

RAFAEL LOUREIRO TANAKA

ROSIANITA BALENA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESCOLHA DA MELHOR  
CONFIGURAÇÃO PARA UM RISER FLEXÍVEL

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheiro

10,0 (dez)  
O.A. Marturis  
12/12/03

Nota final  
9,7 (nove e sete)

WT  
22/01/04

SÃO PAULO

2003

RAFAEL LOUREIRO TANAKA  
ROSIANITA BALENA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESCOLHA DA MELHOR  
CONFIGURAÇÃO PARA UM RISER FLEXÍVEL**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheiro

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Livre-Docente  
Clóvis de Arruda Martins

SÃO PAULO  
2003

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 MODELO ESTÁTICO.....	3
2.1.1 <i>Geometria do problema</i> .....	3
2.1.2 <i>Esfórcos que atuam sobre o cabo</i> .....	4
2.1.3 <i>Equações do problema estático</i> .....	7
2.1.4 <i>Condições de contorno</i> .....	14
2.1.5 <i>Algoritmo de solução</i> .....	15
2.2 MODELO DINÂMICO .....	16
2.2.1 <i>O problema dinâmico como uma perturbação da configuração de equilíbrio estática</i> .....	16
2.2.2 <i>Sistema de equações do problema completo</i> .....	18
2.2.3 <i>Sistema de equações perturbadas</i> .....	19
2.2.4 <i>Equações em componentes normal e tangencial dos deslocamentos</i> .....	20
2.2.5 <i>Esfórcos atuantes</i> .....	22
2.2.6 <i>Condições de contorno</i> .....	25
<b>3. DEFINIÇÃO DOS DADOS NECESSÁRIOS AO PROBLEMA.....</b>	<b>28</b>
3.1 PARÂMETROS DO PROBLEMA .....	28
3.2 TRATAMENTO DE DADOS .....	31
3.2.1 <i>Configuração Neutra</i> .....	31
3.2.2 <i>Configuração Estática</i> .....	32
3.2.2.1 <i>Projeção da corrente</i> .....	34
3.2.3 <i>Configuração Dinâmica</i> .....	34
3.2.3.1 <i>Movimento da Plataforma</i> .....	37
3.2.3.2 <i>Algoritmo</i> .....	38
3.2.3.3 <i>Conversão da direção da onda para o Heading do RAO</i> .....	38
<b>4. INTERFACE DE DADOS.....</b>	<b>39</b>
4.1 TELA PRINCIPAL.....	39
4.2 DIÁLOGO DE ENTRADA DE DADOS DE CORRENTE .....	40
4.3 DIÁLOGO PARA ENTRADA DE DADOS DE ONDA .....	40
4.4 DIÁLOGO PARA ENTRADA DE DADOS DE RAO .....	41
4.5 DIÁLOGO PARA ENTRADA DE DADOS DE DESLOCAMENTO DA PLATAFORMA.....	42
4.6 DIÁLOGO PARA ENTRADA DE DADOS DA PLATAFORMA.....	42
4.7 DIÁLOGO PARA DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO RISER .....	43
4.8 DIÁLOGO PARA ENTRADA DE DADOS DE DADOS GLOBAIS .....	44
4.10 DIÁLOGO PARA DEFINIÇÃO DAS VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS.....	45
4.11 DIÁLOGO PARA DEFINIÇÃO DOS CASOS DE CARGA ESTÁTICA.....	45
4.12 DIÁLOGO PARA DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO .....	46
4.13 DIÁLOGO PARA DEFINIÇÃO DOS CASOS DE CARGA DINÂMICA .....	47
4.12 ENTRADA E SAÍDA DOS DADOS RELEVANTES AO PROBLEMA VIA ARQUIVOS .TXT.....	48
<b>5. ESCOLHA DOS PARÂMETROS QUE DEFINEM A CONFIGURAÇÃO A SER UTILIZADA.....</b>	<b>55</b>
<b>6. DESENHO E IMPLANTAÇÃO DO ALGORITMO DE ESCOLHA DA MELHOR CONFIGURAÇÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de configuração em catenária simples .....	1
Figura 2 - Exemplo de configuração lazy-wave .....	2
Figura 3 - Geometria do problema .....	4
Figura 4 - Sistema de coordenadas .....	4
Figura 6 - Elemento de cabo .....	8
Figura 7 - Componentes normal e tangencial do carregamento .....	10
Figura 8 - Componentes do deslocamento .....	20
Figura 9 - Componentes do carregamento .....	21
Figura 10 - Esquema da condição de contorno no ponto de touchdown .....	25
Figura 11 - Esquema mostrando os principais parâmetros do problema referentes à onda e ao deslocamento da plataforma .....	28
Figura 12 - Esquema mostrando um cabo com cinco segmentos sujeito a uma configuração do tipo lazy-wave, mostrando os principais parâmetros do problema .....	29
Figura 13 - Esquema mostrando um cabo e alguns parâmetros adicionais do problema .....	29
Figura 14 - Esquema mostrando a ordem de análise .....	30
Figura 15 - Configuração neutra .....	31
Figura 17 - Esquema da rotação da plataforma devido ao offset .....	33
Figura 18 - Convenção da corrente .....	34
Figura 19 - Esquema da plataforma .....	35
Figura 20 - Esquema explicitando o ponto para o qual o RAO é conhecido .....	35
Figura 21 - Cálculo do Heading .....	38
Figura 22 - Tela principal do programa .....	39
Figura 23 - Caixa de diálogo para entrada de dados de corrente .....	40
Figura 24 - Caixa de diálogo para entrada de dados de onda regular .....	41
Figura 25 - Caixa de diálogo para entrada de dados de RAO .....	41
Figura 26 - Caixa de diálogo para entrada de dados de deslocamento da plataforma .....	42
Figura 28 - Caixa de diálogo para definição de propriedades .....	43
Figura 29 - Caixa de diálogo para definição da geometria .....	44
Figura 30 - Caixa de diálogo para entrada de dados globais .....	44
Figura 31 - Caixa de diálogo para definição das variações paramétricas .....	45
Figura 32 - Caixa de diálogo para definição dos casos de carga estática .....	46
Figura 33 - Caixa de diálogo para definição dos casos dos critérios de aceitação .....	47
Figura 34 - Caixa de diálogo para definição dos casos de carga dinâmica .....	48
Figura 35 - Esquema mostrando um cabo com cinco segmentos sujeito a uma configuração do tipo lazy-wave, mostrando os principais parâmetros do problema .....	55
Figura 36 - Diálogo que permite a definição dos critérios de aceitação para a configuração neutra .....	57
Figura 37 - Diálogo que permite a definição dos critérios de aceitação para a configuração estática .....	57
Figura 38 - Diálogo que permite a definição dos critérios de aceitação para a configuração dinâmica .....	58
Figura 39 - Diálogo que mostra se os casos satisfizeram os critérios após a análise neutra .....	59
Figura 40 - Diálogo que mostra se os casos satisfizeram os critérios após a análise estática .....	60
Figura 41 - Diálogo que mostra se os casos satisfizeram os critérios após a análise dinâmica .....	61
Figura 42 - Exemplo de gráfico de resultados dinâmicos (Tração no topo x casos de carregamento) ..	62
Figura 43 - Exemplo de gráfico de resultados dinâmicos (Ângulo no topo x casos de carregamento) ..	63
Figura 44 - Exemplo de gráfico de resultados dinâmicos (Posição do tdp x casos de carregamento) ..	64

## **RESUMO**

O desenvolvimento da tecnologia de extração de petróleo tem ampliado as possibilidades de configurações de riser viáveis tecnicamente para a exploração de um determinado campo petrolífero. Isto tem causado dificuldades na fase de projeto, pois são necessárias inúmeras simulações para determinar a melhor configuração, o que demanda muito tempo técnico e computacional e aumenta o tempo de desenvolvimento geral da plataforma.

O escopo deste trabalho é a solução deste problema através do desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permita ao usuário montar muitos casos de uma vez, através da variação controlada de certos parâmetros do riser.

Estes casos são então submetidos à análise neutra, estática e dinâmica, e entre estas submetidos a critérios de aprovação pré-determinados. Os casos não aprovados não são submetidos às análises subsequentes. Esta eliminação progressiva tem como objetivo eliminar o mais cedo possível e através de análises mais rápidas os casos menos promissores, poupando tempo computacional.

O presente trabalho mostra o desenvolvimento do programa, sua interface e a apresentação de resultados ao usuário.

## ABSTRACT

The development of oil extraction technology has extended the possibilities of technically viable riser configurations for the exploration of a given oil field. This has been causing difficulties in the project phase, because many simulations are necessary to determine the best configuration, what demands a great amount of technical and computational time, increasing the project time for the platform.

The target of this work is the solution of this problem through the development of a computational tool that allows the user to define many cases at a time, through controlled variation of certain parameters of the riser.

These cases are then submitted to neutral, static and dynamic analysis. After each analysis the cases are submitted to pre-determined criteria of approval and the cases that were not approved are not submitted to the subsequent analyses. This gradual elimination objects to eliminate earlier and faster less promising cases, saving computational time.

This work shows the development of the software, its interface and the presentation of results to the user.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo, em especial a brasileira, avança a cada dia na exploração de campos petrolíferos em águas cada vez mais profundas, e à medida que estes campos são descobertos torna-se necessária a busca por novas tecnologias que viabilizem a sua exploração comercial.

Uma parcela importante neste avanço tecnológico é a criação e o desenvolvimento de ferramentas de análise capazes de realizar a simulação do comportamento mecânico dos risers de acordo com a excitação imposta pelo meio ambiente, como movimento de ondas e da plataforma à qual o riser está conectado.

Risers são tubos utilizados no transporte de óleo e gás do campo petrolífero à unidade flutuante. Podem assumir várias configurações, sendo as duas de maior interesse a catenária, que pode ser vista na figura 1 e a configuração conhecida como *lazy-wave*, em que um elemento flutuante é adicionado à configuração inicial com o intuito de reduzir os níveis de tração estática e os esforços dinâmicos à que os risers são submetidos (figura 2).

Este projeto visa a criação e desenvolvimento de uma ferramenta de análise computacional que oriente a escolha da melhor configuração de um *riser* flexível instalado sob uma configuração do tipo *lazy-wave* (figura 2). Esta configuração foi escolhida em substituição àquela em forma de uma catenária simples (figura 1) pois esta se torna inviável para a exploração em grandes profundidades devido ao elevado peso próprio dos risers e às grandes forças de tração necessárias para sustentá-los.

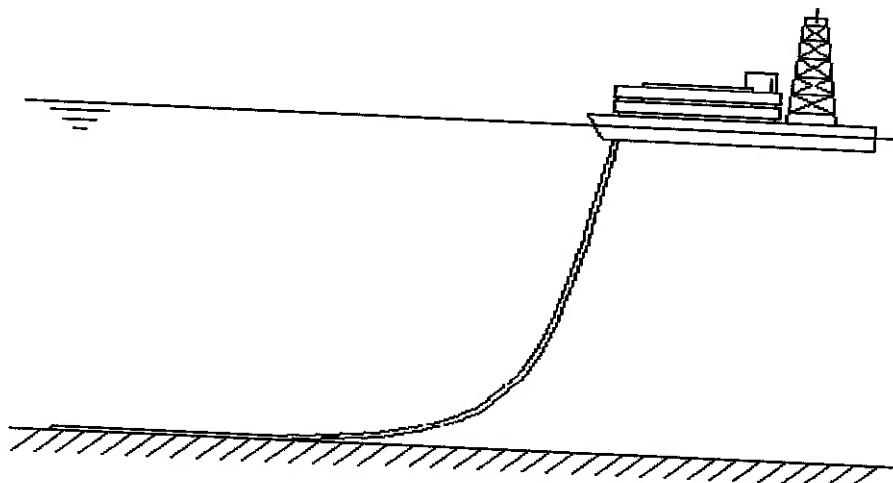


Figura 1 - Exemplo de configuração em catenária simples

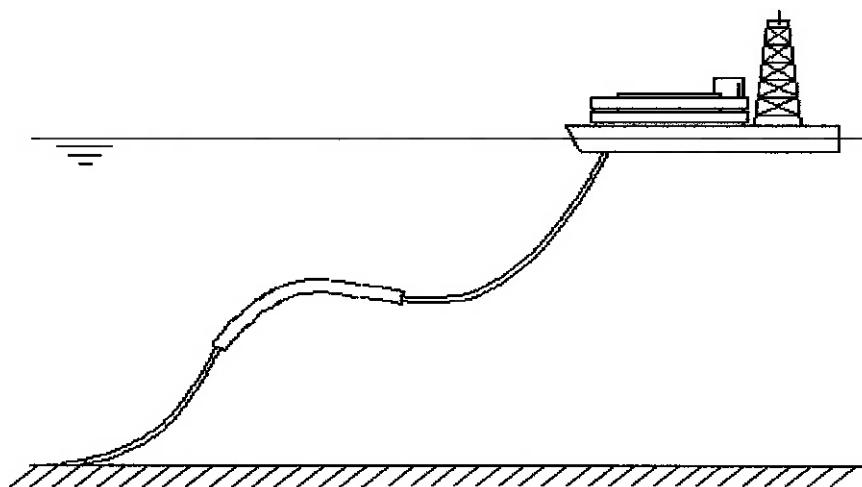


Figura 2 - Exemplo de configuração lazy-wave

Esta ferramenta será de grande ajuda na escolha da melhor configuração possível, pois permitirá a análise sob uma grande variedade de condições impostas ao caso, que torna proibitiva a utilização de um programa comum de análise devido ao grande tempo necessário para montar manualmente um número enorme de possibilidades. Tomando como exemplo o caso da figura 2, supondo que cada um dos 3 trechos de cabo pudesse ter 10 tamanhos diferentes e que a plataforma estivesse sujeita a 5 condições diferentes de corrente ao longo do tempo e também a outras 5 condições de onda, já teríamos  $10*10*10*5*5 = 25000$  casos para montar !! E isso apenas variando alguns parâmetros, entre muitos outros possíveis.

Claramente isto é inviável e por isto esta ferramenta está sendo desenvolvida, de modo a automatizar esta tarefa. Por se tratar de uma ferramenta voltada ao pré-projeto, algumas simplificações de modelo serão feitas de maneira a deixar o programa mais rápido, porém prejudicando ligeiramente a resposta. Os resultados considerados melhores poderão depois ser confrontados através de um programa de análise completo.

A escolha da melhor configuração será feita através da variação de parâmetros como tração no topo do riser, comprimento e posição do flutuador, dentro de uma determinada faixa de valores fornecida pelo usuário, que também fornecerá um conjunto de valores que restringem a configuração de modo que o resultado escolhido deverá respeitar estes limites. Através destes limites poderá-se eliminar muitos casos, evitando assim perda de tempo com casos que não atenderão os critérios de projeto.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo descreve-se a implantação dos algoritmos que fazem a análise estática e dinâmica do riser a partir do conjunto de dados fornecidos pelo usuário e tratados pelo software. Isto é necessário pois o algoritmo utilizado resolve apenas um caso por vez, enquanto o objetivo do software é resolver um grande número de casos.

Para resolver este paradoxo, o software monta um caso por vez, utiliza o algoritmo para resolvê-lo e armazena os resultados para análise posterior.

A realização desta tarefa foi sobremaneira simplificada pela utilização do conceito de Orientação a Objeto no desenvolvimento do software. Isto possibilitou que as partes fossem desenvolvidas e testadas separadamente, encapsuladas em objetos que não são interdependentes. Ao serem integrados, os objetos podem se comunicar através dos métodos e variáveis públicos, que são acessíveis aos demais objetos.

### 2.1 Modelo estático

Este modelo consiste na determinação da configuração de equilíbrio do *riser*, conhecidos o seu comprimento total e as coordenadas de suas extremidades, considerando o cabo como um fio inextensível e perfeitamente flexível cuja configuração de equilíbrio é bidimensional e está inscrita em um plano vertical que contém ambas as suas extremidades. Os esforços aplicados sobre este fio são o seu peso próprio, a pressão hidrostática e o arraste causado pela ação da correnteza marítima local, conhecidos o seu comprimento total e as coordenadas de suas extremidades.

#### 2.1.1 Geometria do problema

O problema estático é formulado da seguinte maneira: determinar a configuração de equilíbrio assumida por um fio pesado de comprimento total  $l_t$ , sendo dadas as posições de suas extremidades inferior e superior  $(x_t, z_t)$ , respectivamente os pontos *O* e *S* da figura 3.

A figura 3 mostra que a configuração assumida pelo fio pode ser dividida em dois trechos: no primeiro ele se apóia sobre o solo e no outro ele está suspenso. O ponto que divide os dois trechos é conhecido como *TDP* (“touchdown point”). A sua posição é uma das incógnitas do problema. Para que o fio possa assumir a

configuração especificada é necessário que seja aplicada à sua extremidade superior uma força de tração  $T_s$  que é outra das incógnitas.

