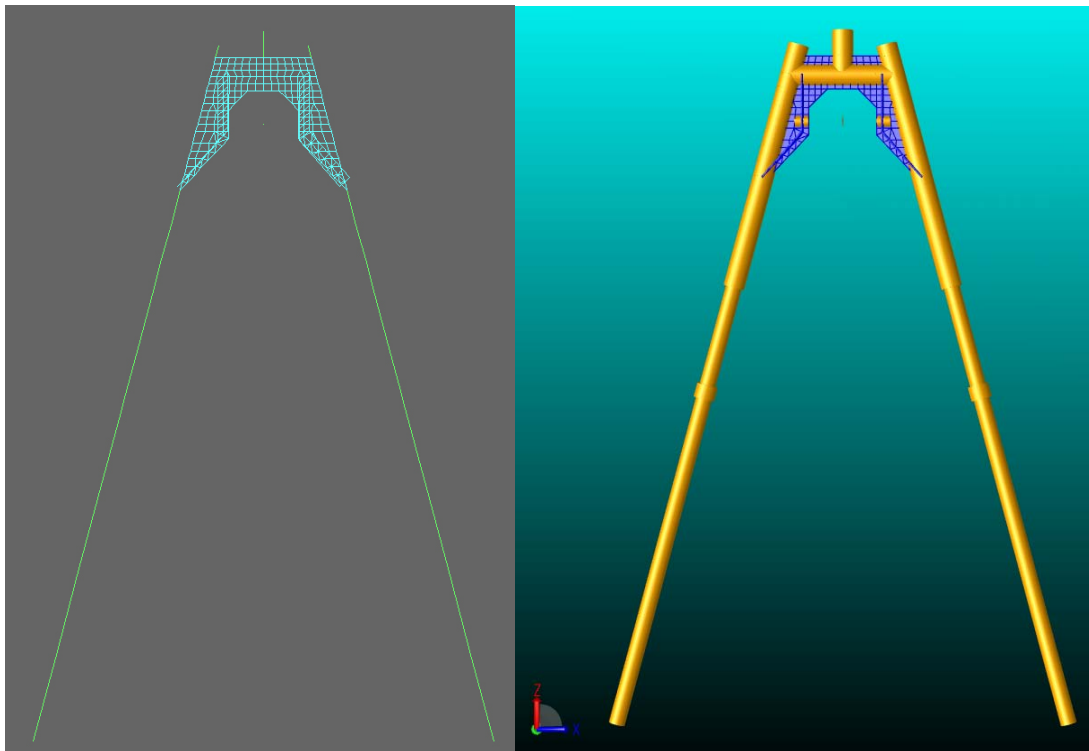


Figura 11 - Modelo Estrutural

### 4.1 PROPRIEDADES GEOMETRICAS DAS SEÇÕES UTILIZADAS

As propriedades geométricas estão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 2

SACS Release 5.2 SUPORTE MECANICO																	ID=99990000		
																	DATE 24-JAN-2008	TIME 22:57:35	PRE PAGE 2
TUBULAR MEMBER PROPERTIES																			
GRP	M/S	JOINT THICK M	WALL THICK CM	OUTSIDE DIAM. CM	E 1000 KN/CM2	G 1000 KN/CM2	AXIAL AREA CM**2	X-X CM**4	Y-Y CM**4	Z-Z CM**4	YIELD STRESS KN/CM2	KY	KZ	SHEAR AREA CM**2	RING SPACE M	SECT LENG M	TAPER		
RIG	9	0.00	1.100	11.40	20.0	8.0	35.594	954.82	477.41	477.41	34.5	1.0	1.0	35.59	0.00	0.00			
TU1	1	0.00	1.031	21.91	20.0	8.0	67.627	7388.2	3694.1	3694.1	34.5	1.0	1.0	67.63	0.00	0.00			
TU2	1	0.00	1.031	21.91	20.0	8.0	67.627	7388.2	3694.1	3694.1	34.5	1.0	1.0	67.63	0.00	0.00			
TU3	1	0.00	1.031	21.91	20.0	8.0	67.627	7388.2	3694.1	3694.1	34.5	1.0	1.0	67.63	0.00	0.00			
TU4	1	0.00	1.097	16.83	20.0	8.0	54.221	3371.6	1685.8	1685.8	34.5	1.0	1.0	54.22	0.00	0.00			
TU5	1	0.00	1.031	21.91	20.0	8.0	67.627	7388.2	3694.1	3694.1	34.5	1.0	1.0	67.63	0.00	0.00			

SACS Release 5.2 SUPORTE MECANICO																	ID=99990000		
																	DATE 24-JAN-2008	TIME 22:57:35	PRE PAGE 3
PLATE GROUP REPORT																			
PLATE GROUP	THICK CM	TYPE	ELAST MOD 1000 KN/CM2	POIS. RATIO	YIELD STRESS KN/CM2	X-STIFFENERS TX	Y-STIFFENERS IY	Z-STIFFENERS DXU	SPAC DXL	SPAC DYL	Y-STIFFENERS TY	X-STIFFENERS IX	Z-STIFFENERS DYU	SPAC DYL	DPY	DPX	DPZ		
CH1	1.270	ISO	20.00	0.300	34.50	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		



## 5 ANÁLISE

A verificação de tensões foi realizada no programa SACS, de acordo com a norma API-RP2A. No modelo foram aplicadas cargas de peso do suporte, peso do duto e a força de arrasto.

De maneira conservativa, as cargas serão aplicadas de acordo com a pior situação durante a vida útil do suporte, que é o maior vão possível em condição de operação.

### 5.1 METODOLOGIA APLICADA

A análise estrutural foi realizada segundo o método dos elementos finitos. Os tipos de elementos utilizados no modelo serão descritos sucintamente a seguir.

#### 5.1.1 ELEMENTOS DE BARRAS

Os elementos de barras indicados na Figura 12 são definidos por dois nós previamente existentes, podendo se levar ou não em consideração a existência de "offsets" entre as extremidades da barra e o nó propriamente dito, possuindo área e momentos de inércia de acordo com os grupos aos quais são designadas.

As barras possuem seus próprios sistemas de coordenadas locais que variam de acordo com a incidência dos nós da mesma, e determinam os momentos de inércia.

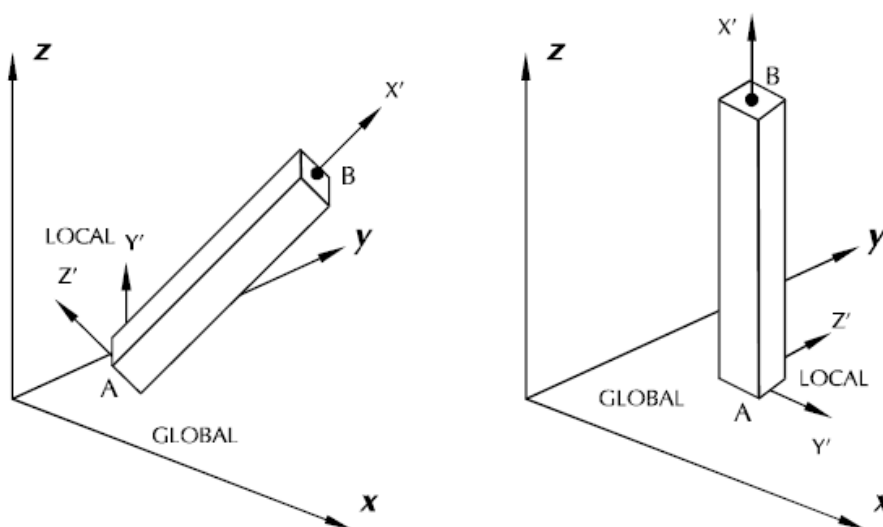
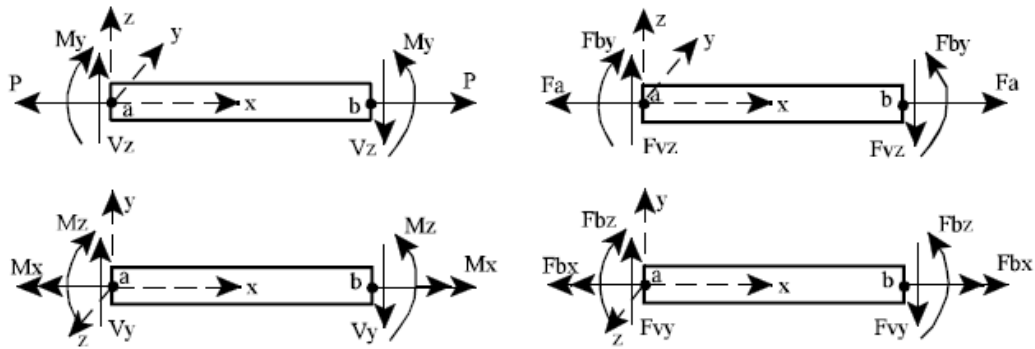


Figura 12 - Eixos Locais dos elementos de barras

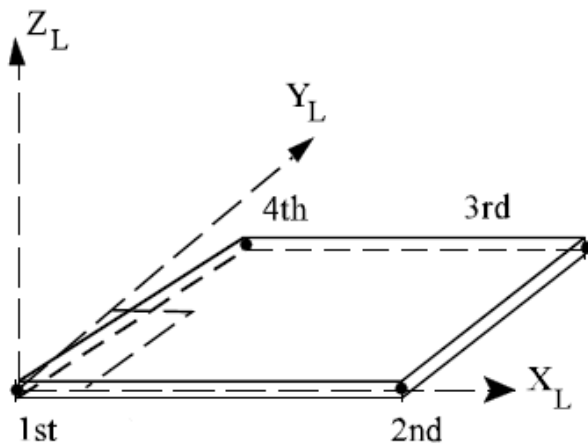
Como o modelo adotado é um modelo do tipo pórtico espacial as barras contam com seis graus de liberdade para cada um de seus nós, sendo desses três para translações e três para rotações, como indicado na Figura 13..



**Figura 13 - Esforços internos e tensões em elementos de pórtico espacial**

### 5.1.2 ELEMENTOS DE PLACA

Os elementos de placa utilizados no modelo são do tipo isoparamétrico com 4 pontos nodais. Esses elementos apresentam curvas de tensão lineares, contém seis graus de liberdade e espessura constante ao longo da área.



**Figura 14 – Eixos locais dos elementos de placa**

Assim como as barras, as placas também possuem eixos de coordenadas locais, determinado de acordo com a incidência de seus nós. Ao contrário das barras, as placas não possuem solução fechada, portanto se fazem necessárias algumas observações quanto à geometria da placa e tamanho dos elementos na malha para geração de resultados confiáveis de tensão e deflexão. Essas observações são as seguintes:

- A proporção (altura por comprimento) da placa de três nós não deve exceder 6/1 e para a placa de quatro nós 3/1.
- Os ângulos internos da placa não devem exceder 180°.
- Placas de quatro nós são mais precisas do que placas de três nós, uma vez que uma placa de quatro nós é tratada internamente como quatro placas de três nós.