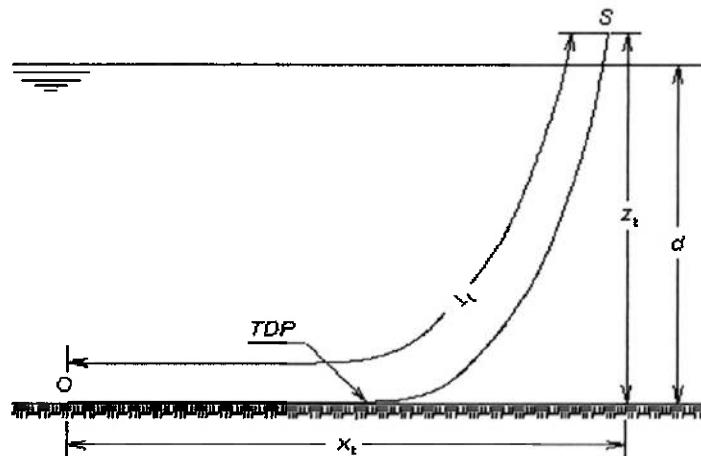


Figura 3 - Geometria do problema

Para representar a posição de um ponto da linha média do cabo, é usada a coordenada curvilínea  $s$  medida sobre a mesma a partir da origem  $O$ , com sentido positivo na direção da extremidade suspensa  $S$ , e um par de coordenadas cartesianas  $x(s)$  e  $z(s)$  conforme está esquematizado na figura 4. O ângulo que a reta tangente à linha média faz com a horizontal no ponto de abscissa  $s$  será chamado de  $\theta(s)$  como representado na figura citada.

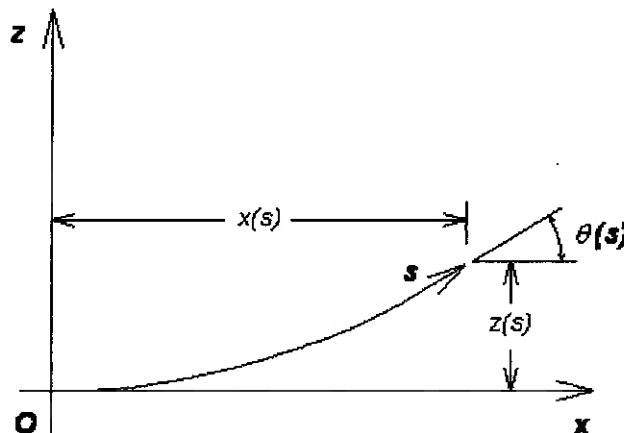


Figura 4 - Sistema de coordenadas

### 2.1.2 Esforços que atuam sobre o cabo

Três tipos de esforços, que são descritos a seguir, atuam sobre o fio no problema estático: o seu peso próprio, a pressão hidrostática e aqueles causados pelo movimento do fluido.

#### i) Peso próprio

Se  $\gamma$  é o peso total do fio por unidade de comprimento, no ar, o peso próprio pode ser representado pela carga distribuída por unidade de comprimento atuando ao longo de toda a sua extensão,

$$\vec{p} = -\gamma \vec{k} \quad (1)$$

onde  $\vec{k}$  é o versor vertical com sentido positivo apontando de baixo para cima.

### ii) Pressão hidrostática

Quando o elemento faz parte de um tubo contínuo, a pressão hidrostática atua apenas sobre a sua superfície lateral e a força resultante não é mais o empuxo, mas uma força  $\vec{h}\Delta s$  que é equivalente à soma do empuxo com uma força de tração variável, conforme o esquema apresentado na figura 5. O efeito da pressão hidrostática pode ser representado, então, por uma carga distribuída pela parede lateral do tubo, cujo valor é obtido pela expressão,

$$\vec{h} = \gamma_a S \vec{k} + \frac{\vec{H}(s + \Delta s) - \vec{H}(s)}{\Delta s} \quad (2)$$

ou, finalmente, quando se leva ao limite para  $\Delta s \rightarrow 0$ ,

$$\vec{h} = \gamma_a S \vec{k} + \frac{d\vec{H}}{ds} \quad (3)$$

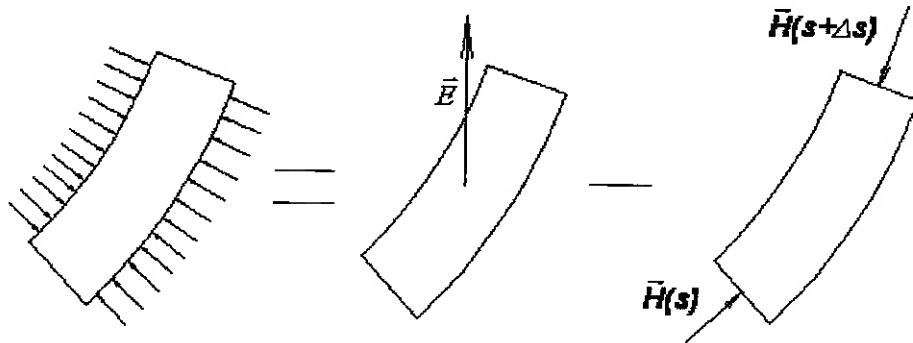


Figura 5 - Pressão hidrostática agindo sobre um elemento do tubo

A força de tração  $\vec{H}(s)$  é oposta à resultante da pressão hidrostática que age na tampa do elemento de tubo fechado e isolado, ou seja,

$$\vec{H}(s) = \gamma_a S (d - z(s)) (\cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{k}) \quad (4)$$

Representando a carga distribuída  $\vec{h}$  na forma:

$$\vec{h} = \gamma_a S \vec{k} + h_x \vec{i} + h_z \vec{k} \quad (5)$$

e substituindo (3) em (4), conclui-se que

$$h_x = \gamma_a S \frac{d}{ds} [(d - z) \cos \theta] \quad (6)$$

e

$$h_z = \gamma_a S \frac{d}{ds} [(d - z) \sin \theta] \quad (7)$$

### iii) Corrente marítima

Um tubo imerso no mar está sujeito a esforços provocados pela ação da corrente marítima que atua no local em que ele está instalado. A velocidade da corrente varia conforme a profundidade e com o tempo. No entanto, pode-se considerar que, no que diz respeito ao movimento do *riser*, a velocidade da corrente é constante no tempo e os esforços por ela causados são de natureza estática.

A velocidade da corrente em função da profundidade pode ser escrita como:

$$\vec{v}_c(z) = v_c f(z) \vec{i} \quad (8)$$

onde  $v_c$  é constante e  $f(z)$  é uma função que depende apenas da coordenada vertical  $z$ , que é medida a partir do fundo do mar.

Segundo a fórmula de Morison, a componente normal ao tubo da força distribuída causada pela corrente pode ser expressa por

$$\vec{c} = \frac{1}{2} c_d D \rho_a \vec{v}_n |\vec{v}_n| \quad (9)$$

onde  $D$  é o diâmetro externo do tubo,  $\rho_a$  é a massa do fluido por unidade de volume,  $\vec{v}_n$  é a componente da velocidade da corrente que é normal ao tubo e  $c_d$  é um coeficiente adimensional, chamado de coeficiente de arraste, que depende do número de Reynolds e da forma da seção transversal.

Se  $\vec{n}$  é o versor que tem a direção normal à linha média do tubo em cada ponto e é expresso por:

$$\vec{n} = -\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{k} \quad (10)$$

então a componente normal da velocidade da corrente pode ser escrita na forma:

$$\vec{v}_n = -v_c f(z) \sin \theta \vec{n} \quad (11)$$

e a componente normal da força distribuída causada pela corrente pode ser representada pela expressão na base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ ,

$$\vec{c} = \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta |f(z) \sin \theta| (\sin \theta \vec{i} - \cos \theta \vec{k}) \quad . \quad (12)$$

Chamando de  $c_x$  a componente horizontal da força distribuída aplicada pela corrente e de  $c_z$  a sua componente vertical, então

$$c_x = \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin^2 \theta |f(z) \sin \theta| \quad . \quad (13)$$

e

$$c_z = -\frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta \cos \theta |f(z) \sin \theta| \quad . \quad (14)$$

#### iv) Esforços totais

O carregamento distribuído aplicado sobre o cabo será a soma dos efeitos do peso próprio, da pressão hidrostática e dos esforços devidos à corrente marítima. A componente horizontal do carregamento total  $q_x$  será, então a soma das componentes horizontais desses efeitos, ou seja,

$$q_x = \gamma_a S \frac{d}{ds} [(d - z) \cos \theta] + \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta^2 |f(z) \sin \theta| \quad . \quad (15)$$

De forma análoga, a componente vertical da carga distribuída total pode ser escrita como

$$q_z = -\gamma + \gamma_a S + h_z + c_z \quad . \quad (16)$$

Definindo-se o peso efetivo por unidade de comprimento,

$$\gamma_{ef} = \gamma - \gamma_a S \quad , \quad (17)$$

a carga vertical total por unidade de comprimento de cabo pode ser colocada na forma:

$$q_z = -\gamma_{ef} + \gamma_a S \frac{d}{ds} [(d - z) \sin \theta] - \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta \cos \theta |f(z) \sin \theta| \quad . \quad (18)$$

#### 2.1.3 Equações do problema estático

O equacionamento completo do problema estático envolve a montagem das equações de compatibilidade de deformação, de equilíbrio de forças, de compatibilidade geométrica, constitutiva e de equilíbrio de momentos. Neste item

todas essas equações são construídas e o sistema final de equações a ser resolvido é apresentado.

### i) Equação de compatibilidade de deformação

Um elemento infinitesimal de cabo que tem comprimento  $\Delta s$  quando indeformado após a deformação terá um comprimento  $\Delta \bar{s}$ . No limite, para  $\Delta \bar{s} \rightarrow 0$ , Esses dois comprimentos estão relacionados pela expressão:

$$\frac{d\bar{s}}{ds} = 1 + \varepsilon \quad (19)$$

onde  $\varepsilon(s)$  representa a deformação axial do cabo na seção transversal de coordenada  $s$ .

### ii) Equações de equilíbrio de forças

Sejam  $\bar{q}_x \Delta \bar{s}$  e  $\bar{q}_z \Delta \bar{s}$  as componentes das resultantes de todas as forças aplicadas sobre o elemento deformado, nas direções horizontal e vertical, respectivamente e sejam, também,  $F_x$  e  $F_z$  as componentes da força que solicita a seção transversal do elemento nessas mesmas direções, conforme está representado na figura abaixo.

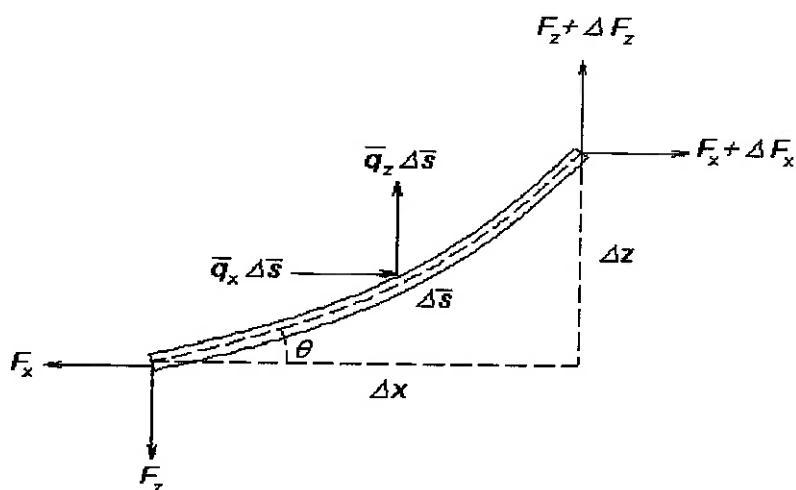


Figura 6 - Elemento de cabo

Fazendo-se o equilíbrio do elemento de cabo na direção horizontal,

$$\bar{q}_x \Delta \bar{s} + \Delta F_x = 0 \quad (20)$$

Dividindo-se essa última equação por  $\Delta \bar{s}$  e levando-se ao limite para  $\Delta \bar{s} \rightarrow 0$ , obtém-se a equação diferencial que representa o equilíbrio de forças na direção horizontal:

$$\frac{dF_x}{d\bar{s}} = -\bar{q}_x \quad . \quad (21)$$

Lembrando que  $\bar{q}_x$  é a carga horizontal distribuída por unidade de comprimento do elemento deformado e chamando de  $q_x$  a carga horizontal distribuída por unidade de comprimento do elemento antes da deformação, como a resultante dos esforços deve ser a mesma nos dois casos, ou seja,

$$\bar{q}_x d\bar{s} = q_x ds \quad , \quad (22)$$

obtém-se a equação de equilíbrio de forças na direção horizontal para a situação indeformada,

$$\frac{dF_x}{ds} = -q_x \quad . \quad (23)$$

Procedendo da mesma maneira para a direção vertical, chega-se à equação diferencial de equilíbrio de forças para essa direção, na situação indeformada,

$$\frac{dF_z}{ds} = -q_z \quad . \quad (24)$$

### iii) Equações de compatibilidade geométrica

Confundindo o comprimento de arco com a corda, como é usual em geometria diferencial, a partir da figura 6 pode ser deduzida a relação trigonométrica

$$\frac{\Delta x}{\Delta \bar{s}} = \cos \theta \quad , \quad (25)$$

ou, levando-se ao limite quando  $\Delta \bar{s} \rightarrow 0$ ,

$$\frac{dx}{d\bar{s}} = \cos \theta \quad . \quad (26)$$

Levando em conta a relação de compatibilidade de deformação axial essa expressão pode ser reescrita para a situação indeformada:

$$\frac{dx}{ds} = (1 + \varepsilon) \cos \theta \quad . \quad (27)$$

Da mesma forma, na situação indeformada,

$$\frac{dz}{ds} = (1 + \varepsilon) \sin \theta \quad . \quad (28)$$

### iv) Equação de equilíbrio de momentos

Um fio ideal não resiste a nenhum esforço de flexão e, portanto, o momento fletor deve ser nulo em todas as suas seções transversais. Para que o elemento de cabo esteja em equilíbrio é necessário que:

$$F_x \Delta z - F_z \Delta x = 0 \quad , \quad (29)$$

como pode ser deduzido a partir da figura 6 considerando-se o equilíbrio dos momentos de todas as forças em relação à extremidade superior do elemento. Dividindo-se essa expressão por  $\Delta s$  e levando em conta as equações geométricas conclui-se que

$$F_x \operatorname{sen} \theta - F_z \cos \theta = 0 \quad , \quad (30)$$

ou seja, que a força cortante  $V$  deve ser nula em cada seção transversal de um fio.

A equação de equilíbrio de momentos pode ser colocada na forma diferencial derivando-se a expressão (3.30) em relação a  $s$ :

$$\frac{dF_x}{ds} \operatorname{sen} \theta - \frac{dF_z}{ds} \cos \theta + F_x \cos \theta \frac{d\theta}{ds} + F_z \operatorname{sen} \theta \frac{d\theta}{ds} = 0 \quad . \quad (31)$$

Usando as equações de equilíbrio de forças pode-se explicitar a curvatura na equação de equilíbrio de momentos:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{q_x \operatorname{sen} \theta - q_z \cos \theta}{F_x \cos \theta + F_z \operatorname{sen} \theta} \quad . \quad (32)$$

Como a força cortante é nula, a força de tração  $T$  é a única força que solicita a seção transversal. As suas componentes horizontal e vertical são, respectivamente, as forças  $F_x$  e  $F_z$  portanto,

$$T = F_x \cos \theta + F_z \operatorname{sen} \theta \quad . \quad (33)$$

Dividindo o carregamento externo nas suas componentes normal  $q_n$  e tangencial  $q_t$ , conclui-se a partir da figura abaixo que

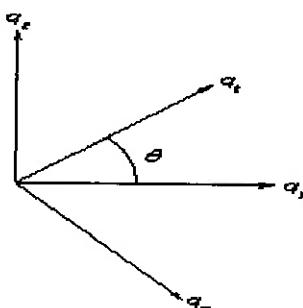


Figura 7 - Componentes normal e tangencial do carregamento

$$q_n = q_x \sin \theta - q_z \cos \theta \quad . \quad (34)$$

Usando, então, (33) e (34) em (32) conclui-se que

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{q_n}{T} \quad , \quad (35)$$

que é a equação diferencial clássica da catenária para grandes deslocamentos.

#### v) Equação constitutiva

Considerando que o comportamento do material que constitui o cabo seja elástico e linear, a deformação  $\varepsilon(s)$  está relacionada em cada ponto com a força de tração  $T(s)$  que atua no cabo pela lei de Hooke:

$$\varepsilon = \frac{T}{EA} \quad , \quad (36)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material e  $A$  é a área da seção transversal do cabo.

#### vi) Força solicitante e força efetiva

Substituindo a expressão da componente horizontal da carga aplicada na equação de equilíbrio obtém-se

$$\frac{dF_x}{ds} = -h_x - c_x \quad . \quad (37)$$

É possível, então, separar o efeito da pressão hidrostática na componente horizontal da força solicitante dividindo-a em duas parcelas,

$$F_x = F_{h,x} + F_{ef,x} \quad (38)$$

onde  $F_{h,x}$  é a componente devida à pressão hidrostática, ou seja,

$$\frac{dF_{h,x}}{ds} = -h_x \quad , \quad (39)$$

que pode ser integrada diretamente de (6),

$$F_{h,x} = -\gamma_a S (d - z) \cos \theta + C \quad (40)$$

e  $F_{ef,x}$ , a componente horizontal da força efetiva, que equilibra a componente horizontal da força causada pela corrente marítima e é tal que

$$\frac{dF_{ef,x}}{ds} = -c_x \quad . \quad (41)$$

De maneira análoga obtenho,

$$F_{h,z} = -\gamma_a S (d - z) \sin \theta + C \quad (42)$$

e  $F_{ef,z}$ , a componente vertical da força efetiva, que equilibra o peso submerso e a força vertical devida à corrente marítima e é tal que

$$\frac{dF_{ef,z}}{ds} = \gamma_{ef} - c_z \quad . \quad (43)$$

Nesse instante podem ser definidas as componentes do carregamento efetivo aplicado sobre o cabo, reescrevendo as expressões na forma

$$q_{ef,x} = \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin^2 \theta |f(z) \sin \theta| \quad (44)$$

e

$$q_{ef,z} = -\gamma_{ef} - \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta \cos \theta |f(z) \sin \theta| \quad . \quad (45)$$

A equação de equilíbrio de forças na direção horizontal tomará, então, a forma

$$\frac{dF_{ef,x}}{ds} = -\frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta^2 |f(z) \sin \theta| \quad (46)$$

e a equação de equilíbrio de forças na direção vertical, a forma

$$\frac{dF_{ef,z}}{ds} = \gamma_{ef} + \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin \theta \cos \theta |f(z) \sin \theta| \quad . \quad (47)$$

As componentes  $F_{h,x}$  e  $F_{h,z}$  não contribuem para a equação de equilíbrio de momentos, pois a sua resultante é uma força paralela ao cabo e, portanto, não precisam ser levadas em consideração na determinação da geometria do cabo. O efeito da pressão hidrostática nessa geometria está representado pela mudança do peso por unidade de comprimento  $\gamma$  para o peso efetivo por unidade de comprimento  $\gamma_{ef}$ . Por isso a equação (3.35) pode ser reescrita na forma

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{q_{ef,x} \sin \theta - q_{ef,z} \cos \theta}{F_{ef,x} \cos \theta + F_{ef,z} \sin \theta} \quad , \quad (48)$$

ou, definindo-se a tração efetiva  $T_{ef}$  de forma análoga à tração solicitante, e a carga normal efetiva  $q_{ef,n}$  por unidade de comprimento de forma análoga à da carga

normal  $q_n$ , pode-se colocar a equação diferencial da catenária em uma forma análoga a (3.35),

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{q_{ef,n}}{T_{ef}} \quad . \quad (49)$$

Assim, a carga normal efetiva por unidade de comprimento pode ser colocada na forma:

$$q_{ef,n} = \gamma_{ef} \cos\theta + \frac{1}{2} c_d D \rho_a v_c^2 f(z) \sin\theta |f(z) \sin\theta| \quad . \quad (50)$$

### vii) Sistema de equações

O sistema de equações a ser resolvido é um sistema diferencial de primeira ordem formado pelas seis equações aqui transcritas,

$$\begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= (1 + \varepsilon) \cos\theta \\ \frac{dz}{ds} &= (1 + \varepsilon) \sin\theta \\ \frac{dF_{ef,x}}{ds} &= -c_x \\ \frac{dF_{ef,z}}{ds} &= \gamma_{ef} - c_z \\ \frac{d\theta}{ds} &= \frac{q_{ef,n}}{T_{ef}} \\ \varepsilon &= \frac{T}{EA} \end{aligned} \quad , \quad (51)$$

e as incógnitas também são seis:  $x(s)$ ,  $z(s)$ ,  $F_{ef,x}(s)$ ,  $F_{ef,z}(s)$ ,  $\theta(s)$  e  $\varepsilon(s)$ .

No presente trabalho o fio será considerado inextensível no problema estático assim, fazendo  $\varepsilon(s) = 0$  o sistema a ser resolvido fica composto por apenas cinco equações diferenciais,

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{ds} &= \cos \theta \\
 \frac{dz}{ds} &= \sin \theta \\
 \frac{dF_{ef,x}}{ds} &= -c_x \\
 \frac{dF_{ef,z}}{ds} &= \gamma_{ef} - c_z \\
 \frac{d\theta}{ds} &= \frac{q_{ef,n}}{T_{ef}}
 \end{aligned} \quad , \quad (52)$$

e as incógnitas também são cinco:  $x(s)$ ,  $z(s)$ ,  $F_{ef,x}(s)$ ,  $F_{ef,z}(s)$  e  $\theta(s)$ .

#### 2.1.4 Condições de contorno

Como são cinco as equações diferenciais a serem resolvidas e cinco as incógnitas do problema e o sistema é de primeira ordem, serão necessárias cinco condições de contorno para resolvê-lo. Se a coordenada curvilínea do ponto de *touchdown* for  $s_b$ , pode-se concluir imediatamente que

$$x(s_b) = s_b \quad (53)$$

e

$$z(s_b) = 0 \quad (54)$$

Se, além disso, o fundo do mar for suposto horizontal, também pode-se concluir imediatamente que

$$\theta(s_b) = 0 \quad (55)$$

e como a força solicitante é tangente à linha média, então,

$$F_z(s_b) = 0 \quad (56)$$

A posição da extremidade suspensa do cabo é um dos dados do problema. Portanto, a partir da figura 3 pode-se escrever que

$$x(\ell_t) = x_t \quad (57)$$

e

$$z(\ell_t) = z_t \quad (58)$$

Aparentemente existem seis condições de contorno, no entanto foi colocada uma incógnita a mais no problema, que é justamente a coordenada  $s_b$  do ponto de

*touchdown*, que não é conhecida a priori, pois o comprimento suspenso  $\ell_s$  é desconhecido.

### 2.1.5 Algoritmo de solução

Se as origens da coordenada curvilínea e do sistema cartesiano forem colocadas no ponto de *touchdown*, as condições de contorno podem ser colocadas na forma:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0 \\ z(0) &= 0 \\ \theta(0) &= 0 \\ F_z(0) &= 0 \\ x(\ell_s) &= x_t - (\ell_t - \ell_s) \\ z(\ell_s) &= z_t \end{aligned} \quad . \quad (59)$$

Note-se que o único valor desconhecido na origem é o da força horizontal. Este fato sugere o uso de um algoritmo iterativo em que se varia em cada passo o valor de  $F_x(0)$ .

Como para qualquer ponto do cabo diferente do topo vale a desigualdade

$$s - x(s) < \ell_t - x_t \quad (60)$$

e para a extremidade suspensa, a igualdade

$$s - x(s) = \ell_t - x_t \quad , \quad (61)$$

sugere-se um algoritmo que tenha a seguinte forma geral:

- i) Arbitra-se ou estima-se um valor inicial para  $F_x(0)$ . Este valor inicial pode ser obtido, por exemplo, de um problema sem corrente, no qual pode ser obtida de forma fechada uma solução da equação diferencial da catenária.
- ii) A partir das condições iniciais integra-se o sistema em relação a  $s$ , verificando em cada passo a validade da condição (60).
- iii) Seja  $s^*$  a abscissa a partir da qual (60) não seja mais válida. Compara-se o valor de  $z(s^*)$  com  $z_t$ . Se eles forem iguais, dentro de uma certa precisão, o algoritmo convergiu e o problema está resolvido. Caso contrário, se  $z(s^*)$  for menor que  $z_t$ , significa que o valor adotado para  $F_x(0)$  foi muito pequeno. Nesse caso, aumenta-se esse valor e volta-se ao passo ii. Caso  $z(s^*)$  for

maior que  $z_t$ , significa que o cabo está esticado demais e que valor de  $F_x(0)$  adotado foi muito grande. Nessa situação, deve-se diminuir o valor de  $F_x(0)$  e voltar ao passo ii.

Para integrar o sistema de equações diferenciais em cada passo do processo iterativo sugere-se um algoritmo explícito do tipo Runge-Kutta com passo auto-adaptativo em função da curvatura, pois para que se tenha uma boa solução, do ponto de vista numérico, será necessário no início do cabo um passo de integração muito menor que no restante do cabo. Um algoritmo de passo constante, levaria a uma solução muito mais demorada do que o necessário.

## 2.2 Modelo dinâmico

Os *risers* estão sujeitos a esforços dinâmicos que são causados pelo seu movimento em relação ao do fluido em que estão imersos e que são provocados pelo movimento da unidade flutuante a que estão conectados. Em águas profundas, os comprimentos suspensos têm a ordem de grandeza de milhares de metros, dessa forma é razoável considerar como válida a hipótese de pequenos deslocamentos, que será adotada no presente texto.

O modelo considerado é o de um fio extensível mas perfeitamente flexível, cujo movimento pode ser inscrito em um plano vertical que contém as suas extremidades. Esse movimento é linearizado em torno da posição de equilíbrio, sendo desprezados termos de ordem igual ou superior ao quadrado ou produto das variáveis dinâmicas.

As equações dinâmicas são discretizadas, usando-se o Método dos Elementos Finitos. Como as excitações consideradas são harmônicas e o modelo é totalmente linear, o problema pode ser resolvido no domínio da freqüência.

### 2.2.1 O problema dinâmico como uma perturbação da configuração de equilíbrio estática

#### i) Coordenadas e deslocamentos

A posição no espaço de um ponto do *riser* que possui abscissa curvilínea  $s$  pode ser representada em cada instante pelo par de coordenadas cartesianas  $x(s,t)$  e  $z(s,t)$ . Se  $x_e(s)$  e  $z_e(s)$  forem as coordenadas desse ponto na situação estática e  $u(s,t)$  e

$w(s,t)$  forem, respectivamente, os deslocamentos horizontal e vertical por ele sofridos a partir da situação de equilíbrio, são válidas as relações:

$$x(s,t) = x_e(s) + u(s,t) \quad (62)$$

e

$$z(s,t) = z_e(s) + w(s,t) \quad (63)$$

Da mesma forma, se  $\theta(s,t)$  for o ângulo que a tangente à linha média do cabo forma com a horizontal, no ponto de abscissa curvilínea  $s$  e no instante  $t$ ,  $\theta_e(s)$  for o mesmo ângulo na situação estática e  $\varphi(s,t)$  for o ângulo medido a partir da configuração de equilíbrio, então

$$\theta(s,t) = \theta_e(s) + \varphi(s,t) \quad (64)$$

### ii) Esforços solicitantes

De maneira análoga aos deslocamentos, considerando-se o movimento como uma pequena perturbação da configuração estática, os esforços que solicitam uma seção do cabo podem ser considerados como a soma de duas parcelas: uma estática e outra dinâmica, assim

$$F_x(s,t) = F_{x,e}(s) + F_{x,d}(s,t) \quad (65)$$

e

$$F_z(s,t) = F_{z,e}(s) + F_{z,d}(s,t) \quad , \quad (66)$$

onde  $F_{x,e}$  e  $F_{z,e}$  são as componentes estáticas,  $F_{x,d}$  e  $F_{z,d}$  as dinâmicas e  $F_x$  e  $F_z$  as resultantes.

Da mesma forma a força de tração total  $T(s,t)$  pode ser separada em duas componentes, uma estática  $T_e(s,t)$  e outra dinâmica  $\tau(s,t)$  de forma que

$$T(s,t) = T_e(s) + \tau(s,t) \quad (67)$$

### iii) Esforços aplicados

As forças por unidade de comprimento aplicadas ao cabo também serão separadas em suas parcelas estática e dinâmica. Assim, sendo  $q_x$  e  $q_z$  as resultantes de todas as forças aplicadas por unidade de comprimento, estáticas e dinâmicas, respectivamente nas direções horizontal e vertical, pode-se escrever

$$q_x(s,t) = q_{x,e}(s,t) + q_{x,d}(s,t) \quad (68)$$

e

$$q_z(s, t) = q_{z,e}(s, t) + q_{z,d}(s, t) \quad , \quad (69)$$

onde  $q_{x,e}$  e  $q_{z,e}$  são as componentes estáticas e  $q_{x,d}$  e  $q_{z,d}$  as dinâmicas. As componentes estáticas do carregamento já foram apresentadas no item anterior, as componentes dinâmicas serão discutidas mais adiante.

#### iv) Deformação axial

Da mesma forma que as outras variáveis, a deformação axial  $\varepsilon$  será a soma de duas parcelas,

$$\varepsilon(s, t) = \varepsilon_e(s) + e(s, t) \quad , \quad (70)$$

onde  $\varepsilon_e$  é a parte estática e  $e$  a parte dinâmica.

#### 2.2.2 Sistema de equações do problema completo

As equações do problema completo são obtidas trocando as variáveis estáticas pelas totais e as derivadas totais em  $s$  por derivadas parciais nas equações que compõem o sistema de equações estático pois agora as variáveis também são função do tempo. Dessa forma o sistema de equações diferenciais a ser integrado fica:

$$\frac{\partial x}{\partial s} = (1 + \varepsilon) \cos \theta \quad , \quad (71)$$

$$\frac{\partial z}{\partial s} = (1 + \varepsilon) \sin \theta \quad , \quad (72)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} (T \cos \theta) = -q_x \quad , \quad (73)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} (T \sin \theta) = -q_z \quad , \quad (74)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} = \frac{q_n}{T} \quad , \quad (75)$$

$$\varepsilon = \frac{T}{EA} \quad . \quad (76)$$

### 2.2.3 Sistema de equações perturbadas

As expressões (62), (64) e (70) podem ser aplicadas na equação de compatibilidade (71),

$$\frac{\partial}{\partial s}(x_e(s) + u(s, t)) = (1 + \varepsilon_e(s) + e(s, t)) \cos(\theta_e(s) + \varphi(s, t)) \quad , \quad (77)$$

cujo fator trigonométrico pode ser expandido em série de Taylor em  $\varphi$ . Desenvolvendo essa expressão e desprezando os termos dinâmicos quadráticos ou superiores, chega-se a

$$\frac{\partial u}{\partial s} = e \cos \theta_e - (1 + \varepsilon_e) \varphi \sin \theta_e \quad . \quad (78)$$

O mesmo procedimento pode ser usado para transformar (72) em

$$\frac{\partial w}{\partial s} = e \sin \theta_e + (1 + \varepsilon_e) \varphi \cos \theta_e \quad . \quad (79)$$

Um tratamento análogo pode ser dado às equações de equilíbrio. Dessa forma,

$$\frac{\partial}{\partial s} [(T_0(s) + \tau(s, t)) \cos(\theta_e(s) + \varphi(s, t))] = -(q_{x,e}(s, t) + q_{x,d}(s, t)) \quad . \quad (80)$$

Expandindo-se o termo trigonométrico em série de Taylor em  $\varphi$ , desenvolvendo-se a equação e desprezando-se os termos dinâmicos quadráticos ou superiores, resulta

$$\frac{d}{ds} (T_e \cos \theta_e) + \frac{\partial}{\partial s} (\tau \cos \theta_e - \varphi T_e \sin \theta_e) = -(q_{x,e} + q_{x,d}) \quad . \quad (81)$$

Nesta última equação pode ser aplicada a equação de equilíbrio do problema estático, resultando na forma final

$$\frac{\partial}{\partial s} (\tau \cos \theta_e - \varphi T_e \sin \theta_e) = -q_{x,d} \quad . \quad (82)$$

Usando o mesmo procedimento chega-se à outra equação de equilíbrio de forças:

$$\frac{\partial}{\partial s} (\tau \sin \theta_e + \varphi T_e \cos \theta_e) = -q_{z,d} \quad (83)$$

E a equação que relaciona força de tração com deformação é obtida de maneira similar,

$$e = \frac{\tau}{EA} \quad (84)$$

#### 2.2.4 Equações em componentes normal e tangencial dos deslocamentos

É mais conveniente que se use para descrever o movimento as suas componentes normal  $u_n(s, t)$  e tangencial  $u_t(s, t)$  em lugar das componentes horizontal  $u(s, t)$  e vertical  $w(s, t)$  que foram utilizadas até agora. A figura 8 permite que se escrevam as relações de transformação entre esses dois conjuntos de coordenadas:

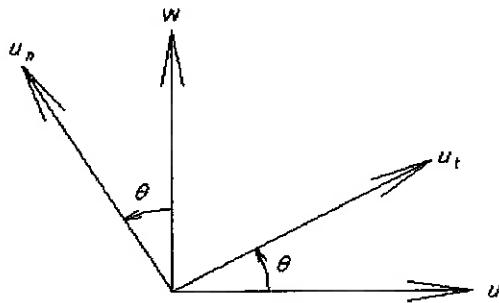


Figura 8 – Componentes do deslocamento

$$u(s, t) = u_t(s, t) \cos \theta_e(s) - u_n(s, t) \sin \theta_e(s) \quad (85)$$

e

$$w(s, t) = u_t(s, t) \sin \theta_e(s) + u_n(s, t) \cos \theta_e(s) \quad (86)$$

As formas inversas dessas equações de transformação são obtidas multiplicando, em primeiro lugar (85) por  $\cos \theta_e(s)$  e somando o resultado com (86) multiplicada por  $\sin \theta_e(s)$ , o que leva à relação de transformação

$$u_t(s, t) = u(s, t) \cos \theta_e(s) + w(s, t) \sin \theta_e(s) \quad (87)$$

e de maneira análoga obtém-se outra relação de transformação

$$u_n(s, t) = -u(s, t) \sin \theta_e(s) + w(s, t) \cos \theta_e(s) \quad (88)$$

De maneira similar, podem ser definidas as componente normal  $q_n(s, t)$  e tangencial  $q_t(s, t)$  da força dinâmica aplicada por unidade de comprimento. Dessa forma,

$$q_n(s, t) = -q_{x,d}(s, t) \sin \theta_e(s) + q_{z,d}(s, t) \cos \theta_e(s) \quad (89)$$

e

$$q_t(s, t) = q_{x,d}(s, t) \cos \theta_e(s) + q_{z,d}(s, t) \sin \theta_e(s) \quad (90)$$

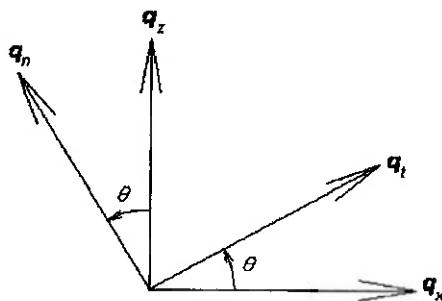


Figura 9 - Componentes do carregamento

Assim, multiplicando (89) por  $\cos \theta_e$ , (90) por  $\sin \theta_e$ , somando as duas expressões, desenvolvendo as derivadas em relação a  $s$  e aplicando no resultado a relação de transformação, é obtida a equação de equilíbrio

$$\frac{\partial \tau}{\partial s} - \varphi T_e \frac{d\theta_e}{ds} = -q_t \quad (91)$$

De forma análoga é obtida a outra equação de equilíbrio

$$\tau \frac{d\theta_e}{ds} + \frac{\partial}{\partial s} (\varphi T_e) = -q_n \quad (92)$$

Para obter as novas equações de compatibilidade é necessário, em primeiro lugar, derivar as relações (87) e (88) em relação a  $s$ . E após uma certa manipulação algébrica chega-se à equação

$$\frac{\partial u_n}{\partial s} + u_t \frac{d\theta_e}{ds} = (1 + \varepsilon_e) \varphi \quad (93)$$

O novo sistema de equações dinâmicas a ser resolvido é, agora,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \tau}{\partial s} - \varphi T_e \frac{d\theta_e}{ds} &= -q_t \\
 \tau \frac{d\theta_e}{ds} + \frac{\partial}{\partial s}(\varphi T_e) &= -q_n \\
 \frac{\partial u_t}{\partial s} - u_n \frac{d\theta_e}{ds} &= e \\
 \frac{\partial u_n}{\partial s} + u_t \frac{d\theta_e}{ds} &= (1 + \varepsilon_e) \varphi \\
 e &= \frac{\tau}{EA}
 \end{aligned} \tag{94}$$

### 2.2.5 Esforços atuantes

Até aqui não foram apresentados os esforços que serão considerados no problema dinâmico, mas todos eles foram englobados nas componentes normal  $q_n(s, t)$  e tangencial  $q_t(s, t)$  do carregamento. Este item tem por finalidade apresentar esses esforços para completar a formulação.