### 5.1.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O problema de análise matricial se resumirá à solução do sistema

$$\underline{S} * \underline{d} = \underline{f}$$

Uma marcha de cálculo para a resolução de um problema de análise de uma estrutura reticulada é como a seguir:

Cálculo dos esforços de engastamento perfeito com sinal contrário no referencial global.

Obtenção das forças nodais combinadas "f"

Cálculo da matriz de rigidez dos elementos estruturais no referencial global

Cálculo da matriz de rigidez global "S"

Intrudução das condições de contorno obtendo-se "f" e "s"

Resolução do sistema de equações obtendo-se "d"

Cálculo dos esforços de extremidade de elemento "al F,i"

Cálculo das reações de apoio

Amatriz de rigidez local de um elemento de pórtico espacial é obtida como:

$$S_{L,i} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2(1+\phi_y)} & 0 & -\frac{12EI_z}{l^3(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2(1+\phi_y)} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3(1+\phi_z)} & 0 & \frac{-6EI_y}{l^2(1+\phi_z)} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3(1+\phi_z)} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{l(1+\phi_z)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(2-\phi_z)EI_y}{l(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{l(1+\phi_y)} & 0 & \frac{-6EI_z}{l^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_z}{l(1+\phi_y)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{l^3(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2(1+\phi_y)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3(1+\phi_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{l(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{l(1+\phi_y)} \end{bmatrix}$$

*Simetria*

onde temos  $\phi_y = \frac{12EI_z f_y}{GA l^2}$        $\phi_z = \frac{12EI_y f_z}{GA l^2}$

A partir do conhecimento da matriz de rigidez do elemento correspondente ao seu referencial global local, e da matriz de rotação do elemento calcula-se a matriz de rigidez correspondente ao referencial global pela seguinte equação.

$$S_{G,i} = R_i^T S_{L,i} R_i$$

Exemplificando a matriz de rotação de um elemento de pórtico espacial:

$$R_i = \begin{bmatrix} \bar{R} & & & \\ & \bar{R} & & \\ & & \bar{R} & \\ & & & \bar{R} \end{bmatrix}$$

onde temos

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \frac{-c_x c_y \cos(\gamma) - c_z \sin(\gamma)}{c} & c_y & \frac{-c_y c_z \cos(\gamma) - c_x \sin(\gamma)}{c} \\ \frac{c_x c_y \cos(\gamma) - c_z \sin(\gamma)}{c} & -c \sin(\gamma) & \frac{-c_y c_z \cos(\gamma) - c_x \sin(\gamma)}{c} \end{bmatrix}$$

sendo

$$c = \sqrt{c_x^2 + c_z^2} \quad c_x = \frac{X_k - X_j}{l} \quad c_y = \frac{Y_k - Y_j}{l} \quad c_z = \frac{Z_k - Z_j}{l}$$

$$l = \sqrt{(X_k - X_j)^2 + (Y_k - Y_j)^2 + (Z_k - Z_j)^2}$$

Por outro lado, o problema das placas se resolverá pelo método dos elementos finitos, que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais e obedece à mesma equação do método dos deslocamentos.

$$\underline{S} * \underline{d} = \underline{f}$$

onde para o caso do estado plano de tensões

$$S = \int_S B^T D B h dS \quad f = \int_L N^T p dL$$

$$\underline{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} N_1(x_1, x_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \left( \frac{L_1}{2} - x_1 \right) \left( \frac{L_2}{2} - x_2 \right) \\ N_2(x_1, x_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \left( \frac{L_1}{2} + x_1 \right) \left( \frac{L_2}{2} - x_2 \right) \\ N_3(x_1, x_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \left( \frac{L_1}{2} + x_1 \right) \left( \frac{L_2}{2} + x_2 \right) \\ N_4(x_1, x_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \left( \frac{L_1}{2} - x_1 \right) \left( \frac{L_2}{2} + x_2 \right) \end{cases}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix} \left[ \begin{array}{cc|cc|cc|cc} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{array} \right]$$

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{E\nu}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix}$$

## 5.2 CARREGAMENTO

### 5.2.1 PESO PRÓPRIO

A carga de peso próprio foi gerada pelo SACS. Junto com este carregamento, entra a parte de elementos não estruturais não modelados, e elementos acessórios.

Tabela 3

```

SACS Release 5.2
***** EDI/SACS IV SEASTATE PROGRAM *****
ID=99990000
DATE 24-JAN-2008 TIME 22:57:34 SEA PAGE 4

***** RESULTS FOR LOAD CASE 1 *****
DEAD + USER GENERATED LOADS
***** SUMMARY OF SEASTATE GENERATED DEAD AND BUOYANCY LOADS *****
WATER DEPTH = 100.000 M.
DEAD WEIGHT (WEIGHT IN AIR) = 8.866 KN
CENTER OF GRAVITY -X- = 1.982 M.
-Y- = 0.000 M.
-Z- = -96.963 M.
BUOYANCY LOAD (DISPLACEMENT) = 1.161 KN
CENTER OF BUOYANCY -X- = 1.982 M.
-Y- = 0.000 M.
-Z- = -96.963 M.
***** SUMMATION OF FORCES AND MOMENTS FOR LOAD CASE 1 *****
(MOMENTS ABOUT MUDLINE AT ELEVATION -100.00 M. )
SUM FX SUM FY SUM FZ SUM MX SUM MY SUM MZ
KN KN KN KN-M KN-M KN-M
SEASTATE GENERATED 0.000 0.000 -7.705 0.000 15.275 0.000
USER INPUT 0.000 0.000 -9.732 0.000 19.292 0.000

```

### 5.2.2 PESO DO DUTO

Uma carga correspondente ao peso do duto submerso será aplicada no suporte de acordo com o vão livre. Como existe a possibilidade de variação de espessura da parede do duto, a carga será avaliada para a maior espessura.

Os valores adotados para vão livre são os seguintes: o vão adotado é de 104.75m, e o peso total submerso do duto ao longo do vão é de 178.60kN.

### 5.2.3 FORÇA DE ARRASTO

O carregamento horizontal é originário da força de arrasto, cujo cálculo é apresentado abaixo.

Dados:

*Corrente:*

Densidade da água:  $\rho := 1025 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$  Coeficiente de Arrasto:  $Cd := 0.7$

Intensidade de corrente:  $V_{\text{ww}} := 1.65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Angulo de incidencia:  $\beta := 60^\circ$

*Duto:*

Diametro externo:  $OD := 18\text{pol}$   $OD = 45.72\text{cm}$

Espessura do isolamento:  $t := 52\text{mm}$

Vão livre máximo:  $L_{\text{v}} := 86.73\text{m}$

Arrasto:

$$F := 0.5 \cdot Cd \cdot \rho \cdot (V \cdot \sin(\beta))^2 \cdot (OD + 2 \cdot t) \cdot L \cdot g^{-1} \quad F = 35.654\text{kN}$$

$$F = 3.636\text{tf}$$

### 5.2.4 SUMÁRIO DOS CARREGAMENTOS APLICADOS

Para a análise do suporte mecânico, será utilizada uma abordagem conservativa no que se refere aos carregamentos adotados, pois quando calculado o vão a ser suportado pelo dispositivo não foi levado em consideração a contribuição do solo nos extremos da linha. Com base nisso, os carregamentos a serem aplicados no modelo do suporte mecânico deverão ser os seguintes.

Peso próprio do dispositivo de suporte	17.45 kN.
Peso submerso do duto	178.60 kN
Força de Arrasto	35.65 kN
Peso da braçadeira	7.65 kN

### 5.2.5 PONTO DE APLICAÇÃO DAS CARGAS

As cargas serão aplicadas na forma de carregamento pontual no centróide da seção do duto a ser suportado conforme Figura 15:

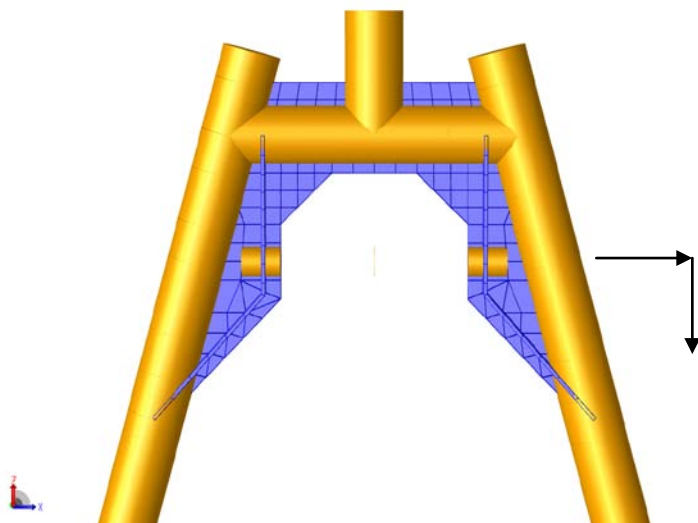
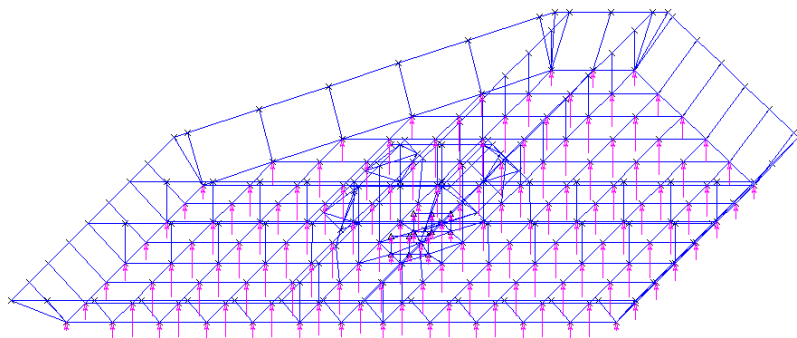


Figura 15 - Ponto de aplicação das cargas.

### **5.3 FUNDAÇÃO DO SUPORTE MECÂNICO**

A fundação do suporte mecânico será dimensionada para a transferência de esforços de peso do duto submerso, peso próprio do suporte mecânico e da braçadeira e forças devidos ao carregamento ambiental, como a corrente, para o solo através de uma interação solo-estrutura.

A fundação foi modelada invertida, ou seja, tendo o apoio na parte superior e a aplicação de cargas na parte inferior.



**Figura 16 - Aplicação de cargas no modelo da fundação**

### **5.4 PROTEÇÃO CATÓDICA BASEADA NA DNV RP B 401**

#### **5.4.1 PROTEÇÃO CATÓDICA E SEUS PROCEDIMENTOS**

A corrosão do aço em ambiente marinho é um processo eletroquímico que envolve perda de íons do elemento ferro e a formação de óxidos ferrosos e hidróxidos (ferrugem). O princípio da proteção catódica é fornecer um elemento galvânico, onde o duto seja o cátodo. A escolha do tamanho do anodo de sacrifício é baseada na norma da Petrobras N-1729, que por sua vez segue a norma DNV RP B 401, que possui os seguintes requerimentos.

A massa total do anodo deve ser suficiente para suprimir a demanda total de corrente para todo o período de vida útil.

A superfície total final exposta do anodo deve ser suficiente para suprimir a demanda total de corrente para todo o período de vida útil.