#### i) Inércia

A inércia é a propriedade que têm os corpos de resistir a mudanças em sua aceleração. Pelo princípio de d'Alembert, o efeito da inércia é equivalente à aplicação de uma força com mesma direção da aceleração, sentido oposto e magnitude igual ao produto da massa pela aceleração. Dessa forma, a componente tangencial da força de inércia por unidade de comprimento é

$$i_t = -\rho \ddot{u}_t \tag{95}$$

e a sua componente normal é

$$i_n = -\rho \ddot{u}_n \tag{96}$$

#### ii) Inércia adicional

Quando um corpo se movimenta imerso em um fluido, ele desloca junto com o seu movimento uma certa massa desse fluido. Esse efeito é equivalente a um acréscimo na massa do corpo, que é conhecido como massa adicional. O valor da massa adicional é igual ao produto da massa deslocada pelo corpo por uma constante de proporcionalidade adimensional  $c_m$  conhecida como coeficiente de massa adicional. Assim, o efeito da massa adicional equivale à aplicação de uma força por unidade de comprimento na direção normal ao cabo expressa por

$$i_a = -c_m \rho_a S \tag{97}$$

onde  $\rho_a$  é a massa do fluido por unidade de volume e  $S$  é a área da seção transversal do cabo.

### iii) Amortecimento linear

Quando um corpo oscila em um fluido, aparece uma força viscosa, conhecida como força de arraste, que se opõe ao movimento e é quadrática na velocidade. Assim, na direção tangencial a força de arraste por unidade de comprimento terá a forma

$$a_t = -\frac{4}{3\pi} \rho_a D c_{d,t} \omega A_0 \dot{u}_t , \quad (98)$$

onde  $\rho_a$  é a massa de fluido por unidade de volume,  $D$  é o diâmetro externo do tubo,  $\omega$  é a freqüência das ondas do mar,  $A_0$  é a sua amplitude e  $c_{d,t}$  é um coeficiente adimensional conhecido como coeficiente de arraste na direção tangencial.

Na direção normal, a força de arraste terá uma expressão semelhante

$$a_n = -\frac{4}{3\pi} \rho_a D c_{d,n} \omega A_0 \dot{u}_n , \quad (99)$$

onde  $c_{d,n}$  é o coeficiente de arraste na direção normal.

### iv) Onda

Linearizando a fórmula de Morison, a força por unidade de comprimento causada pela incidência direta das ondas sobre o cabo é

$$a_w = \frac{4}{3\pi} \rho_a D c_{d,w} \omega A_w v_{w,n} \quad (100)$$

onde  $v_{w,n}$  é a componente da velocidade da onda que é normal ao cabo em cada ponto.

O potencial de velocidades  $\phi$  associado a uma onda harmônica pode ser colocado na forma

$$\phi(x, z, t) = \frac{g A_w}{\omega} e^{k_w(z-d)} \sin(k_w x - S_w \omega t) \quad (101)$$

onde  $g$  é a aceleração local da gravidade,  $A_w$  é a amplitude da onda,  $\omega$  é a sua freqüência angular,  $k_w$  é o número da onda e  $S_w$  indica o sentido de propagação. Se  $S_w = 1$  a onda se propaga no sentido positivo da coordenada  $x$  e se  $S_w = -1$  a onda se propaga no sentido oposto.

A velocidade  $\vec{v}_w$  da onda incidente corresponde ao vetor gradiente do potencial de velocidades. Então, a velocidade da onda é

$$\vec{v}_w = \frac{g A_w k_w}{\omega} e^{k_w(z-d)} [\cos(k_w x - S_w \omega t) \vec{i} + \sin(k_w x - S_w \omega t) \vec{k}] . \quad (102)$$

Para águas profundas o número da onda  $k_w$  e a sua freqüência angular  $\omega$  estão ligados pela relação de dispersão

$$k_w = \frac{\omega^2}{g} \quad (103)$$

e, nesse caso, a velocidade da onda pode ser colocada na forma

$$\vec{v}_w = A_w \omega e^{k_w(z-d)} [\cos(k_w x - S_w \omega t) \vec{i} + \sin(k_w x - S_w \omega t) \vec{k}] . \quad (104)$$

A componente normal da velocidade da onda é obtida por meio do produto escalar

$$v_{w,n} = \vec{v}_w \cdot \vec{n} , \quad (105)$$

onde  $\vec{n}$  é o vetor normal em cada ponto do cabo dado por

$$\vec{n} = -\sin \theta_e \vec{i} + \cos \theta_e \vec{k} . \quad (106)$$

Então, colocando em evidência os termos que dependem do tempo, a expressão pode ser escrita na forma mais compacta,

$$v_{w,n} = S_w A_w \omega e^{k_w(z-d)} \operatorname{Re} \{ [\cos(S_w k_w x) - i \sin(S_w k_w x)] [-\sin(S_w \theta_e) + i \cos(S_w \theta_e)] \} e^{i \omega t} . \quad (107)$$

Juntando esse último resultado à expressão (100), a carga distribuída por unidade de comprimento devida à onda, desprezando termos dinâmicos de segunda ordem, toma a forma

$$a_w = \frac{4}{3\pi} \rho_a D c_{d,n} \omega^2 A_w^2 S_w e^{k_w(z_e-d)} \{ [\cos(S_w k_w x_e) - i \sin(S_w k_w x_e)] [-\sin(S_w \theta_e) + i \cos(S_w \theta_e)] \} e^{i \omega t} , \quad (108)$$

onde foram substituídas as coordenadas totais pelas coordenadas estáticas e foi eliminada a função valor real, que a partir desse ponto fica subentendida para simplificar a notação.

Definindo-se a função

$$\bar{a}_w(s) = \frac{4}{3\pi} \rho_a D c_{d,n} \omega^2 A_w^2 S_w e^{k_w(z_e-d)} \{ [\cos(S_w k_w x_e) - i \sin(S_w k_w x_e)] [-\sin(S_w \theta_e) + i \cos(S_w \theta_e)] \} , \quad (109)$$

que representa a amplitude do carregamento devido à onda em cada ponto, esse carregamento pode ser expresso na forma mais compacta:

$$a_w(s, t) = \bar{a}_w(s) e^{i\omega t} \quad (110)$$

#### v) Esforços totais

Somando todos os esforços apresentados, a componente da força total distribuída por unidade de comprimento na direção tangencial é dada por

$$q_t = i_t + a_t \quad (111)$$

e a componente da mesma força na direção normal é dada por,

$$q_n = i_n + i_a + a_n + a_w \quad (112)$$

#### 2.2.6 Condições de contorno

##### i) Condições de contorno no ponto de touchdown

No problema dinâmico é considerado que o ponto de *touchdown* é o mesmo obtido na solução do problema estático. Esta hipótese não leva em conta o movimento do ponto de contato, mas não altera de maneira significativa o comportamento dinâmico global do cabo. Ela é, no entanto, necessária possibilitar que seja construído um modelo linear. Nesse sentido, o ponto de *touchdown* é impedido de se mover na direção perpendicular ao fundo do mar, ou seja,

$$u_n(0, t) = 0 \quad (113)$$

Na direção tangente ao solo, a deformação axial do trecho que se apóia sobre o fundo é importante. Para considerá-la, a porção do cabo que se encontra sobre o fundo do mar é substituída por uma mola linear de rigidez  $k$ , conforme o esquema da figura 10, ou seja, o deslocamento do ponto de *touchdown* na direção tangencial estará relacionado com a força de tração dinâmica por uma expressão do tipo

$$\tau(0, t) = k u_t(0, t) \quad (114)$$

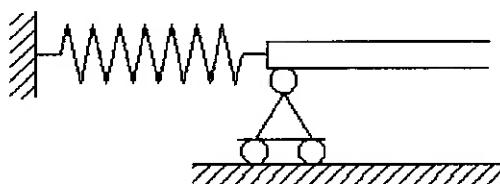


Figura 10 - Esquema da condição de contorno no ponto de touchdown

Como o ponto de ancoragem do cabo é fixo, o movimento do ponto de *touchdown* causará uma deformação no trecho que se apóia sobre o solo. Como existe atrito entre solo e cabo, apenas uma parte desse trecho sofrerá deformação. Se  $\ell'$  for o comprimento de cabo sujeito a deformação, então

$$k = \frac{EA}{\ell'} \quad . \quad (115)$$

Adotando o modelo de atrito de escorregamento de Coulomb, o comprimento de cabo que pode se movimentar e, portanto, sofrer deformação é

$$\ell_1 = \frac{T_e(0)}{\mu\gamma_s} \quad . \quad (116)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre cabo e solo. Por outro lado, o comprimento de cabo que sofre deformação não pode ser maior que a distância entre o ponto de *touchdown* e a âncora, que é

$$\ell_2 = \ell_t - \ell_s \quad , \quad (117)$$

e, portanto,

$$\ell' = \max\{\ell_1, \ell_2\} \quad . \quad (118)$$

## ii) Condições de contorno no topo

A extremidade superior do cabo submerso está ligada a uma unidade flutuante de produção de petróleo. O movimento dessa extremidade é igual ao movimento do ponto da unidade flutuante a que ela está ligada. Assume-se, neste trabalho, que o movimento da plataforma é harmônico e, portanto, a extremidade superior do cabo tem um movimento horizontal que pode ser escrito na forma

$$u(\ell_s, t) = U \cos(\omega t + \varphi_u) \quad , \quad (119)$$

onde a amplitude  $U$  e a fase  $\varphi_u$  são conhecidas e o movimento vertical tem a forma

$$w(\ell_s, t) = W \cos(\omega t + \varphi_w) \quad , \quad (120)$$

em que a amplitude  $W$  e a fase  $\varphi_w$  também são conhecidas.

Desprezando os termos dinâmicos quadráticos, a componente tangencial do movimento do topo pode ser escrita na forma

$$u_t(\ell_s, t) = U_{t,c} \cos(\omega t) - U_{t,s} \sin(\omega t) \quad , \quad (121)$$

onde

$$U_{t,c} = U \cos \varphi_u \cos \theta_e(\ell_s) + W \cos \varphi_w \sin \theta_e(\ell_s) \quad (122)$$

e

$$U_{t,s} = U \sin \varphi_u \cos \theta_e(\ell_s) + W \sin \varphi_w \sin \theta_e(\ell_s) , \quad (123)$$

Da mesma maneira, a componente normal do movimento do topo pode ser escrita na forma

$$u_n(\ell_s, t) = -U \cos(\omega t + \varphi_u) \sin \theta_e(\ell_s) + W \cos(\omega t + \varphi_w) \cos \theta_e(\ell_s) , \quad (124)$$

ou, desenvolvendo-se os termos trigonométricos,

$$u_n(\ell_s, t) = U_{n,c} \cos(\omega t) - U_{n,s} \sin(\omega t) , \quad (125)$$

onde

$$U_{n,c} = -U \cos \varphi_u \sin \theta_e(\ell_s) + W \cos \varphi_w \cos \theta_e(\ell_s) \quad (126)$$

e

$$U_{n,s} = -U \sin \varphi_u \sin \theta_e(\ell_s) + W \cos \varphi_w \sin \theta_e(\ell_s) , \quad (127)$$

### 3. DEFINIÇÃO DOS DADOS NECESSÁRIOS AO PROBLEMA

#### 3.1 Parâmetros do Problema

A figura 11 mostra os principais dados necessários para definir a influência do deslocamento da plataforma e do tipo de onda sobre a configuração do riser, sendo assim parâmetros necessários para a determinação da melhor configuração a que será submetido o riser flexível.

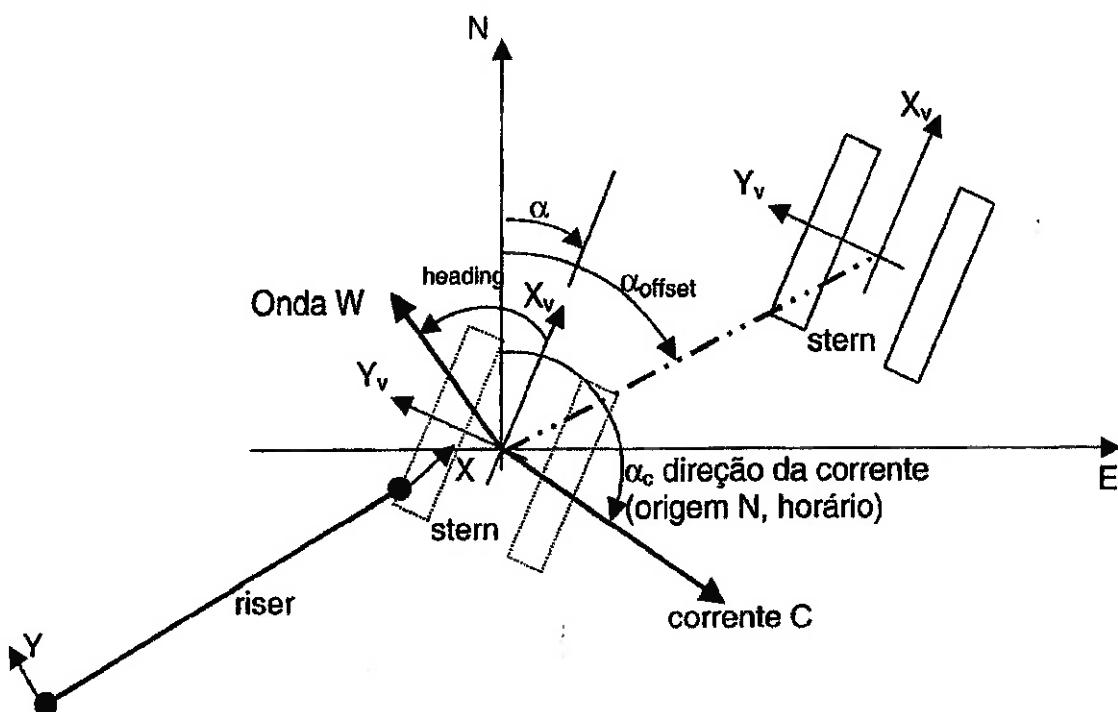


Figura 11 – Esquema mostrando os principais parâmetros do problema referentes à onda e ao deslocamento da plataforma

A figura 12 mostra um cabo com cinco segmentos sujeito a uma configuração do tipo lazy-wave, sendo indicados os principais parâmetros necessários para a solução do problema. Esta figura é complementada pela figura 13 que mostra outros parâmetros, visíveis apenas a partir de uma vista superior.

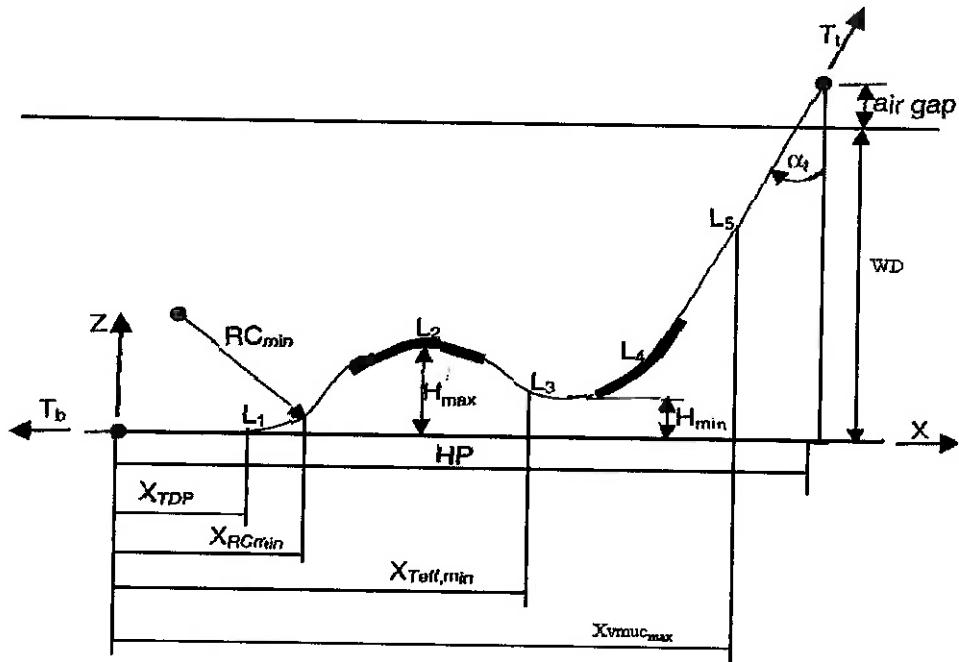


Figura 12 – Esquema mostrando um cabo com cinco segmentos sujeito a uma configuração do tipo lazy-wave, mostrando os principais parâmetros do problema

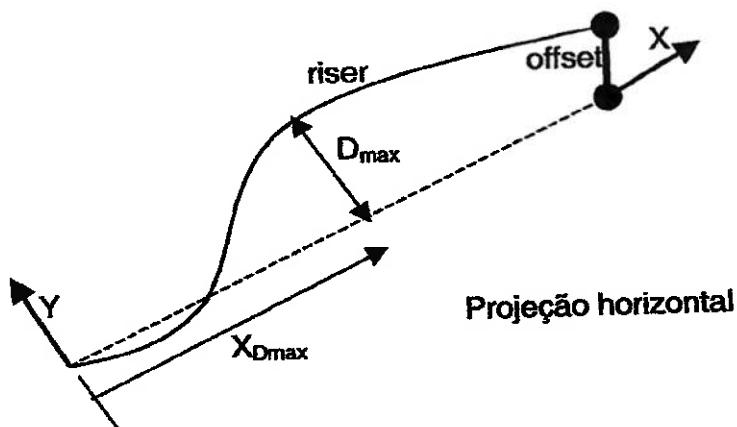


Figura 13 – Esquema mostrando um cabo e alguns parâmetros adicionais do problema

Os principais parâmetros dentre os expostos acima são :

- $X_v$  e  $Y_v$  : direções do eixo de coordenadas preso à plataforma
- $X$  e  $Y$  : direções do eixo de coordenada preso ao cabo
- $\alpha_{\text{offset}}$  : ângulo do deslocamento imposto à plataforma pela corrente
- $\alpha_c$  : ângulo da corrente incidente sobre a plataforma
- $T_t$  : tração no topo

- Air gap : distância vertical entre o ponto de fixação do riser à plataforma e a superfície do mar
- $\alpha_t$ : ângulo do cabo no topo
- WD : profundidade do mar
- Li (1 a 5) : comprimento dos trechos de cabo
- Hmax e Hmin : restrições relativas a profundidade de cada trecho
- Tb : Tração incidente sobre a âncora
- HP : projeção horizontal da distância da âncora até a plataforma
- RCmin : mínimo raio de curvatura
- $X_{RC_{min}}$  : posição onde ocorre o raio de curvatura mínimo
- Xtdp : posição do TDP, ponto onde o cabo toca o chão pela primeira vez
- Xteff<sub>min</sub> : posição do ponto onde a tração efetiva é mínima (importante para evitar compressão sobre o cabo)
- Dmax : máxima distância, em y, do cabo até a reta que liga a âncora à plataforma
- Xdmax : posição onde a condição acima ocorre

Além destes são necessários dados relativos ao tipo de onda, como amplitude e período, e ao movimento da plataforma, como o RAO.

O RAO funciona como um tipo de função de transferência onde através da freqüência da onda e do ângulo de apropoamento (ângulo entre a onda incidente e a plataforma) obtém-se a movimentação da plataforma nos seis graus de liberdade para uma amplitude unitária. Por ser linear, caso a amplitude seja n vezes maior a movimentação também o será.

Também são necessários dados relativos ao ambiente, como a aceleração da gravidade e a densidade da água e sobre os tipos de cabo usado, como seu peso, diâmetro, rigidez axial e flexional e outros que podem ser vistos na seção seguinte.

Além disso foi também definiu-se a sequência de análises que será seguida pelo programa, a qual está esquematizada na figura 14



Figura 14 – Esquema mostrando a ordem de análise

Uma configuração neutra corresponde ao cabo apenas sob ação da gravidade e do empuxo da água, sem considerar o efeito da corrente do mar sobre o cabo e sobre a posição da plataforma. Estes efeitos serão considerados na segunda etapa, a análise estática, porém apenas para casos que forem aprovados, diminuindo assim o número de casos. A possibilidade de eliminação de casos não promissores através de análises que demandem menor tempo computacional foi o critério que levou a seleção desta ordem específica de análise, em detrimento das outras ordens possíveis.

### 3.2 Tratamento de Dados

O programa deve integrar os dados fornecidos pelo usuário e transformá-los de maneira a ficarem todos no mesmo sistema de coordenadas pois os modelos estático e dinâmico pré-existentes exigem uma determinada convenção. Por exemplo o RAO é dado em função do sistema da plataforma e esse sistema é diferente do sistema do riser devido à rotação imposta pelo offset. A seguir está explicitado o modelo usado para fazer essa conversão.

#### 3.2.1 Configuração Neutra

platx, platy, platz – coordenadas do ponto de suspensão do riser em relação ao sistema do riser. O sistema do riser está descrito na figura 15, tendo o eixo y alinhado com o norte, o eixo x com o leste e o eixo z saindo do papel.

$$platz = prof - d + z_{vr} \quad (128)$$

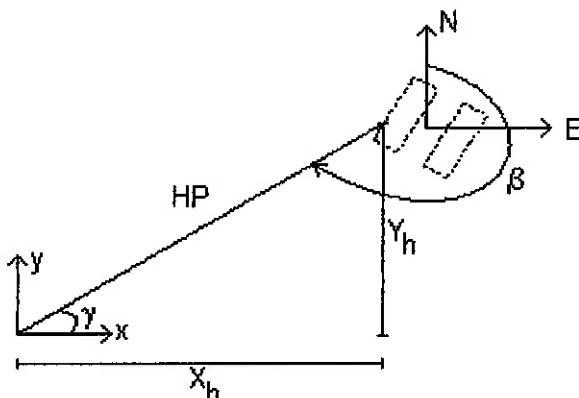


Figura 15 – Configuração neutra

$$platx = x_h = HP \sin \gamma \quad (129)$$

$$platy = y_h = HP \cos \gamma \quad (130)$$

onde  $HP$  é a projeção horizontal do riser e  $\beta$  é a direção do riser medida a partir do norte.

$$\gamma = 450^\circ - \beta \quad (131)$$

$$platx = -HP \cos(450^\circ - \beta) \quad (132)$$

$$platy = -HP \sin(450^\circ - \beta)$$

### 3.2.2 Configuração Estática

Na configuração estática deve-se considerar o efeito da corrente sobre o cabo e também sobre a plataforma. O efeito sobre o cabo é considerado no próprio modelo estático porém o da plataforma não, por isso é necessário encontrar a nova posição do topo da plataforma e fornecê-lo ao algoritmo. A corrente causa uma translação do centro da plataforma de amplitude  $WD$  em um ângulo  $\eta$  e também uma rotação para o ângulo  $\Delta$ . Todos estes dados são fornecidos pelo usuário.

$$platx\_est = platx + x_f + x_D \quad (133)$$

$$platy\_est = platy + y_f + y_D \quad (134)$$

Onde  $x_f, y_f$  são os deslocamentos causados pela rotação da plataforma e  $x_D, y_D$  são os deslocamentos causados pela translação do centro desta.

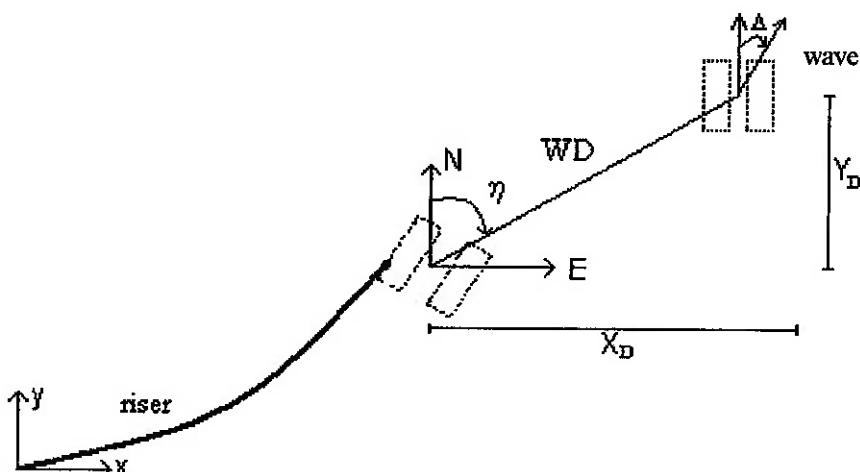


Figura 16 – Configuração estática

$$x_D = WD \cos(90^\circ - \eta) \quad (135)$$

$$y_D = WD \sin(90^\circ - \eta) \quad (136)$$

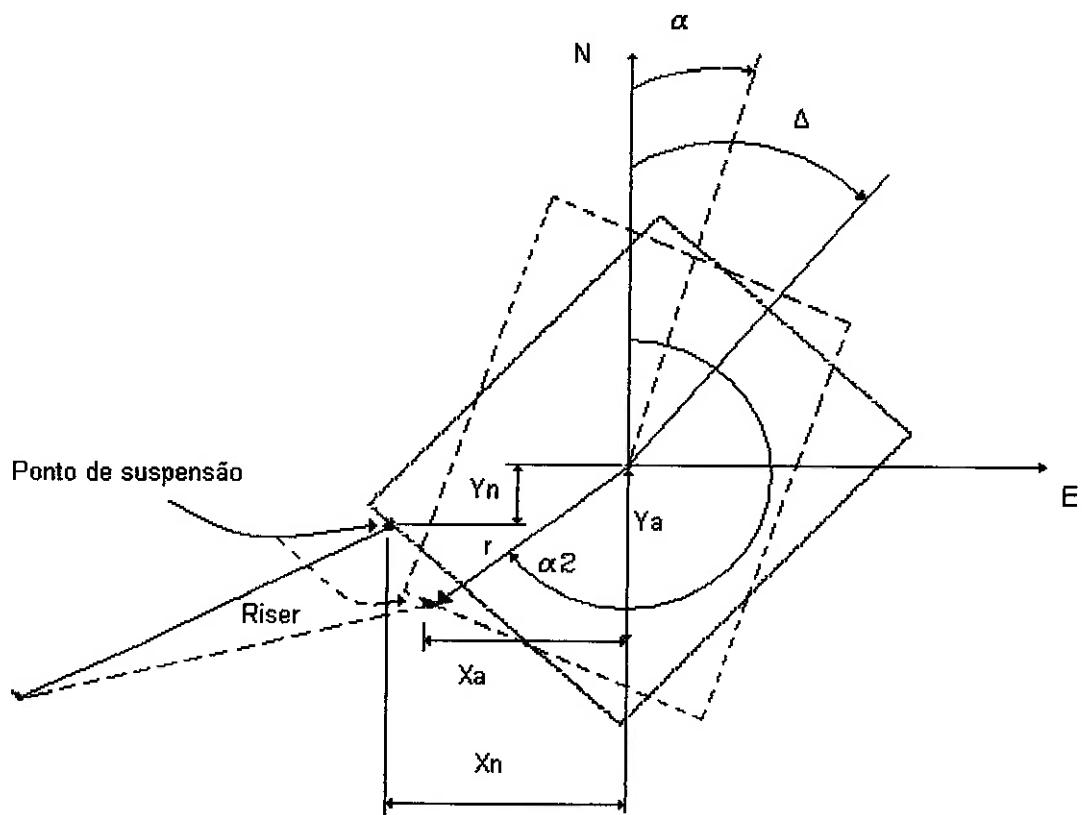


Figura 17 – Esquema da rotação da plataforma devido ao offset

$$x_f = x_N - x_A \quad (137)$$

$$y_f = y_N - y_A \quad (138)$$

$$x_A = rl \cos(\alpha_2 - \alpha) \quad (139)$$

$$y_A = rl \sin(\alpha_2 - \alpha) \quad (140)$$

$$x_N = rl \cos(\alpha_2 - \Delta) \quad (141)$$

$$y_N = rl \sin(\alpha_2 - \Delta) \quad (142)$$

$$rl = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (143)$$

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (144)$$

$$x_f = rl(\cos(\alpha_2 - \Delta) - \cos(\alpha_2 - \alpha)) \quad (145)$$

$$y_f = rl(\sin(\alpha_2 - \Delta) - \sin(\alpha_2 - \alpha)) \quad (146)$$

$$platx\_est = -HP\cos(450^\circ - \beta) + WD\cos 90^\circ - \eta + rl(\cos(\alpha_2 - \Delta) - \cos(\alpha_2 - \alpha)) \quad (147)$$

$$platy\_est = -HP\sin(450^\circ - \beta) + WD\sin 90^\circ - \eta + rl(\sin(\alpha_2 - \Delta) - \sin(\alpha_2 - \alpha)) \quad (148)$$

### 3.2.2.1 Projeção da corrente

Como a maioria dos programas adota a orientação em sentido horário a partir do norte e o nosso algoritmo adota o sentido anti-horário a partir do leste foi necessário encontrar uma relação entre os dois ângulos.

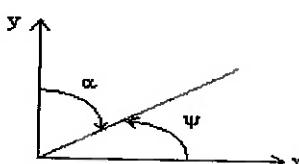


Figura 18 – Convenção da corrente

$$\alpha = 90^\circ - \psi \Rightarrow \psi = 90^\circ - \alpha \quad (149)$$

### 3.2.3 Configuração Dinâmica

Aqui tem-se por objetivo fazer a conversão do movimento descrito pelo RAO em relação a um ponto genérico e no sistema de coordenadas da plataforma para o ponto de suspensão do riser para o sistema do riser.

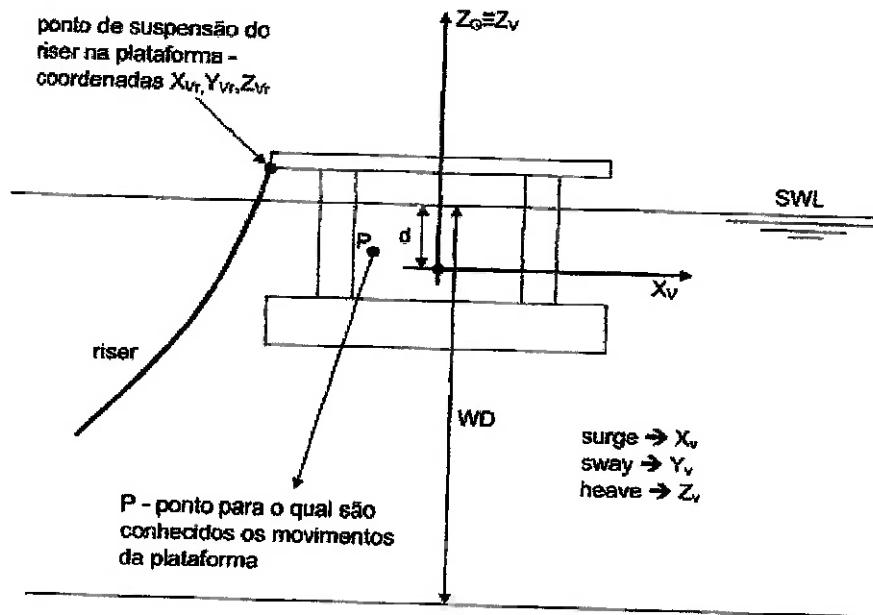


Figura 19 – Esquema da plataforma

A posição inicial do riser é dada por,

$$\overrightarrow{Plat} = \begin{bmatrix} platx\_est \\ platy\_est \\ platz\_est \end{bmatrix}_{sist.\ riser} \quad (150)$$

O vetor que aponta do ponto de suspensão para a origem do RAO,

$$\overrightarrow{SR}_{plat} = \begin{bmatrix} x_R - x_s \\ y_R - y_s \\ z_R - z_s \end{bmatrix}_{sist.\ plat} \quad (151)$$

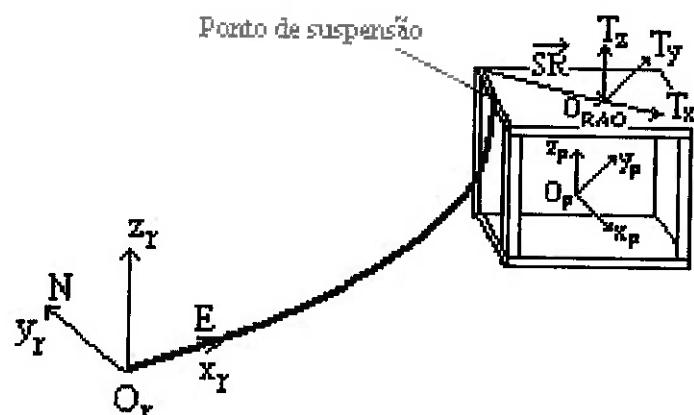


Figura 20 – Esquema explicitando o ponto para o qual o RAO é conhecido

Como já temos a posição antes das rotações queremos apenas a diferença de posição causada por elas. Escrevendo vetorialmente as posições em relação ao ponto de origem do RAO obtém-se,

$$\begin{aligned} -\overrightarrow{SR} + \vec{R}_{RAO} &= M_{RotRAO} \cdot [-\overrightarrow{SR}] \\ \vec{R}_{RAO} &= M_{RotRAO} \cdot [-\overrightarrow{SR}] + \overrightarrow{SR} \\ \vec{R}_{RAO} &= [I - M_{RotRAO}] \cdot \overrightarrow{SR} \end{aligned} \quad (152)$$

O termo  $M_{RotRAO}$  representa a matriz de rotação em torno das três direções que será obtida a seguir através da composição das matrizes de rotação para cada direção.