Os parâmetros de projeto da proteção catódica são os seguintes.

Cálculo da área de superfície;

Cálculo da demanda de corrente;

Escolha do tipo de anodo;

Cálculo da massa do anodo;

Cálculo do número de anodos;

Cálculo da resistência do anodo;

Dimensionamento do anodo;

Distribuição dos anodos.



O procedimento de cálculo está apresentado a seguir.

### DADOS DE ENTRADA GERAIS

Vida de projeto (anos)  $T_w = 25$   
 Máxima lâmina d'água  $WD = 1300\text{-m}$

#### Tube 01

Comprimento  $L1 = 2300\text{mm}$   
 Diâmetro  $W1 = 219.1\text{mm}$   
 Espessura  $t1 = 10.31\text{mm}$

#### Tube 03

Comprimento  $L3 = 350\text{mm}$   
 Diâmetro  $W3 = 219.1\text{mm}$   
 Espessura  $t3 = 10.31\text{mm}$

#### Tube 04b

Comprimento  $L5 = 3500\text{mm}$   
 Diâmetro  $W5 = 168.3\text{mm}$   
 Espessura  $t5 = 10.97\text{mm}$

#### Tube 02

Comprimento  $L2 = 1084\text{mm}$   
 Diâmetro  $W2 = 219.1\text{mm}$   
 Espessura  $t2 = 10.31\text{mm}$

#### Tube 04a

Comprimento  $L4 = 1500\text{mm}$   
 Diâmetro  $W4 = 168.3\text{mm}$   
 Espessura  $t4 = 10.97\text{mm}$

#### Bar

Comprimento  $L6 = 1050\text{mm}$   
 Largura  $W6 = 146\text{mm}$

### Area

Tube 01 Area	$A1 = 2 \cdot (W1 \cdot \pi \cdot L1 + (W1 - 2 \cdot t1) \cdot \pi \cdot L1)$	$A1 = 6.035\text{m}^2$
Tube 02 Area	$A2 = 2 \cdot (W2 \cdot \pi \cdot L2 + (W2 - 2 \cdot t2) \cdot \pi \cdot L2)$	$A2 = 1.422\text{m}^2$
Tube 03 Area	$A3 = 2 \cdot (W3 \cdot \pi \cdot L3 + (W3 - 2 \cdot t3) \cdot \pi \cdot L3)$	$A3 = 0.459\text{m}^2$
Tube 04a Area	$A4 = 2 \cdot (W4 \cdot \pi \cdot L4 + (W4 - 2 \cdot t4) \cdot \pi \cdot L4)$	$A4 = 2.966\text{m}^2$
Tube 04b Area	$A5 = 2 \cdot (W5 \cdot \pi \cdot L5 + (W5 - 2 \cdot t5) \cdot \pi \cdot L5)$	$A5 = 6.92\text{m}^2$
Bar Area	$A6 = 2 \cdot (4 \cdot W6 \cdot L6)$	$A6 = 1.226\text{m}^2$
Area de Placa	$A7 = 4 \cdot 7.72\text{m}^2$	
Area da sapata	$A8 = 8.25\text{m}^2$	

Area exposta  $A_e := A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 + A7 + A8$   $A_e = 58.158 \text{ m}^2$   
 Area enterrada  $A_b := 0 \text{ m}^2$   
 Area protegida  $A_g := 0 \text{ m}^2$   
 Mudmat:  $A_m := 0 \text{ m}^2$

### Densidade de Corrente (mA/m<sup>2</sup>)

Depth (m)	Current's Density (mA/m <sup>2</sup> )		
	Initial	Average	Final
1300m	180	90	130
Buried	20	20	20

Densidade de corrente inicial  $ici := 180 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$

Densidade de corrente média  $ica := 90 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$

Densidade de corrente final  $icf := 130 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$

Densidade de corrente enterrado  $icb := 20 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$

### Coating Breakdown Factor - (fc) DNV RP B401 Annex A - Table 10-4

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating Categories I, II and III		
	I (a=0.10)	II (a=0.05)	III (a=0.02)
0-30	b=0.10	b=0.025	b=0.012
>30	b=0.05	b=0.015	b=0.008

Categoria I: Uma camada de tinta epoxi, min. 20 µm nominal DFT

Categoria II: Uma ou mais camadas de pintura marítima (epoxy, polyuretano ou vinyl), total nominal DFT min. 250 µm

Categoria III: Uma camada de primer, no mínimo duas camadas intermediárias de pintura marítima, mínimo 3µm nominal DFT

$a := 0.02$   $b := 0.008$   $f_{CI} := 0.02$

$f_{Cav} := f_{CI} + \left( b \cdot \frac{T}{2} \right)$   $f_{Cav} = 0.12$

$f_{Cf} := a + b \cdot T$   $f_{Cf} = 0.22$

### Outras Características

	Unburied	Buried
Eficiencia eletroquímico do anodo (A*h/kg)	$ea := 2000 \frac{\text{A}\cdot\text{h}}{\text{kg}}$	$eb := 850 \frac{\text{A}\cdot\text{h}}{\text{kg}}$
Resistividade (Ω*m)	$pu := 0.31\text{-ohm}\cdot\text{m}$	$pb := 0.62\text{-ohm}\cdot\text{m}$
Potencial elétrico do circuito: Base alumínio	$v_{\text{seawater}} := -1.05 \text{ V}$	$v_{\text{sediments}} := -0.95 \text{ V}$
Densidade do alumínio (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{aluminium}} := 2660 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Potencial de Proteção (V)	Potencial := -0.80 V	

### Características do anodo

	Type: AQS - 45
	DNV Anode shape - Short Flush-Mounted
Espessura da alma (mm)	$t_{\text{web}} := 15.9 \text{ mm}$
Fator de aproveitamento (Fu)	$F_u := 0.85$
<b>Geometria inicial</b>	
Massa inicial (Kg)	$m_o := 43.56 \text{ kg}$
Largura (mm)	$w := 180 \text{ mm}$
Comprimento (mm)	$l_w := 500 \text{ mm}$
Altura (mm)	$hi := 180 \text{ mm}$
Media (L/W)	$S_i := \left( \frac{1+w}{2} \right)$ $S_i = 0.34 \text{ m}$
Area superficial (mm <sup>2</sup> )	$A_{i\text{ww}} := 2 \cdot (l \cdot hi) + 2 \cdot (l \cdot w)$ $A_i = 0.36 \text{ m}^2$

## Geometria final

Massa inicial (Kg)	$m_f := m_o \cdot (1 - F_u)$	$m_f = 6.534 \text{ kg}$
Largura (mm)	$l_f := 1 - [0.1 \cdot (F_u - 1)]$	$l_f = 457.5 \text{ mm}$
Comprimento (mm)	$w_f := w - [0.1 \cdot (w \cdot F_u)]$	$w_f = 164.7 \text{ mm}$
Altura (mm)	$S_f := \frac{(l_f + w_f)}{2}$	$S_f = 0.311 \text{ m}$
Media (L/W)	$A_f := 2 \cdot (l_f \cdot h_i) + 2 \cdot (l_f \cdot w_f)$	$A_f = 0.315 \text{ m}^2$
Area superficial (mm <sup>2</sup> )		

## Corrente mínima para obter a proteção catódica

Area descoberta:	$I_{ui} := A_e \cdot i_{ci} \cdot f_{Ci}$	$I_{ui} = 0.209 \text{ A}$
	$I_{um} := A_e \cdot i_{ca} \cdot f_{Cav}$	$I_{um} = 0.628 \text{ A}$
	$I_{uf} := A_e \cdot i_{cf} \cdot f_{Cf}$	$I_{uf} = 1.663 \text{ A}$

Area enterrada:	$I_{bi} := A_b \cdot i_{cb} \cdot f_{Ci}$	$I_{bi} = 0$
	$I_{bm} := A_b \cdot i_{cb} \cdot f_{Cav}$	$I_{bm} = 0$
	$I_{bf} := A_b \cdot i_{cb} \cdot f_{Cf}$	$I_{bf} = 0$

Corrente total (A):	$I_i := I_{ui} + I_{bi}$	$I_i = 0.209 \text{ A}$
	$I_m := I_{um} + I_{bm}$	$I_m = 0.628 \text{ A}$
	$I_f := I_{uf} + I_{bf}$	$I_f = 1.663 \text{ A}$

Massa total do anodo: year = 8760 h

$$M := \frac{T \cdot \text{year}}{F_u} \cdot \left[ \left( \frac{I_{um}}{e_u} \right) + \left( \frac{I_{bm}}{e_b} \right) \right] \quad M = 80.914 \text{ kg}$$

Quantidade de anodos

$$n := \frac{M}{m_o} \quad n = 1.858$$

$$N_{\text{an}} := \text{ceil}(n) \quad N = 2 \quad N_{\text{an}} = 4$$

## Exposta

Polarização Inicial:

Resistance - Rau (Ω):	$R_{ai} := 0.315 \cdot \frac{\rho u}{\sqrt{A_i}}$	$R_{ai} = 0.163 \Omega$
-----------------------	---	-------------------------

Corrente final:	$i_{ai} := \frac{\text{Potencial} - v_{\text{seawater}}}{R_{ai}}$	$i_{ai} = 1.536 \text{ A}$
-----------------	---	----------------------------

Corrente final total:	$I_{ai} := i_{ai} \cdot N$	$I_{ai} = 6.144 \text{ A}$
		$I_i = 0.209 \text{ A}$

$$\text{Situation} := \text{if}(I_{ai} \geq I_i, \text{"ok"}, \text{"nok"}) \quad \text{Situation} = \text{"ok"}$$

Polarização final:

Resistance - Ra (Ω):	$R_{af} := 0.315 \cdot \frac{\rho u}{\sqrt{A_f}}$	$R_{af} = 0.174 \Omega$
----------------------	---	-------------------------

Corrente final:	$i_{af} := \frac{\text{Potencial} - v_{\text{seawater}}}{R_{af}}$	$i_{af} = 1.438 \text{ A}$
-----------------	---	----------------------------

Corrente final total:	$I_{af} := i_{af} \cdot N$	$I_{af} = 5.751 \text{ A}$
		$I_f = 1.663 \text{ A}$

$$\text{Situation} := \text{if}(I_{af} \geq I_f, \text{"ok"}, \text{"nok"}) \quad \text{Situation} = \text{"ok"}$$

Capacidade de corrente:

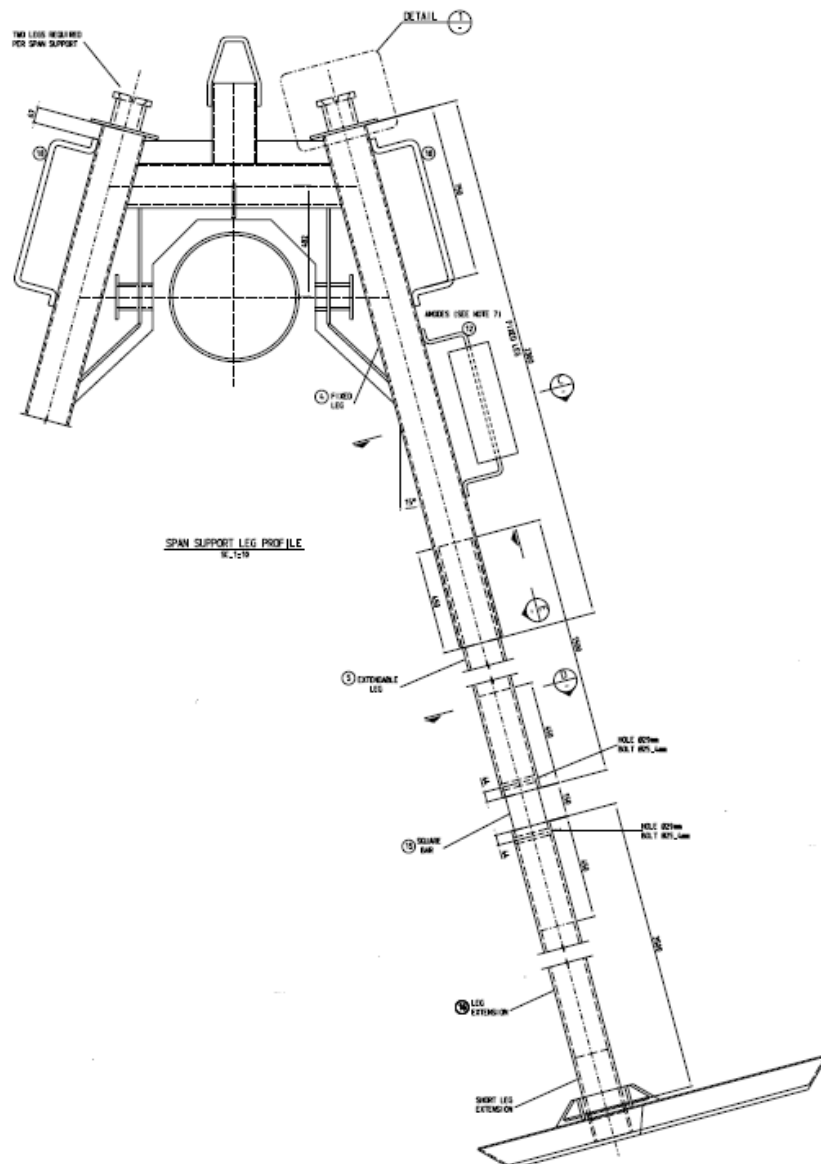
Capacidade de corrente:	$c_a := m_o \cdot e_u \cdot F_u$	$c_a = 74052 \text{ A} \cdot \text{h}$
-------------------------	----------------------------------	--

Capacidade total de corrente:	$C_a := c_a \cdot N$	$C_a = 296208 \text{ A} \cdot \text{h}$
-------------------------------	----------------------	---

$$\text{Situation} := \begin{cases} \text{"ok"} & \text{if } C_a > I_m \cdot T \cdot 8760 \text{ h} \\ \text{"nok"} & \text{if } C_a \leq I_m \cdot T \cdot 8760 \text{ h} \end{cases} \quad \text{Situation} = \text{"ok"}$$

## 6 DESENHOS TÉCNICOS DO SUPORTE

### 6.1 ARRANJO GERAL



**Figura 17 - Arranjo Geral**

A Figura 17 apresenta o desenho teórico do suporte analisado. Nesta figura pode-se a posição do duto quando instalado, os detalhes das pernas telescópicas e a posição das sapatas. As Figuras 18 a 20 apresentam detalhes das sapatas.

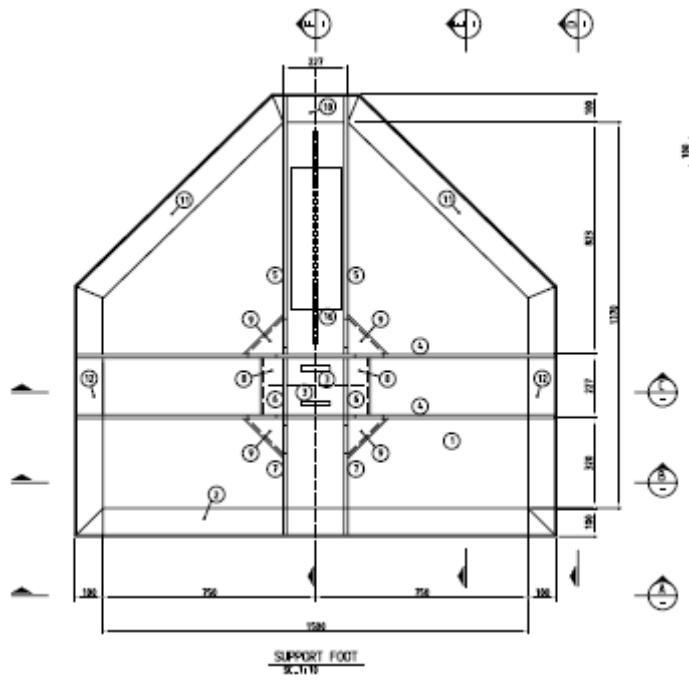


Figura 18 - Vista superior da sapata

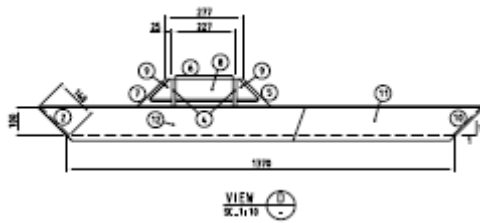


Figura 19 - Vista lateral da sapata

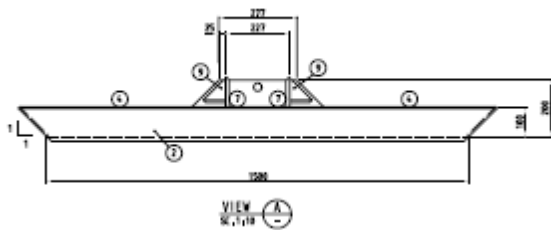
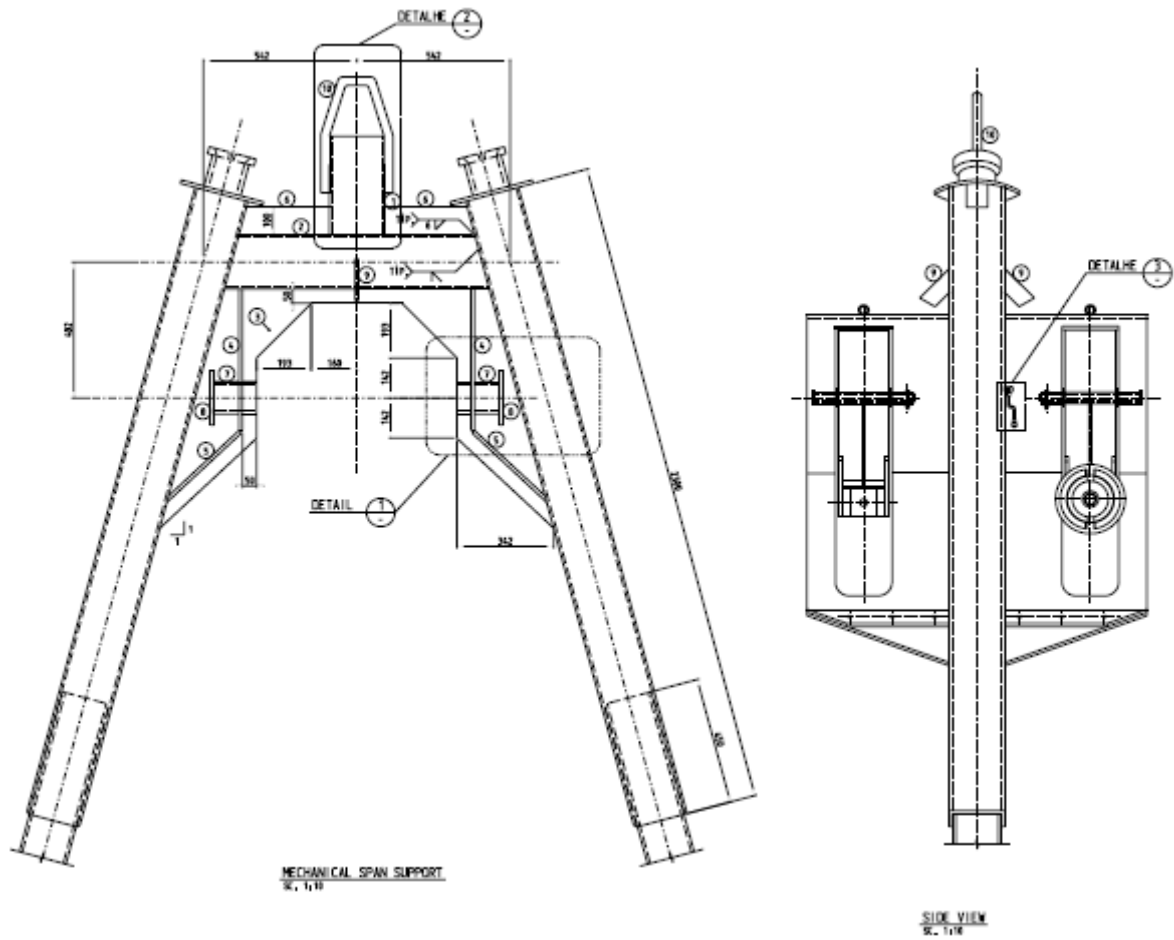


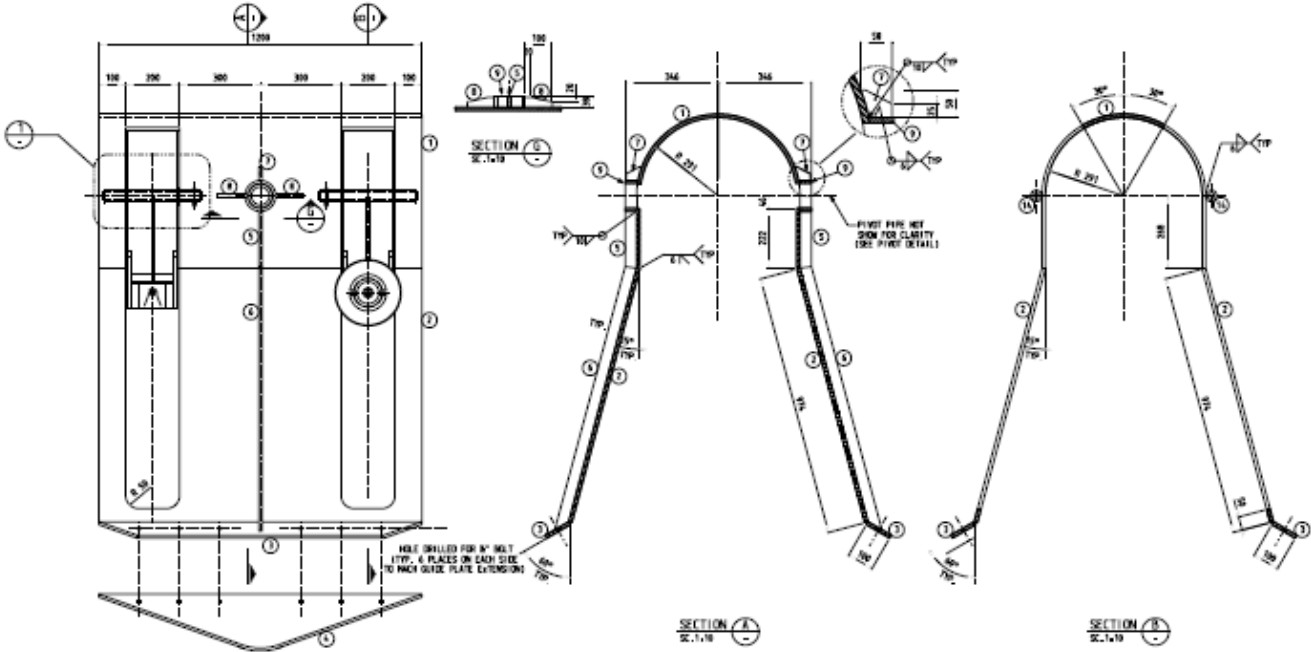
Figura 20 - Vista Frontal

Nestas vistas, podemos observar que utilizando um modelo de elementos finitos para a simulação da sapata, o desenho executivo corresponde à mesma forma geométrica do modelo matemático.



**Figura 21 - Suporte do Clamp**

Nos desenhos acima, observamos o suporte do clamp, também modelado em elementos finitos.



**Figura 22 - Clamp**

Acima, o detalhe do clamp, responsável pela fixação do duto no suporte mecânico.

## 7 VERIFICAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS

### 7.1 METODOLOGIA APLICADA

As normas utilizadas para o dimensionamento de estruturas metálicas “offshore são as seguintes:

- Para perfis tubulares utiliza-se a norma - API RP2A WSD 21<sup>th</sup>
- Para perfis não tubulares utiliza-se a norma – AISC Manual of Steel Construction ASD 9<sup>th</sup>

#### 7.1.1 DEFINIÇÃO DE UNIT-CHECK SEGUNDO A API RP2A WSD 21<sup>th</sup>:

Para membros solicitados, a tensão em flexão, o UC, é definido como

$$UC = \frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{F_b}$$

Para tais membros, deve-se fazer uma verificação também para flexão apenas

$$UC = \frac{f_b}{F_b}$$

Para casos em que os membros estejam sendo solicitados à compressão menor que  $0,15F_y$ , a fórmula deverá ser

$$UC = \frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{F_b}$$

Para membros solicitados à compressão maior que  $0,15F_y$ , em flexão, o UC é definido como

$$UC = \frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_b} \quad \text{e também} \quad UC = \frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{F_b}$$

O UC para flambagem de Euler é definido pela fórmula a seguir

$$UC = \frac{f_a}{F_e}$$

O UC para cortante é definido pelo maior valor entre os dois abaixo

$$UC = \frac{f_v}{F_v} \quad \text{e também} \quad UC = \frac{f_{vt}}{F_{vt}}$$

#### 7.1.2 DEFINIÇÃO DE UNIT-CHECK SEGUNDO A AISC Manual of Steel Construction ASD 9<sup>th</sup>:

Para membros solicitados à tensão em flexão, o UC é definido como

$$UC = \frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}}$$

Para tais membros, deve-se fazer uma verificação também para flexão apenas

$$UC = \frac{f_b}{F_b}$$

Para casos em que os membros estejam sendo solicitados à compressão menor que  $0,15F_y$ , a fórmula deverá ser

$$UC = \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}}$$

Para membros solicitados à compressão maior que  $0,15F_y$ , em flexão, o UC é definido como

$$UC = \frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{my}f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)F_{by}} + \frac{C_{mz}f_{bz}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ez}}\right)F_{bz}} \quad \text{e também} \quad UC = \frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}}$$

O UC para flambagem de Euler é definido pela fórmula a seguir

$$UC = \frac{f_a}{F_e}$$

O UC para cortante inclui os efeitos de torção e é definido pela fórmula abaixo

$$UC = \frac{f_v}{F_v}$$

Tensão de Von-Mises, conhecida como Teoria da Energia Máxima da Distorção, é calculada utilizando as tensões principais máximas e mínimas da seguinte forma.

$$UC = \sqrt{\frac{(S_{p1} - S_{p2})^2 + S_{p2}^2 + S_{p1}^2}{2(0.6F_y)^2}}$$

## 7.2 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL - SUPORTE

Para a análise em questão, foram seguintes resultados obtidos com a utilização do sistema SACS são apresentados nas tabelas a seguir.

SACS Release 5.2 ***** EDI/SACS IV SEASTATE PROGRAM ***** ID=99990000									
DATE 24-JAN-2008 TIME 22:57:34 SEA PAGE 10									
***** SEASTATE COMBINED LOAD CASES *****									
COMBINED LOAD CASE	LABEL	BASIC LABEL	PERCENT	DESCRIPTION					
5	200			1.50 *	1 + 1.00 *	2 + 1.00 *	3 + 1.00 *	4	
		1	150.00	DEAD + USER GENERATED LOADS					
		2	100.00	USER GENERATED LOADS					
		3	100.00	USER GENERATED LOADS					
		4	100.00	USER GENERATED LOADS					
				FX (KN)	FY (KN)	FZ (KN)	MX (KN-M)	MY (KN-M)	MZ (KN-M)
		1		0.000	0.000	-26.155	0.000	51.851	0.000
		2		35.650	0.000	0.000	0.000	174.506	0.000
		3		0.000	0.000	-178.600	0.000	353.985	0.000
		4		0.000	0.000	-7.650	0.000	15.162	0.000
		TOTAL		35.650	0.000	-212.405	0.000	595.504	0.000

Somatório de forças e momentos aplicados



```

SACS Release 5.2
SUPORTE MECANICO
DATE 24-JAN-2008 TIME 22:57:36 PST PAGE 4
ID=99990000
SACS-IV SYSTEM REACTION FORCES AND MOMENTS
*****
JOINT LOAD          KN          KN-M
NUMBER CASE        FORCE(X)    FORCE(Y)    FORCE(Z)    MOMENT(X)  MOMENT(Y)  MOMENT(Z)
CW  200            -45.692     0.000     153.673     0.000      0.000      0.000
CX  200             10.042     0.000      58.733     0.000      0.000      0.000

```

### Reações de apoio

```

SACS Release 5.2
SUPORTE MECANICO
DATE 24-JAN-2008 TIME 22:57:36 PST PAGE 64
ID=99990000
*** MEMBER GROUP SUMMARY ***
API RP2A 21ST/AISC 9TH
GRUP CRITICAL LOAD MAX. DIST * APPLIED STRESSES * *** ALLOWABLE STRESSES *** CRIT EFFECTIVE CM
ID MEMBER COND UNITY FROM END AXIAL BEND-Y BEND-Z AXIAL EULER BEND-Y BEND-Z COND LENGTHS * VALUES *
M M N/MM2 N/MM2 N/MM2 N/MM2 N/MM2 N/MM2 N/MM2 N/MM2 M M Y Z
TU1 CN- 9G 200 0.52 0.4 -22.57 -91.14 0.00 133.42 167.75 258.75 258.75 C>.15A 5.8 5.8 0.85 0.85
TU2 DO- PN 200 0.07 0.1 -5.70 11.19 0.00 206.59***** 258.75 258.75 C<.15 0.1 0.1 0.85 0.85
TU3 PL- W 200 0.00 0.1 0.18 0.00 -0.94 207.00***** 258.75 258.75 TN+BN 0.1 0.1 0.85 0.85
TU4 CH- CR 200 0.86 0.0 -28.44-119.72 0.00 95.68 96.04 258.75 258.75 C>.15A 5.8 5.8 0.85 0.85
TU5 CT- CP 200 0.37 0.1 -22.99 -53.01 0.00 133.74 168.77 258.75 258.75 C>.15A 5.8 5.8 0.85 0.85

```

### Sumário da verificação das barras por grupo

```

SACS Release 5.2
SUPORTE MECANICO
DATE 24-JAN-2008 TIME 22:57:36 PST PAGE 57
ID=99990000
***** PLATE STRESS GROUP SUMMARY *****
N/MM2
GRUP CRIT. MAX LOAD ***** MEMBRANE ***** BENDING-UPPER SURF. X-STIFFENER Y-STIFFENER
PLATE TYPE UNITY COND SX SY TXY SX SY TXY S-TOP S-BOT S-TOP S-BOT
CHECK NO.
CH1 A544 ISO 0.600 200 -3.6 -113.0 -31.8 0.0 0.0 0.0

```

### Sumário da verificação das placas por grupo

Nas figuras a seguir, serão apresentadas as tensões de Von Mises para as placas do suporte