(i) Matriz de Rotação em torno de x

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (153)$$

(ii) Matriz de Rotação em torno de y

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (154)$$

(iii) Matriz de Rotação em torno de z

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (155)$$

$$R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (156)$$

Uma das hipóteses do RAO é de que a plataforma sofre pequenos deslocamentos angulares:  $\cos\theta_x = \cos\theta_y = \cos\theta_z = 1$  e  $\sin\theta_x = \theta_x$ ,  $\sin\theta_y = \theta_y$ ,  $\sin\theta_z = \theta_z$ .

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \theta_x \\ 0 & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \theta_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & 0 \\ -\theta_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \theta_x \\ 0 & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \theta_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & 0 \\ -\theta_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_y \\ -\theta_x \theta_y & 1 & \theta_z \\ -\theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & 0 \\ -\theta_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
M_{RotRAO} &= \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z - \theta_x \theta_y & 1 + \theta_x \theta_y \theta_z & -\theta_x \\ -\theta_y + \theta_x \theta_z & \theta_x - \theta_y \theta_z & 1 \end{bmatrix} \quad (157)
\end{aligned}$$

Como estamos lidando com pequenos deslocamentos pode-se desprezar os deslocamentos de segunda ordem,

$$[I - M_{RotRAO}] = \begin{bmatrix} 0 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 0 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 0 \end{bmatrix} \quad (158)$$

### 3.2.3.1 Movimento da Plataforma

Como o RAO também impõe deslocamento de translação é necessário somar esta contribuição à rotação para obter-se o deslocamento total da plataforma.

$$\vec{R}_{RAO} + \vec{T}_{RAO} = \overrightarrow{Mp}_{SistPlat} \quad (159)$$

Passando para o sistema de coordenadas do riser,

$$R_z(-\Delta) = \begin{bmatrix} \cos(-\Delta) & \sin(-\Delta) & 0 \\ -\sin(-\Delta) & \cos(-\Delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (160)$$

$$\overrightarrow{Mp}_{riser} = R_z \cdot \overrightarrow{Mp}_{SistPlat} \quad (161)$$

$$\overrightarrow{Plat}_{din} = \overrightarrow{Plat}_{est} + \overrightarrow{Mp}_{riser} \quad (162)$$

### 3.2.3.2 Algoritmo

$$\begin{aligned}
 \text{(i) Achar } \overrightarrow{SR} &= \begin{bmatrix} x_{RAO} - x_{vr} \\ y_{RAO} - y_{vr} \\ z_{RAO} - z_{vr} \end{bmatrix} \\
 \text{(ii) Achar } \vec{R}_{RAO} &= [I - M_{RotRAO}] \cdot \overrightarrow{SR} \Rightarrow \vec{R}_{RAO} = \begin{bmatrix} \theta_z SR_y - \theta_y SR_z \\ -\theta_z SR_x + \theta_x SR_z \\ \theta_y SR_x - \theta_x SR_y \end{bmatrix}, \vec{T}_{RAO} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \\
 \text{(iii) } \overrightarrow{Mp}_{SistPlat} &= \vec{R}_{RAO} + \vec{T}_{RAO} \Rightarrow \overrightarrow{Mp}_{SistPlat} = \begin{bmatrix} \theta_z SR_y - \theta_y SR_z + T_x \\ -\theta_z SR_x + \theta_x SR_z + T_y \\ \theta_y SR_x - \theta_x SR_y + T_z \end{bmatrix} \\
 \text{(iv) } \overrightarrow{Mp}_{riser} &= R_z \cdot \overrightarrow{Mp}_{SistPlat} \Rightarrow \begin{bmatrix} \cos(-\Delta) & \operatorname{sen}(-\Delta) & 0 \\ -\operatorname{sen}(-\Delta) & \cos(-\Delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \overrightarrow{Mp}_{SistPlat} \\
 \overrightarrow{Mp}_{riser} &= \begin{bmatrix} \cos(-\Delta) & \operatorname{sen}(-\Delta) & 0 \\ -\operatorname{sen}(-\Delta) & \cos(-\Delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_z SR_y - \theta_y SR_z + T_x \\ -\theta_z SR_x + \theta_x SR_z + T_y \\ \theta_y SR_x - \theta_x SR_y + T_z \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} (\theta_z SR_y - \theta_y SR_z + T_x) \cos(-\Delta) + (-\theta_z SR_x + \theta_x SR_z + T_y) \operatorname{sen}(-\Delta) \\ -(\theta_z SR_y - \theta_y SR_z + T_x) \operatorname{sen}(-\Delta) + (-\theta_z SR_x + \theta_x SR_z + T_y) \cos(-\Delta) \\ \theta_y SR_x - \theta_x SR_y + T_z \end{bmatrix} \quad (163)
 \end{aligned}$$

### 3.2.3.3 Conversão da direção da onda para o Heading do RAO

Devido à rotação da plataforma causada pela incidência de corrente, as direções de apropamento (heading) e a da onda não são iguais por isso é necessário relacioná-las.

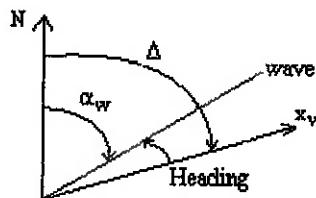


Figura 21 – Cálculo do Heading

$$\begin{aligned}
 \alpha_w + \text{Heading} &= \Delta \\
 \text{Heading} &= -\Delta + \alpha_w \quad (164)
 \end{aligned}$$

## 4. INTERFACE DE DADOS

A interface, assim como todo o software foi desenvolvido em linguagem C++, se aproveitando de sua grande flexibilidade e especialmente do uso de objetos para produzir um software modular. Dentro desta filosofia de programação, para cada diálogo de entrada de dados foi criada uma classe específica que encerra todos os métodos necessários a seu funcionamento.

Em seguida serão apresentados os diálogos desenvolvidos, com uma breve explicação de suas funções.

### 4.1 Tela Principal

Esta é a tela principal do programa, onde destaca-se o menu *Data*, onde pode-se observar as opções existentes, que permitem a entrada dos diversos dados necessários à simulação.

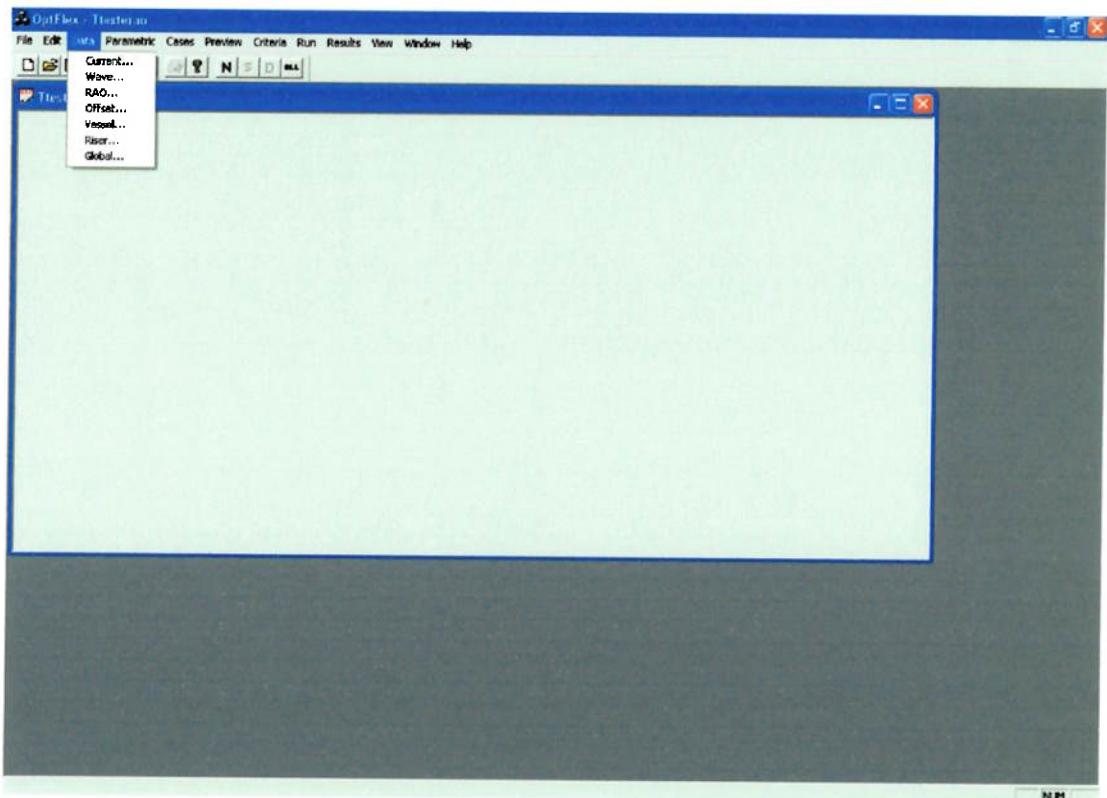


Figura 22 – Tela principal do programa

#### 4.2 Diálogo de entrada de dados de corrente

Permite a edição de perfis de corrente, onde o usuário fornece para cada profundidade os valores de velocidade e ângulo da corrente (No canto inferior direito está desenhada a convenção adotada).

Há também um fator multiplicador de velocidade, utilizado para facilitar uma mudança de velocidade (o usuário não precisa mudar cada ponto do perfil, apenas o fator).

O usuário pode ainda batizar a corrente e fazer comentários para futura referência. Esta possibilidade foi incluída em vários menus para tornar possível que grandes volumes de dados possam ser mantidos organizados.

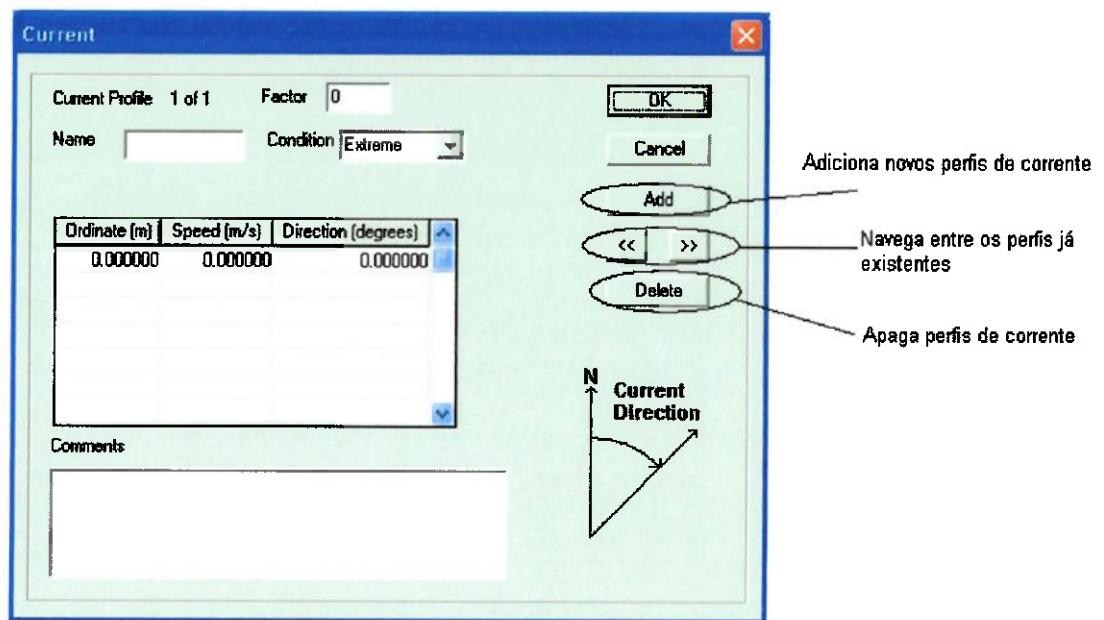


Figura 23 – Caixa de diálogo para entrada de dados de corrente

#### 4.3 Diálogo para entrada de dados de onda

Permite a edição dos parâmetros de um espectro de onda, que pode ser do tipo JonSwap, uma onda irregular definida por 3 variáveis: Altura Significativa (Hsig), Período Tp e o fator Gama que define a forma de distribuição da onda ou Regular, definida pela sua altura (Hmax) e pelo período (Thmax). O usuário deve também especificar o ângulo de incidência da onda, de acordo com a referência desenhada no próprio diálogo. Novamente existem os campos para nome e comentários, já explicados no item anterior.

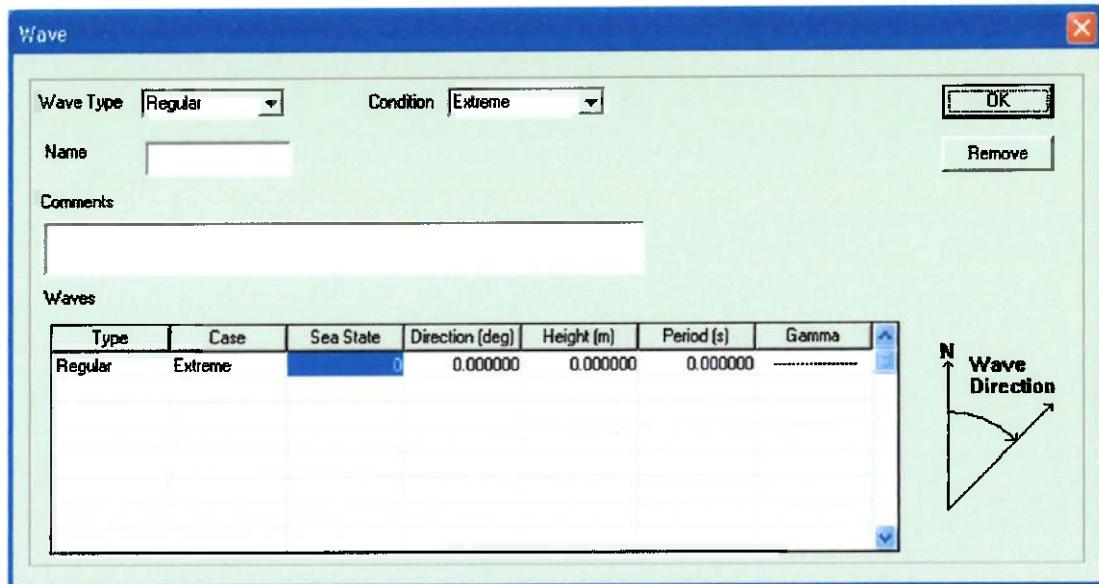


Figura 24 – Caixa de diálogo para entrada de dados de onda regular

#### 4.4 Diálogo para entrada de dados de RAO

Para definir o RAO deve-se fornecer os dados de apropamento, freqüência, período, e de amplitude e fase nos seis graus de liberdade de uma plataforma/navio que determinarão respectivamente os movimentos de surge, sway, heave, roll, pitch e yaw. É necessário também informar o ponto de origem do RAO.

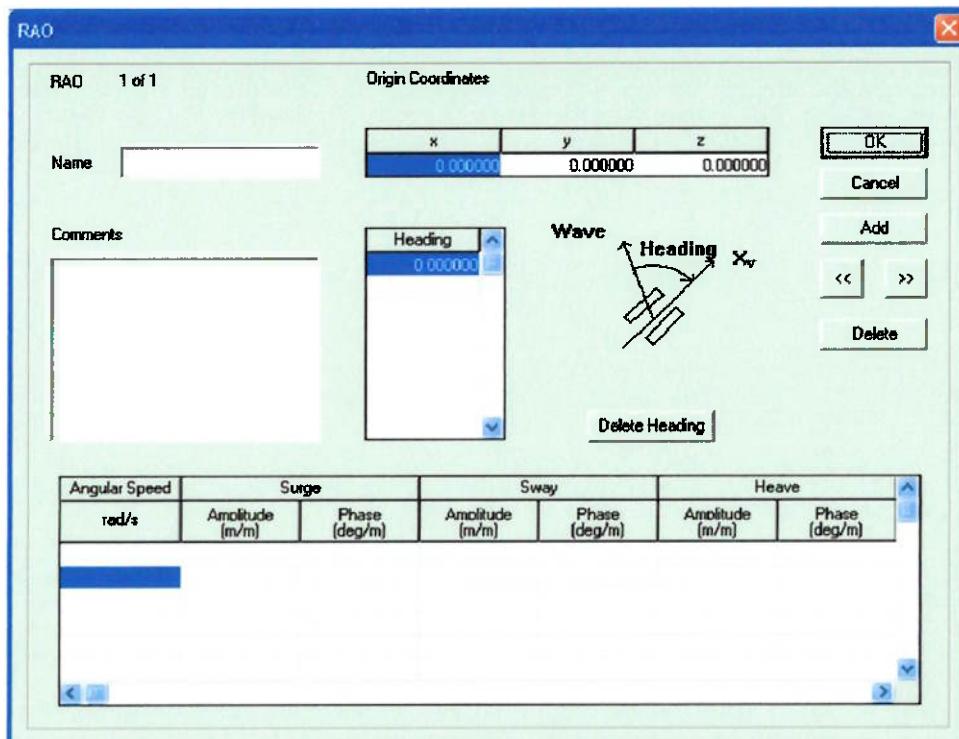


Figura 25 – Caixa de diálogo para entrada de dados de RAO

Utilizando-se o botão de *Add* é possível adicionar mais perfis de RAO, sendo que quando deseja-se apagar determinado conjunto de dados basta pressionar o botão *Delete*, os botões marcados por << e >> permitem que se percorram, respectivamente para a esquerda e para a direita, todos os perfis já inseridos em determinado arquivo. As alterações só serão gravadas quando o botão *OK* for selecionado.