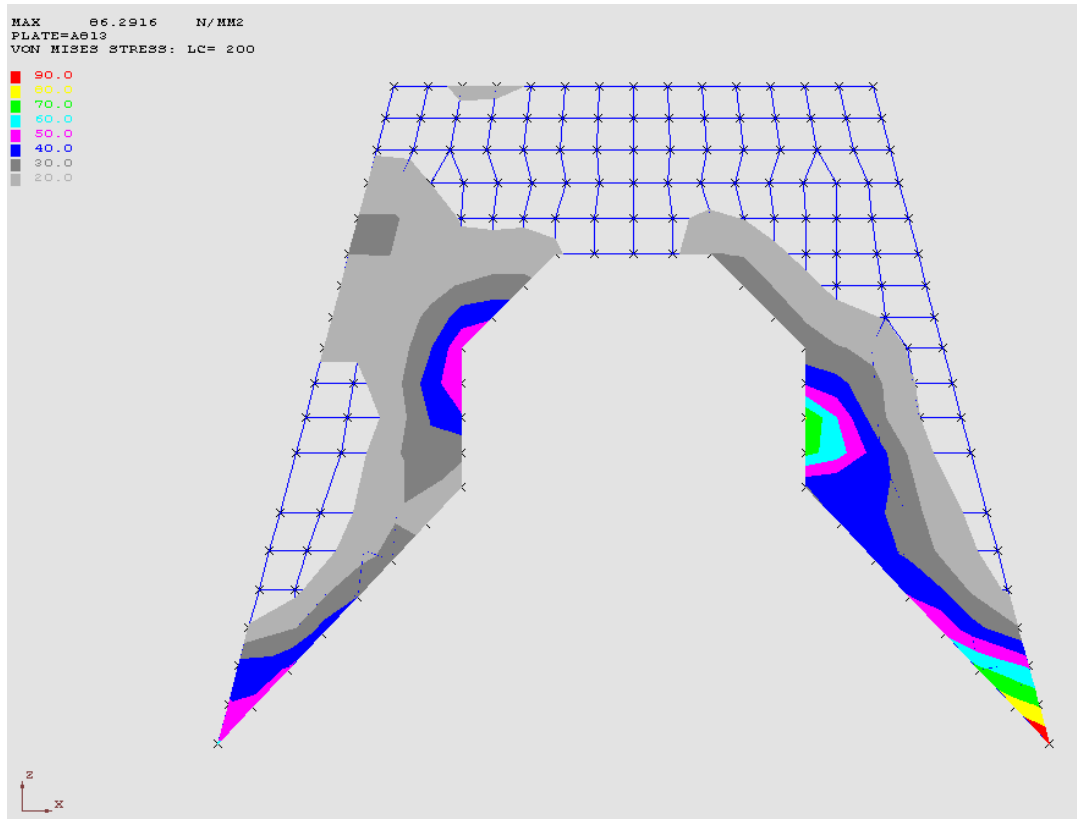


Figura 23 - Tensões de Von Mises - vista frontal

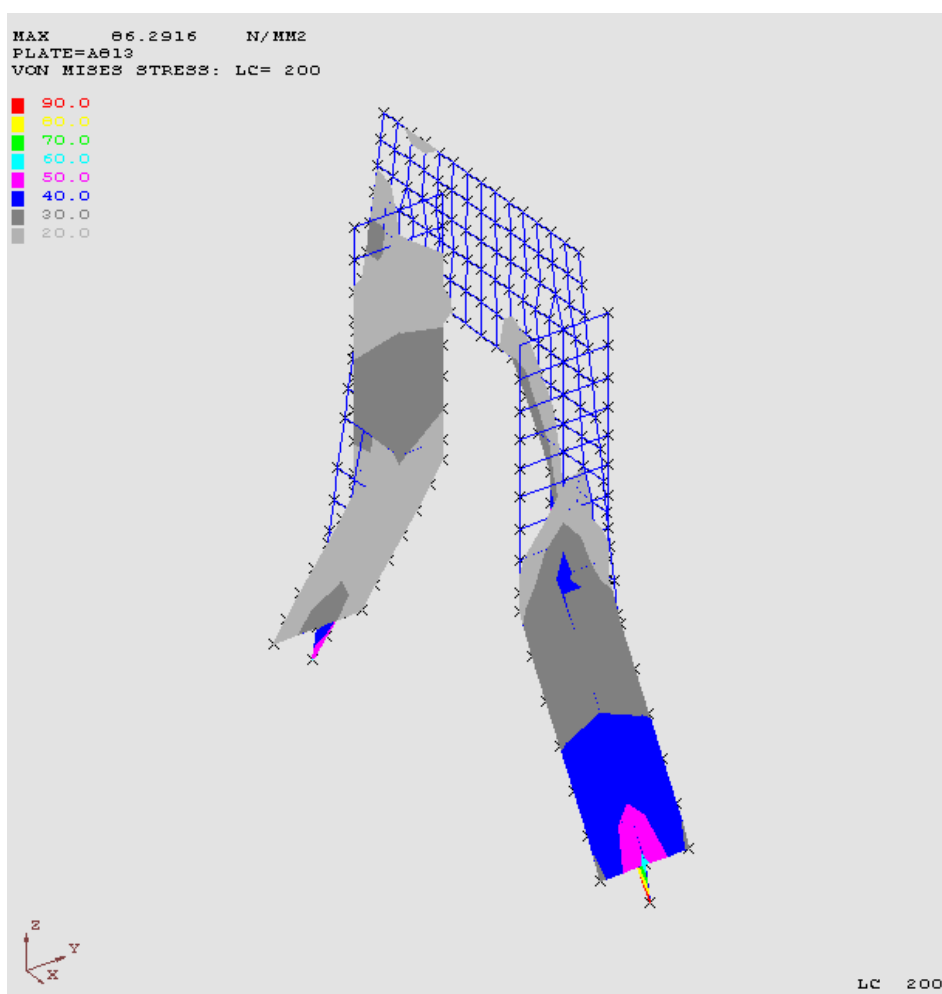


Figura 24 - Tensões de Von Mises – Isométrico

A seguir, os “UNIT CHECKS” para os membros

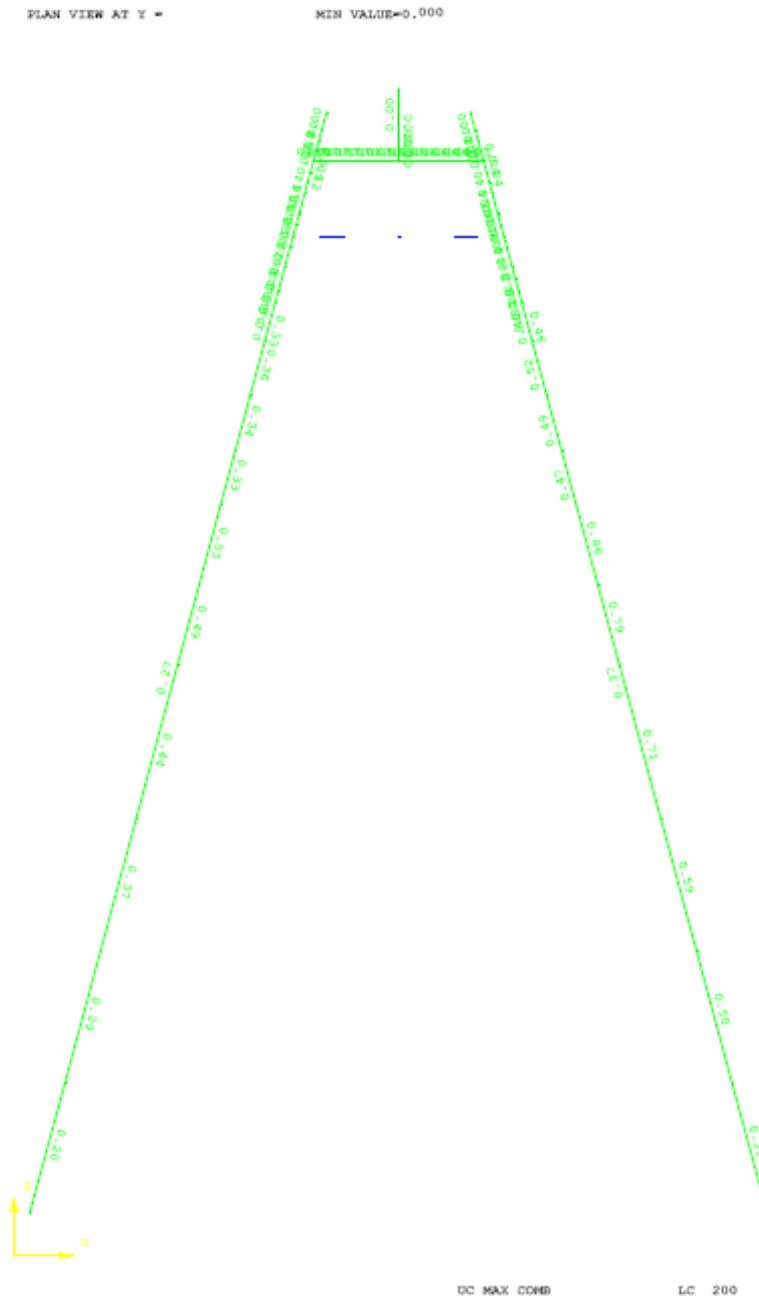


Figura 25 - UNIT CHECK para API-RP2A – membros

### 7.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DA FUNDAÇÃO

A verificação da sapata foi feita considerando que 100% da força de arrasto atuando no duto será transferida para o suporte mecânico. De acordo com a análise realizada, a força transferida tem o valor de 153.673kN na direção Z. Os resultados mostraram que as tensões resultantes em todas as placas estiveram dentro de valores aceitáveis, sendo o valor máximo no “padeye” de 263MPa. Os deslocamentos também estiveram dentro do aceitável segundo a AISC, que determina o valor máximo em  $L/150$ , onde L é o comprimento da estrutura, que equivale a 10mm. Como o deslocamento máximo encontrado foi de 4.76mm, este foi considerado válido.

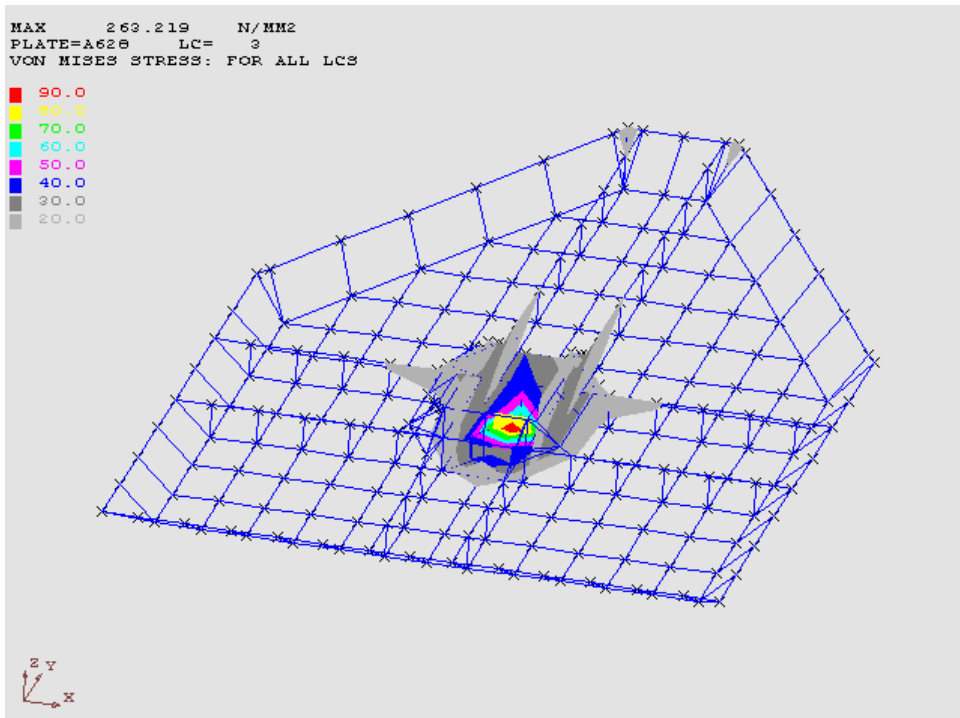


Figura 26 - Tensões de Von Mises para a fundação

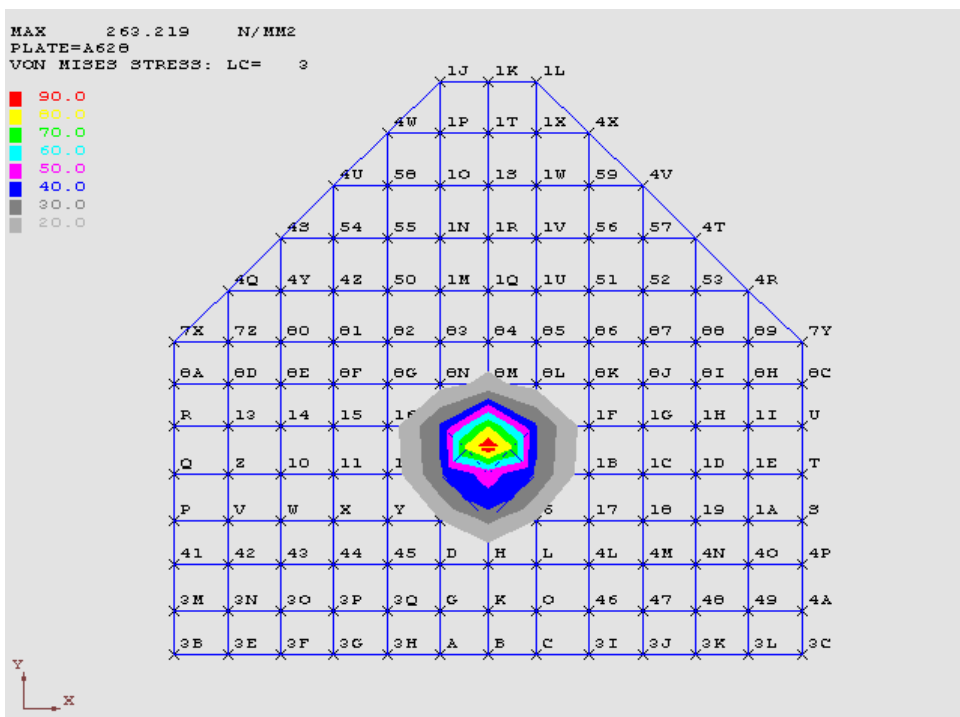


Figura 27 - Tensões de Von Mises para a fundação

## 8 INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA

### 8.1 METODOLOGIA APLICADA

A verificação do solo foi feita considerando os parâmetros da Norma API RP2A WSD 21 na seção 6.13 que trata de fundações rasas, considerando a formulação para resistência não drenada, e deformações para curto período de tempo em função de não serem disponíveis demais parâmetros dos solos em questão.

### 8.2 VERIFICAÇÃO DA FUNDAÇÃO

Para o cálculo da fundação e subsequente verificação da interação solo-estrutura, foi necessário o cálculo das cargas reais aplicadas ao suporte mecânico. Para tanto, foi verificado o comprimento do vão livre, adotando o método da área de influência, onde o vão é dividido em três partes, sendo assim as reações de apoio maiores que aquelas em um sistema estáticamente indeterminado. Foi considerado que o suporte mecânico suporta aproximadamente metade do peso submerso do duto e seu respectivo arrasto.

Para a análise em questão, serão utilizados os seguintes resultados de reação de apoio.

SACS-IV SYSTEM REACTION FORCES AND MOMENTS							
JOINT NUMBER	LOAD CASE	FORCE (X)	KN FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	KN-M MOMENT (Y)	MOMENT (Z)
CW	200	-11.116	0.000	39.903	0.000	0.000	0.000
CX	200	2.206	0.000	16.154	0.000	0.000	0.000

SACS-IV SYSTEM REACTION FORCES AND MOMENTS SUMMARY							
*** MOMENTS SUMMED ABOUT ORIGIN ***							
LOAD CASE	FORCE (X)	KN FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	KN-M MOMENT (Y)	MOMENT (Z)	
200	-8.910	0.000	56.056	0.000	736.263	0.000	

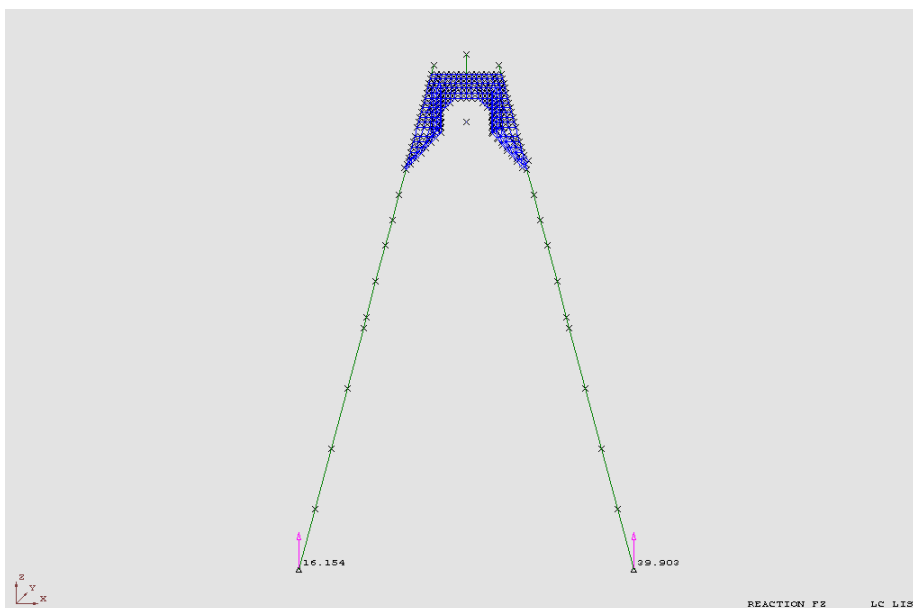
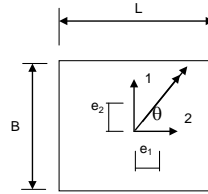


Figura 28 - Reações de apoio para cálculo da fundação

A verificação de interação solo-estrutura será realizada para dois tipos de solo: areia e argila.

Para a verificação da fundação em argila, foi utilizado o critério da API-RP2A WSD seção 6.13

According to item 6.13 of API RP2A (21th Edition december 2000): Maximum load resisted by the soil ( $Q = (cN_{ck} + \gamma D) BL$ )		
LOAD (vertical) =	39,90	kN
$\gamma_{mf}$ (safety factor) =	2,00	
$\upsilon$ (Mudmat slope) =	0,00	Degree
$\beta$ (Terrain slope) =	0,00	Degree
$\gamma$ (total unit weight of soil) =	16,00	kN/m <sup>3</sup>
$c = S_u$ (Undrained shear strength of soil) =	7,00	kN/m <sup>2</sup>
$E_s$ (Stress-Strain Modulus) =	2100,00	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$ (poisson's ratio of the soil) =	0,45	
$\phi$ (friction angle) =	0,00	Degree
$B$ =	1,50	m
$L$ =	1,00	m
$e_1$ =	0,00	m
$e_2$ =	0,00	m
$D$ (depth of embedment of foundation) =	0,43	m
$\Theta$ (angle between the long axis of the footing and H) =	0,00	Degree
$B'$ =	1,5	m
$L'$ =	1,0	m
$Q$ (perpendicular component) =	39,9	
$H$ (Tangent component) =	0,0	
$N_c$ =	5,14	
$N_q$ =	1,00	
$k_c = i_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c$ =	1,3	
$m_1 = (2+L/B)/(1+L/B)$ =	1,6	
$m_2 = (2+B/L)/(1+B/L)$ =	1,4	
$m = m_1(\cos(\theta)^2) + m_2(\sin(\theta)^2)$ =	1,6	
$i_q = (1-H / (Q+B' \cdot L' \cdot c \cdot \cot(\phi)))$ =	0,0	
$i_c = 1 - (m \cdot H / B' \cdot L' \cdot c \cdot N_c)$ ou $i_q \cdot (1-i_q) / (N_c \cdot \tan(\phi))$ =	1,0	
$s_c = 1 + (B'/L) \cdot (N_q/N_c)$ =	1,3	
$d_q = 1 + 2 \tan \Phi (1 - \sin \Phi)^2 \cdot D/B'$ =	1,0	
$d_c$ =	1,0	Shallow Foundation
$b_c = 1 - 2\nu/N_c$ =	1,0	
$g_c = 1 - 2\beta/N_c$ =	1,0	
$G$ (Elastic shear modulus of the soil) = $E_s / 2 \cdot (1+\mu)$ =	724,14	kN/m <sup>2</sup>
<b>Actual Design Load = <math>Q \cdot \gamma_{mf}</math> =</b>	<b>79,8</b>	<b>kN</b>
<b>Undarined Bearing Capacity (<math>Q = (cN_{ck} + \gamma D) BL</math>) =</b>	<b>79,9</b>	<b>kN</b>
<b>UNIT CHECK:</b>	<b>1,00</b>	<b>OK</b>
<b>Short Term Soil Deformation = <math>(1-\nu) / (4 \cdot G \cdot R) \cdot Q</math> =</b>	<b>1,10</b>	<b>cm</b>



Verificação da fundação em argila

Verificação da capacidade de resistência do solo para solos arenosos.

MANIFOLD estimated weight= 39.9 kN  
 Complementary weight = 0.0 kN  
 Estimated lateral load = 0.0 kN  
 Connected Flexible Pipe Load= 0.0 kN

**TOTAL WEIGHT (Q) = 39.9 kN**

Vertical load safety factor = 2.0 According to DnV-OS-C101  
 Safety factor for slide = 1.7 According to DnV-OS-C101  
 Total vertical load x Factor = 80 kN  
 Total lateral load x Factor = 0 kN  
 Result Load for pull-out force = 0 kN

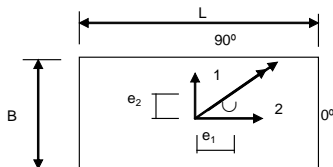
In according with item 6.13 of API RP2A, it is had:

Maximum resisted load for the soil

$$Q' = (c'NcKc + qNqKq + 1/2 \gamma B N \gamma) A'$$

$c'$  = effective cohesion = 0 kN/m<sup>2</sup>  
 $\psi$  = friction angle soil = 35 degrees  
 $\psi_s$  = friction angle soil-pile= 30 degrees  
 $N_{\psi}$  = 48.03  
 $N_q$  = 33.30  
 $N_c$  = 46.12  
 $\gamma$  = 9 kN/m<sup>3</sup>  
 $B$  = 1 m  
 $L$  = 1.5 m Angle ( $\alpha$ ) = 0°  
 $H$  = 0 m  
 Moment = 0.0 kNm  
 $B'$  = 1.000 m  
 $L'$  = 1.500 m  
 Base slope  $\psi$  = 15 degrees  
 ground slope  $\psi$  = 0 degrees  
 $i_c = i_q = i_{\psi}$  = 1  
 $sc = 1 + (B'/L')(N_q/N_c)$  = 1.4813  
 $s_{\psi} = 1 - 0.4(B'/L')$  = 0.7333  
 $sq = 1 + (B'/L')\tan\psi$  = 1.4668  
 $bq = b_{\psi} = (1 - v\tan\psi)^2$  = 0.6670  
 $bc = bq - (1 - bq)/(N_c \tan\psi)$ ,  $\psi > 0$ ; 1 - (2/ $N_c$ ),  $\psi = 0$  = 0.6567  
 $d_{\psi} = 1.0000$   $\psi$  in radians  
 $gq = g_{\psi} = (1 - \tan\psi)^2$  = 1.0000  
 $gc = gq - (1 - gq)/(N_c \tan\psi)$ ,  $\psi > 0$ ; 1 - (2/ $N_c$ ),  $\psi = 0$  = 1.0000  
 $k_{\psi} = i_{\psi} s_{\psi} d_{\psi} b_{\psi} g_{\psi}$  = 0.4891  
 $C_1 = 3$  In according with API RP2A figure 6.8.6-1, page 65  
 $C_2 = 3.5$  In according with API RP2A figure 6.8.6-1, page 65  
 $C_3 = 55$  In according with API RP2A figure 6.8.6-1, page 65