#### 4.5 Diálogo para entrada de dados de deslocamento da plataforma

Permite a edição do deslocamento que se deseja impor à plataforma, sendo que os parâmetros necessários são: porcentagem de lâmina d'água , ângulo de deslocamento (que irá definir a direção do movimento) e o ângulo final assumido pela plataforma.

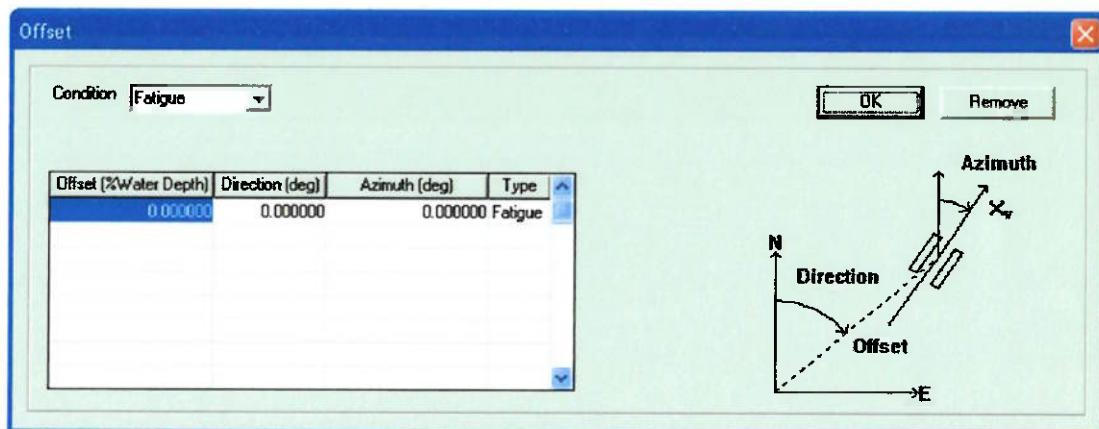


Figura 26 – Caixa de diálogo para entrada de dados de deslocamento da plataforma

#### 4.6 Diálogo para entrada de dados da plataforma

Neste diálogo são editados dados importantes relativos à plataforma, como sua orientação inicial e a posição da origem do seu sistema de coordenadas.

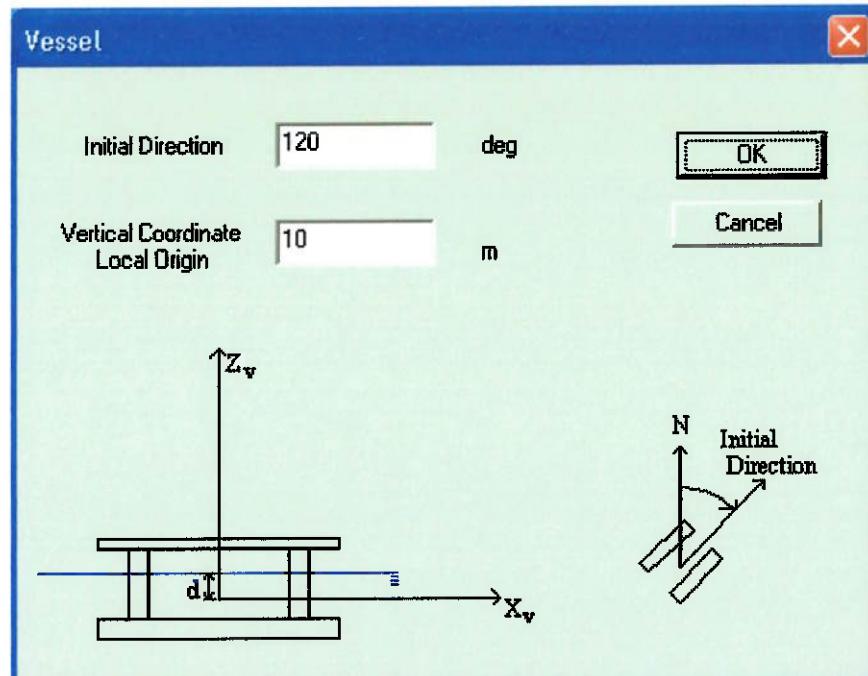


Figura 27 – Caixa de diálogo para entrada de dados de deslocamento da plataforma

#### 4.7 Diálogo para definição das propriedades do Riser

Este diálogo é utilizado para a definir em cada segmento as propriedades geométricas, hidrodinâmicas e físicas, tais como: diâmetro externo, espessura, diâmetro hidrodinâmico, módulo de elasticidade, peso no ar e de água. Também as características dos flutuadores são fornecidas aqui.

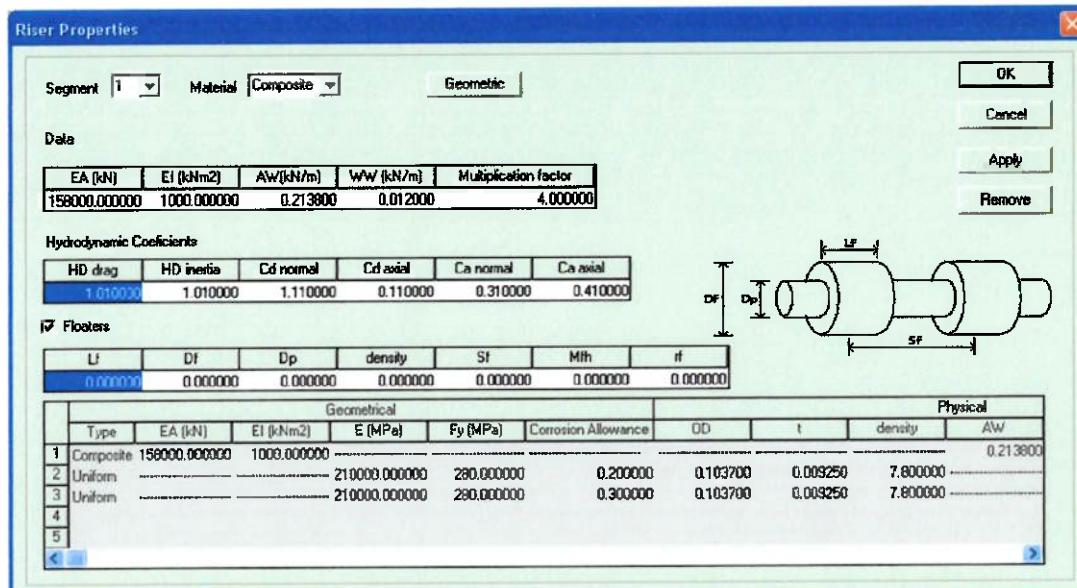


Figura 28 – Caixa de diálogo para definição de propriedades

O botão Geometric conduz a outro diálogo, mostrado a seguir, onde são fornecidas características geométricas do riser, como o seu ponto de suspensão na plataforma, sua projeção horizontal e o ângulo em que ela ocorre.

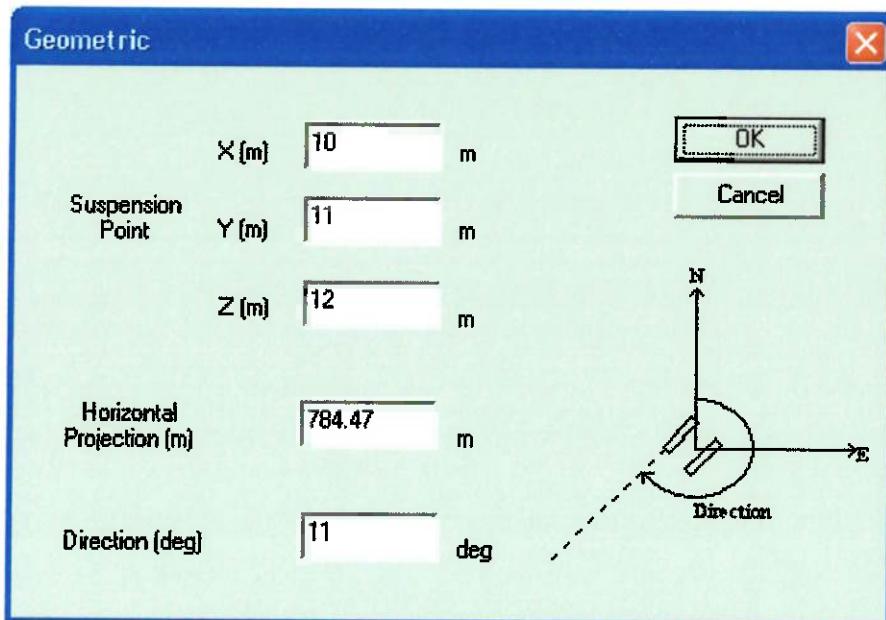


Figura 29 – Caixa de diálogo para definição da geometria

#### 4.8 Diálogo para entrada de dados de dados globais

Utilizada para a definição dos dados globais do problema tais como: profundidade, aceleração da gravidade e densidade da água.

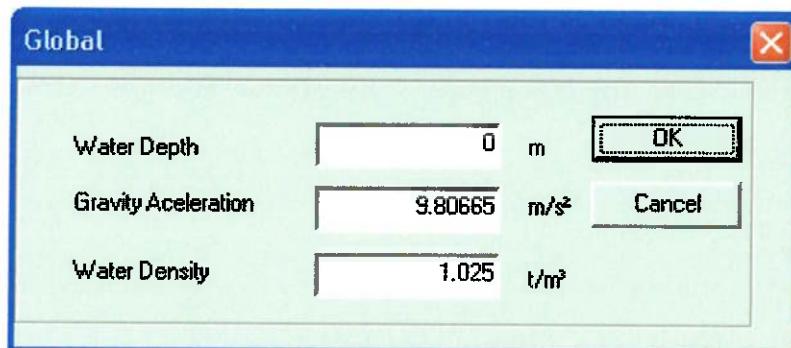


Figura 30 – Caixa de diálogo para entrada de dados globais

#### 4.10 Diálogo para definição das variações paramétricas

É utilizada para entrada de dados de comprimento inicial, final, e número de divisões de cada segmento. Este menu define o número de casos neutros que serão simulados.

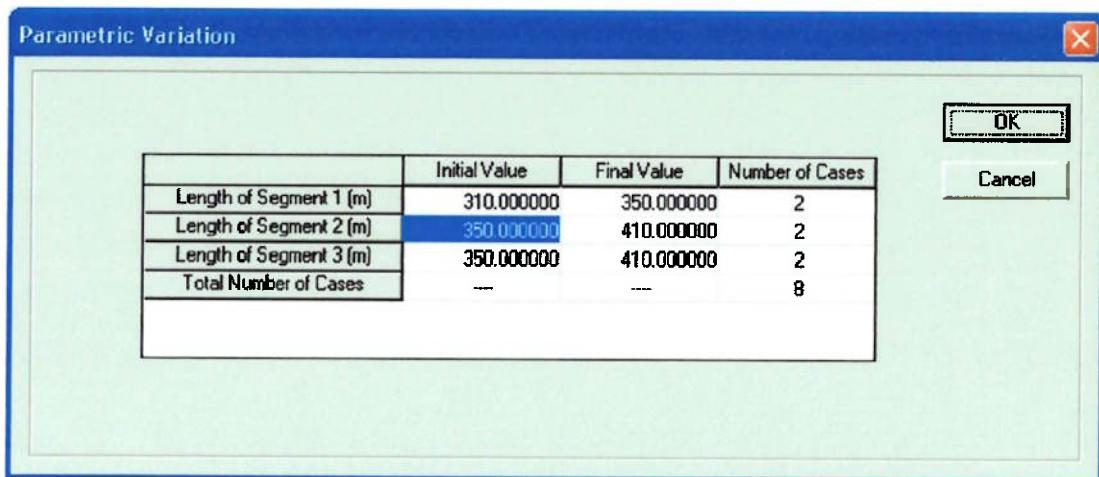


Figura 31 – Caixa de diálogo para definição das variações paramétricas

#### 4.11 Diálogo para definição dos casos de carga estática

Um caso de carga estática é a combinação de uma corrente com o vessel offset provocado por ela. Os casos definidos neste diálogo serão utilizados como condições de carregamento sob as quais os cabos serão avaliados quanto aos critérios desejados.

Para definir um caso, deve escolher uma corrente, por meio de uma Combo Box (figura 32). Em seguida esta corrente será mostrada na tabela logo abaixo. Deve-se então selecionar um Vessel Offset na Combo Box inferior. Para adicionar este caso à lista utiliza-se o botão Add. Se quiser remover um caso, ele deve ser selecionado na tabela da direita e o botão Remove apertado. O botão Ok grava as informações e sai do diálogo.

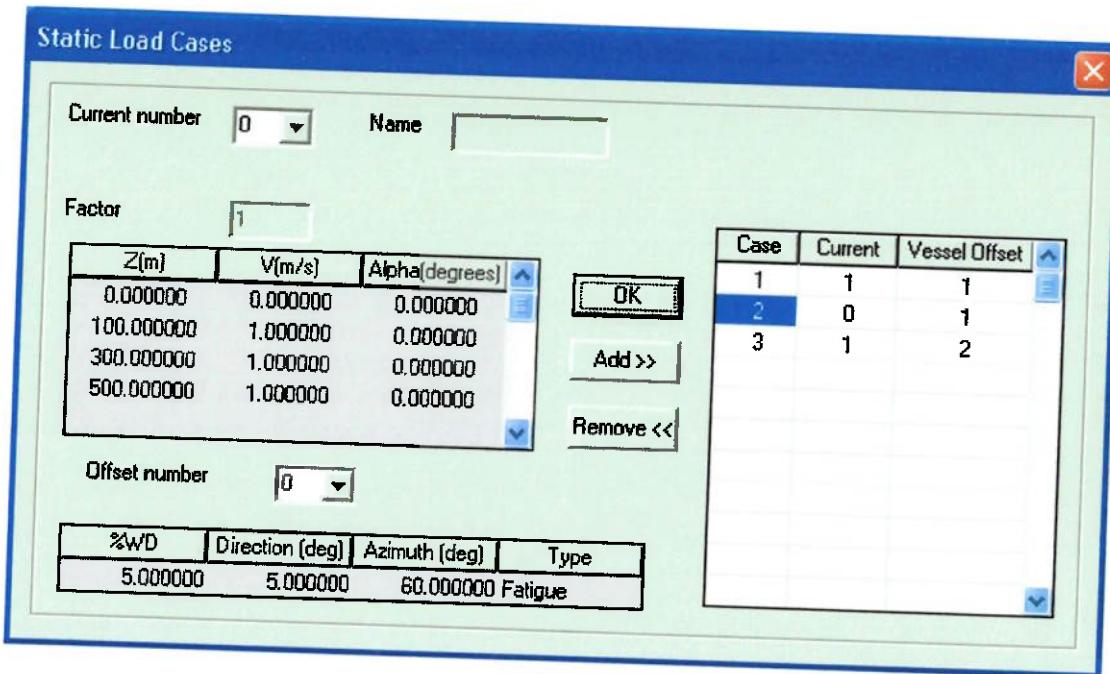


Figura 32 – Caixa de diálogo para definição dos casos de carga estática

#### 4.12 Diálogo para definição dos critérios de aceitação

Este diálogo permite que se estabeleçam valores mínimos e máximos para certos parâmetros de simulação. Estes valores serão, após cada passo de simulação, confrontados com os resultados de cada caso e só serão aprovados os casos em que todos os parâmetros se encontrarem dentro da valores estabelecidos.

Para definir o limite, primeiro o parâmetro desejado deve ser escolhido na Combo Box da esquerda. Em seguida deve-se escolher o critério (entre nenhum, máximo, mínimo ou ambos. Dependendo do critério escolhido, as caixas Upper Limit e Lower Limit poderão ser ativadas ou desativadas, devendo-se então preencher a caixa correta e pressionar o botão Apply. A tabela será então preenchida automaticamente.