Embedment D (m)	dq	dc	Kq	Kc	q	f (kN/m <sup>2</sup> )	Internal Lateral Area (m <sup>2</sup> )	Vertical Resistance dmat (kN)	Vertical Resistance Mu Q' (kN)	Vertical Resistance Skirt (kN)	Lateral Resistance caused for Skirt bearing (kN)	Lateral Resistance caused for Skirt friction (kN)	Lateral Resistance of Mudmat (kN)	Σ Lateral Resistance (kN)	Total Resistance (kN)	Check	Σ Vertical Resistance (kN)	Total Resistance (kN)	Check
0.00	1.00	1.00	0.98	0.97	0.00	0.000	0.0	159	0.0	0.0	0.0	0.0	27.9	27.9	OK!	159	OK!		
0.20	1.05	1.05	1.03	1.02	1.80	0.831	0.8	251	0.7	1.5	0.3	27.9	29.8	OK!	252	OK!			
0.30	1.08	1.08	1.05	1.05	2.70	1.247	1.3	301	1.6	3.6	0.8	27.9	32.3	OK!	302	OK!			
0.40	1.10	1.11	1.08	1.07	3.60	1.663	1.7	352	2.8	6.8	1.4	27.9	36.1	OK!	355	OK!			
0.50	1.13	1.13	1.10	1.10	4.50	2.078	2.1	406	4.4	11.3	2.2	27.9	41.4	OK!	411	OK!			
0.60	1.15	1.16	1.13	1.13	5.40	2.494	2.5	463	6.3	17.2	3.1	27.9	48.3	OK!	469	OK!			
0.70	1.18	1.18	1.15	1.15	6.30	2.910	2.9	521	8.6	24.7	4.3	27.9	56.9	OK!	530	OK!			
0.80	1.20	1.21	1.18	1.18	7.20	3.326	3.4	582	11.2	34.0	5.6	27.9	67.5	OK!	593	OK!			
0.90	1.23	1.24	1.20	1.20	8.10	3.741	3.8	645	14.1	45.2	7.1	27.9	80.2	OK!	659	OK!			
1.00	1.25	1.26	1.23	1.23	9.00	4.157	4.2	710	17.5	58.5	8.7	27.9	95.2	OK!	728	OK!			



Vertical Resistance of Mudmat  $Q' = (c'NcKc + qNqKq + 1/2 \gamma B N \gamma) A'$   
 Vertical Resistance of Skirt =  $f \times A$  (Lateral Area)  
 Resistance caused for Skirt Bearing =  $(C_1 D + C_2 B) \psi D^2$   
 Resistance caused for friction of Skirt =  $A \times f / 2$   
 Lateral Resistance of Mudmat =  $c' A + Q \tan \psi$   
 Resistance of Skirt pull-out force =  $2 \times A \times f$   
 $f = 0.8 \psi \tan \psi$  (not smaller than 95,7 kPa for soil-pile friction 30°)

Verificação da fundação em areia.

## 9 ELEMENTOS ACESSÓRIOS

### 9.1 TORQUE NO SEM FIM DA HASTE TELESCÓPICA

Antes da operação do duto, ele passa por uma fase de testes hidrostáticos, para detectar possíveis falhas, perdas de carga, ou vazamentos. Nessa etapa, o duto é preenchido com água e submetido à pressão. Quando essa etapa termina, o duto é esvaziado e preenchido com óleo, que tem o peso específico maior que o da água. Com isso, o duto apresenta a tendência de levantar. Portanto, foi calculado um deslocamento adicional nas hastes telescópicas compensando essa tendência.

#### Torque aplicado no sem fim

Comp := 44.64kN	Carga de Compressão aplicada no sem fim
dm := 6.18cm	Diametro do Pino
f := 0.5	Coefficiente de atrito
d := 6.3mm	Passo

$$Tr := \frac{Comp \cdot dm}{2} \left( \frac{\pi \cdot f \cdot dm + d}{\pi \cdot dm - f \cdot d} \right)$$

Tr = 0.747 kN·m	Torque
-----------------	--------

Com o resultado acima se comprova que a ferramenta de torque do ROV poderá realizar a operação de ajuste de altura já que a capacidade de torque da mesma é de **2.7kNm**

### 9.2 VERIFICAÇÃO DE PINOS E CONECTORES

A verificação a seguir, se refere aos pinos, parafusos e demais conectores presentes no suporte para os esforços obtidos da análise do sistema em operação em SACS. A análise foi considerada para a pior situação de carregamentos.

#### Verificação de pinos

Data	
dm := 6.18 cm	Diametro médio do pino
f := 0.5	Coefficiente de atrito
p := 6.3 mm	Passo
ntp := 0.05m	Ranhuras envolvidas
Tr := 2.7kN·m	Torque máximo aplicado pelo ROV
Ft := 45kN	Carga de Compressão
$\sigma_{ESC} := 345\text{ MPa}$	Escoamento do aço

#### Maxima Compressão Permitida

Given

$$Tr = \frac{F \cdot dm}{2} \left( \frac{\pi \cdot f \cdot dm + p}{\pi \cdot dm - f \cdot p} \right)$$

$$F_{max} = \text{Find}(F) \quad F = 161.444 \text{ kN}$$

$$\text{Verif\_A} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Ft < F \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Verif\_A} = \text{"OK"}$$



## Tensão no parafuso (Perna)

Tensão devido a torção

$$d_r := d_m - \frac{p}{2} \quad d_r = 0.059 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{torsion}} := \frac{16 \cdot T_r}{\pi \cdot d_r^3} \quad \sigma_{\text{torsion}} = 68.16 \text{ MPa}$$

Tensão devido a momento na base do parafuso

$$\sigma_b := \frac{6 \cdot F}{\pi \cdot d_r \cdot n_{tp}} \quad \sigma_b = 105.144 \text{ MPa}$$

Tensão axial no parafuso

$$\Delta := \frac{\pi \cdot d_r^2}{4} \quad \sigma := \frac{-F}{A} \quad \sigma = -59.758 \text{ MPa}$$

Tensão de Von Mises

$$\begin{aligned} \sigma_x &:= \sigma_b & \tau_{xy} &:= 0 \text{ MPa} \\ \sigma_y &:= 0 \text{ MPa} & \tau_{yz} &:= \sigma_{\text{torsion}} \\ \sigma_z &:= \sigma & \tau_{xz} &:= 0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_M := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot \tau_{yz}^2 \right]^{0.5} \quad \sigma_M = 186.674 \text{ MPa}$$

$$\text{Verif\_B} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_M < \sigma_{\text{ESC}} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Verif\_B} = \text{"OK"}$$

Cortante máximo

$$\sigma_1 := \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left( \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{yz}^2} \quad \sigma_1 = 44.542 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 := \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left( \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{yz}^2} \quad \sigma_2 = -104.301 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{máx}} := \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \tau_{\text{máx}} = 74.421 \text{ MPa}$$

Tensões nos pinos do "Clamp Locking":

$$F_{\text{pipe}} := 101.65 \text{ kN} \quad \text{Máximo peso submerso do duto}$$

$$F_{\text{clamp}} := 7.65 \text{ kN} \quad \text{Peso do Clamp}$$

$$D_p := 25 \text{ mm} \quad \text{Diâmetro do pino}$$

$$F_{\text{pinA}} := F_{\text{pipe}} + F_{\text{clamp}} \quad F_{\text{pinA}} = 109.3 \text{ kN}$$

$$\Delta := \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} \quad A = 4.909 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\sigma_{\text{adm}} := 0.4 \cdot \sigma_{\text{ESC}} \quad \sigma_{\text{adm}} = 138 \text{ MPa}$$

$$\frac{F_{\text{pinA}}}{6 \cdot A} = 37.111 \text{ MPa}$$

$$\text{Verif\_C} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{F_{\text{pinA}}}{6 \cdot A} < \sigma_{\text{adm}} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Verif\_C} = \text{"OK"}$$

## Tensão nos pinos (Sapata)

$$\phi := 1\text{in}$$

Diametro do pino

$$F_{\text{shoe}} := 161\text{kN}$$

Esforço máximo segundo análise em SACS

$$A_1 := \frac{\pi \cdot \phi^2}{4}$$

$$A_1 = 5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \text{Area Transversal}$$

$$F_{\text{pinB}} := \frac{F_{\text{shoe}}}{4}$$

$$F_{\text{pinB}} = 40.25 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p1} := \frac{F_{\text{pinB}}}{0.75 \cdot A_1}$$

$$\sigma_{p1} = 105.913 \text{ MPa}$$

$$\text{Verif\_D} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_{p1} < \sigma_{\text{adm}} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Verif\_D} = \text{"OK"}$$

## 10 DISCUSSÃO DE RESULTADOS E PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Durante o projeto do suporte mecânico foram realizados estudos quanto à geometria do suporte, fundação rasa em areia e argila, dimensionamento de anodos de sacrifício e peças acessórias tais como pinos e parafusos.

Foi observado que a parte mais importante de desenvolvimento de um projeto estrutural é a concepção inicial, pois é nela que se define a geometria, o modelo estrutural a ser utilizado, os materiais e as seções transversais iniciais, e é nela que a função de engenheiro se mostra mais interessante, que é de dar soluções.

Com relação à análise estrutural do modelo idealizado algumas premissas como o travamento transversal do suporte pelo próprio duto, a não incidência de ondas, apenas de corrente, devido à grande profundidade, o uso de ROVs para a instalação e serviços, e a batimetria do leito marinho foram determinantes para a escolha do modelo de cavalete com pernas telescópicas espraiadas e fundação direta.

No que se refere ao solo, realizaram-se estudos para solo arenoso e para solo argiloso, entretanto, no campo das deformações calculou-se apenas valores para deformações de curto prazo devido à não existência de parâmetros de compressibilidade do solo.

E quanto aos elementos acessórios como anodos, pinos e demais peças, os conceitos envolvidos foram os de resistência dos materiais, e normas da PETROBRAS para dimensionamento de anodos de sacrifício.

Uma questão que é muito deficitária, em minha opinião, no ensino de estruturas metálicas é quanto à norma utilizada. Acredito que deveria haver comentários sobre as normas mais utilizadas em “offshore”, que são a API RP2A WSD20ed e a AISC ASD 9ed, que não se baseiam no método dos estados limites e sim das tensões admissíveis, ao contrário da NBR8800.

O projeto do suporte mecânico abrange várias áreas de interesse na engenharia e suas características e limitações aguçaram a imaginação para novas soluções estruturais, tais como suportes de pernas retas, ou ainda com uso de flutuadores.

## 11 BIBLIOGRAFIA

- 1- [www.estadao.com.br](http://www.estadao.com.br) – seção economia – 15 abril 2008.
- 2- [www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)
- 3- [www.transneft.ru](http://www.transneft.ru)
- 4- en.wikipedia.org
- 5- API RP2A WSD
- 6- AISC ASD 9ed
- 7- NBR 8800
- 8- DNV RP F105
- 9- DNV RP B 401
- 10- Apostila Academica de Analise Matricial
- 11- Manual do Programa SACS – SACS IV