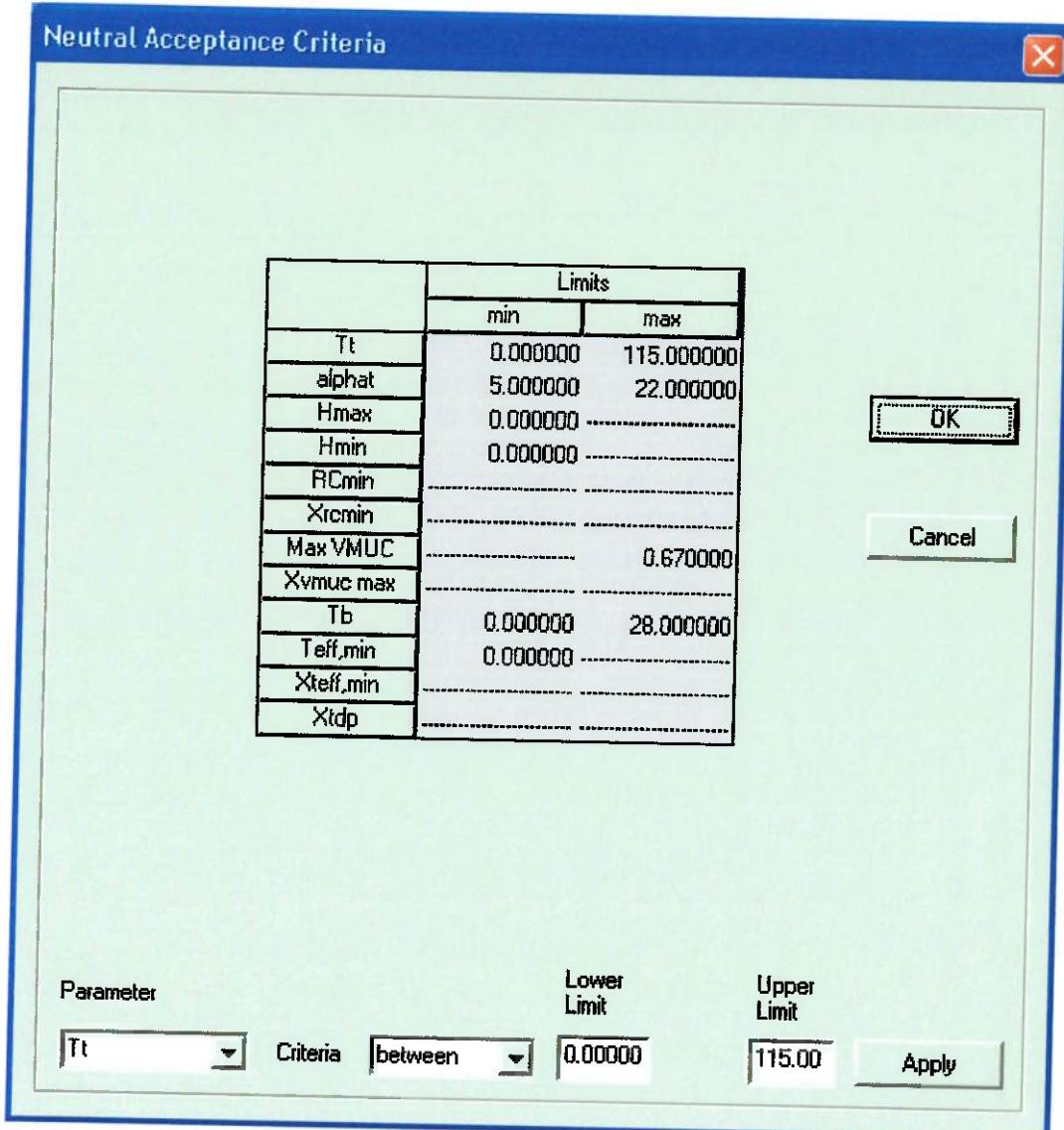


Figura 33 – Caixa de diálogo para definição dos casos do critérios de aceitação

#### 4.13 Diálogo para definição dos casos de carga dinâmica

Este diálogo funciona de maneira semelhante ao diálogo de definição de casos de carga estática. A maior diferença vem do fato de que o caso de carga dinâmica tem uma ou duas ondas, além do offset e da corrente.

Estas ondas podem ser definidas neste diálogo através de um tipo ( Regular ou Jonswap) e de um número. Há também um CheckBox, que permite habilitar ou desabilitar a segunda onda. Assim como no outro diálogo anterior, o caso é inserido pelo botão Add e removido pelo Remove.

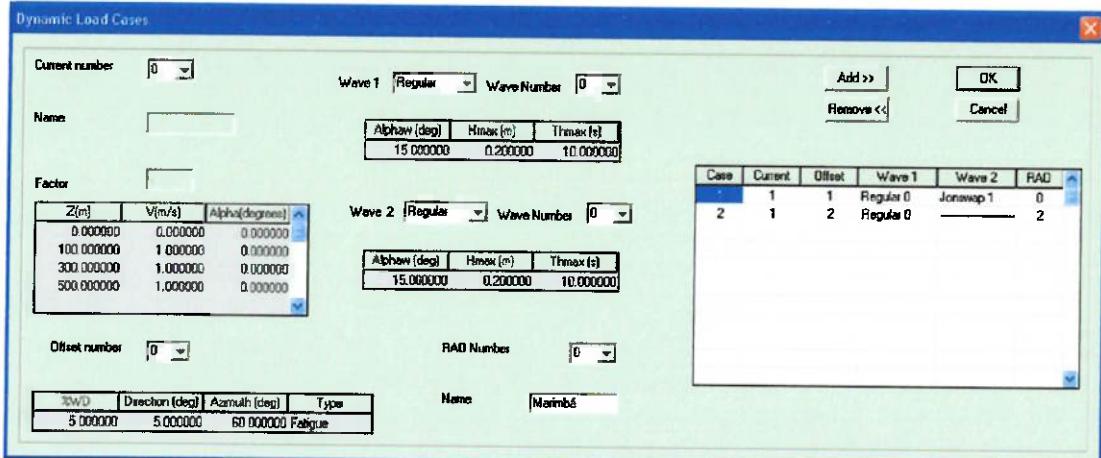


Figura 34 – Caixa de diálogo para definição dos casos de carga dinâmica

#### 4.12 Entrada e saída dos dados relevantes ao problema via arquivos .txt

Esta opção de entrada é necessária para permitir a entrada de grandes quantidades de dados, muitas vezes provenientes de outros programas de análise, de uma maneira mais rápida que a interface gráfica pois basta o usuário copiar e colar os dados em um arquivo texto e o interpretador cuida de ordenar estes dados na tabela.

O arquivo de entrada de dados pode ser escrito em qualquer ordem e leva palavras-chave que definem o significado dos dados que vêm a seguir. Após a palavra-chave, abre-se uma chave e colocam-se os dados. Quando os dados referentes àquela seção terminarem, deve-se fechar a chave. Ao ler o arquivo de entrada, o software checa erros de sintaxe, tais como falta de abertura ou fechamento de chaves, palavras-chave erradas ou faltando e se o número correto de parâmetros foi utilizado. Caso encontre algum erro avisa o usuário onde o erro foi encontrado.

Os dados em cada linha devem ser separados por tabulações.

Estas palavras-chave não precisam estar nesta ordem e são :

##### CURRENT

Quando se deseja incluir os dados de corrente, estes devem ser colocados na seguinte ordem :

Profundidade, velocidade e direção

Para cada profundidade deve ser usada uma linha diferente, para manter a ordem do arquivo

Caso exista mais de uma corrente a ser definida, deve-se repetir o procedimento usando a mesma palavra-chave

## **JONSWAP**

Para Inclusão dos dados de uma onda irregular do tipo JONSWAP. Os dados devem ser colocados na seguinte ordem:

Altura significativa, Período e Fator gama

## **WAVEREG**

Inclui uma onda regular. Os dados devem ser colocados na seguinte ordem:

Altura máxima e período

## **VESSELOFFSET**

Define o offset da plataforma, na seguinte ordem:

Porcentagem de lâmina d'água e ângulo de offset

## **RAO**

Define o RAO, na seguinte ordem:

W, período, amplitude e fase de surge, amplitude e fase de sway, amplitude e fase de heave, amplitude e fase de roll, amplitude e fase de pitch, amplitude e fase de yaw.

Para cada w deve ser usada uma linha diferente, para manter a ordem do arquivo

Caso exista mais de um RAO a ser definido, deve-se repetir o procedimento usando a mesma palavra-chave

## **GENERAL**

Dados gerais, deve seguir a ordem:

Air gap, Water Depth, Horizontal Projection, SGcontents, top pressure, sendo cada dado colocado em uma linha

## **PROPERTIES**

Propriedades dos segmentos de que o cabo é composto, em ordem decrescente.

Segue a ordem:

Número do segmento, Outer Diameter , t , Hydrodynamic Diameter, Elastic Modulus , Fv, Air Weight, Water Weight

## **LIMITS**

Define os limites superior e inferior de determinadas variáveis. Em cada linha deve ser colocado primeiro o limite inferior e depois o superior, na seguinte ordem:

Tt, alphat, Hmax, Hmin, Raio de curvatura min, Xrcmin, Max VMUC, Xmaxvmuc, Tb, Teffmin, Xteffmin, Xtdp, Comprimento do segmento 5, Comprimento do segmento 4, Comprimento do segmento 3, Comprimento do segmento 2, Comprimento do segmento 1, Water weight do segmento 4, Water weight do segmento 2 e SGcontents.

Caso algum destes limites não exista, no lugar de seu valor deve ser colocada a palavra NULL.

Abaixo apresenta-se um exemplo de como este arquivo de entrada deve ser digitado para que o programa o entenda de maneira correta. Note que neste exemplo definem-se duas correntes diferentes, assim como dois RAOs. Também não há valores de vários limites, que são então substituídos pela palavra NULL.

#### LIMITS

```
{
Tt 0 115
alphat 5 22
Hmax 0 NULL
Hmin 0 NULL
RCmin NULL NULL
Xrcmin NULL NULL
MaxVMUC NULL 0.67
Xvmucmax NULL NULL
Tb 0 28
Teffmin 0 NULL
Xteffmin NULL NULL
Xtdp 0 NULL
SGcontents 0 0.1
}
```

#### WAVE

```
{
0 45 3 5 1 2
1 30 1 7 0.5 0 3
0 75 0.3 12 0 1
}
```

#### CURRENT

```
{
1
0
0 0 0
100 0.1 0
300 0.1 0
500 0.1 0
}
```

#### VESSELOFFSET

```

{
  5      5      45
  3      10     60
  5      3      10
}

CURRENT
{
  0.3
  1
  0      0.8    0
  200    0.6    15
  350    1.2    37
}

RAO
{
  10 20 30
  Head 30
  3      1      10    2      20    3      30    4      40    5      50    6
  60
  4      1      11    2      21    3      31    4      41    5      51    6
  61
  2      1      12    2      22    3      32    4      42    5      52    6
  62
  Head 60
  5      2      101   21     201   31     301   41     401   51     501   61
  601
  6      3      111   21     211   31     311   41     411   51     511   61
  611
  1      4      121   21     221   31     321   41     421   51     521   61
  621
}

RAO
{
  12 22 32
  Head 90
  31     1      10    2      20    3      30    4      40    5      50    6
  60
  41     1      11    2      21    3      31    4      41    5      51    6
  61
  21     1      12    2      22    3      32    4      42    5      52    6
  62
  Head 120
  51     2      101   21     201   31     301   41     401   51     501   61
  601
  61     3      111   21     211   31     311   41     411   51     511   61
  611
  11     4      121   21     221   31     321   41     421   51     521   61
  621
}

```

```

}

GENERAL
{
airgap 8.9
WD 500
HP 770
SGcontents 10
toppressure 50
Gravity 9.80665
Waterdensity 1.025
}

PROPERTIES
{
3 0 0.1037 0.00925 7.8 2 210000 280 10 3
0.3 1.0 1.0 1.1 0.1 0.3 0.4 1 3 31 13
0.1 2 0.2 20 10 9 8 1
2 0 0.1037 0.00925 7.8 3 210000 280 20 2
0.2 1.02 1.02 1.12 0.12 0.32 0.42 0 11 10 9
0
1 1 0.1037 0.00925 4 0.2138 0.012 158000 1000
1000 1.01 1.01 1.11 0.11 0.31 0.41 0 10 8 6
0
}

PARAMETRIC
{
L5 300 400 0
L4 300 450 0
L3 350 410 1
L2 350 410 0
L1 310 350 0
WW4 0.2138 0.2138 1
WW2 0.2138 0.2138 0
SGcontents 0 10 0
}

STATICLOADCASE
{
1 1
0 1
1 2
}

DYNAMICLOADCASE
{
1 1 1 0 1 0 1
1 2 1 0 0
}

LAYERS
{
1 0 8 10 210000 0.3
}

```

```

1   1   4   6   210000   0.3   1   10   100   4   10
     101  120  130
2   0   2   4   210000   0.4
2   0   1   2   210000   0.2
3   1   10  11   210000   0.1   2   20   50   3   15
     110  120  130
}
GEORISER
{
SuspensionPointX 10
SuspensionPointY 11
SuspensionPointZ 12
HorizontalProjection 784.47
Direction 11
}
VESSEL
{
InitialDirection 120
VCLO 10
}

```

Seguindo-se a mesma lógica apresentada para a entrada dos dados via arquivo .txt é possível que o usuário obtenha um arquivo neste mesmo formato em que são listados o valor de todos estes parâmetros de entrada. Abaixo apresentamos um exemplo de arquivo .txt obtido com o uso do programa.

```

LIMITS
{
Tt   -0.156789   -0.156789
alphat -0.156789   -0.156789
Hmax -0.156789   -0.156789
Hmin -0.156789   -0.156789
RCmin -0.156789   -0.156789
Xrcmin   -0.156789   -0.156789
MaxVMUC -0.156789   -0.156789
Xvmucmax -0.156789   -0.156789
Tb   -0.156789   -0.156789
Teffmin   -0.156789   -0.156789
Xteffmin   -0.156789   -0.156789
Xtdp   -0.156789   -0.156789
SGcontents -0.156789   -0.156789
}
PROPERTIES
{
1   0   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000
     0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000
     0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000
     0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0
}
```

```
}

PARAMETRIC
{
L5 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
L4 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
L3 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
L2 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
L1 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
WW4 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
WW2 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
SGcontents 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
total 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
}
GENERAL
{
airgap 0.000000
WD 0.000000
HP 0.000000
SGcontents 0.000000
toppressure 0.000000
Gravity 9.806650
Waterdensity 1.025000
}
GEORISER
{
SuspensionPointX 0.000000
SuspensionPointY 0.000000
SuspensionPointZ 0.000000
HorizontalProjection 0.000000
Direction 0.000000
}
VESSEL
{
InitialDirection 0.000000
VCLO 0.000000
}
```

## 5. Escolha dos parâmetros que definem a configuração a ser utilizada

Após uma análise dos pontos mais críticos no dimensionamento e seleção de risers, chegou-se ao seguinte conjunto de critérios de seleção :

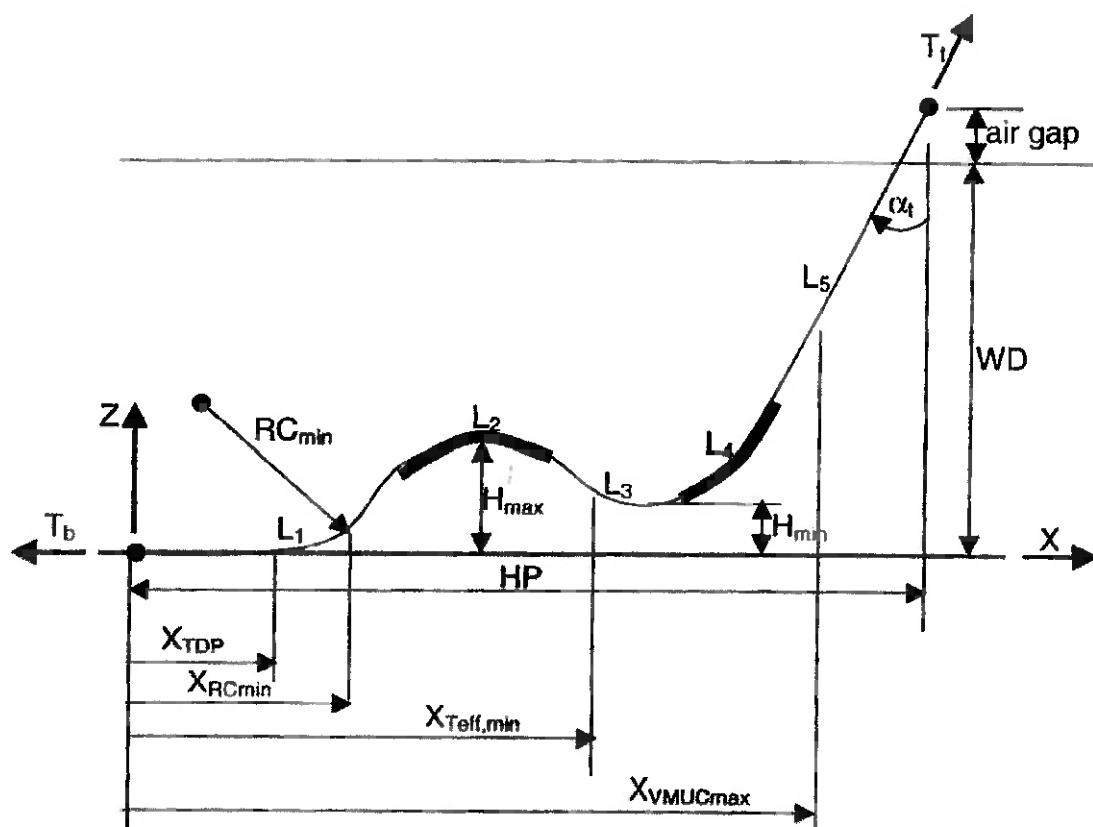


Figura 35 – Esquema mostrando um cabo com cinco segmentos sujeito a uma configuração do tipo lazy-wave, mostrando os principais parâmetros do problema

- $T_t$  : tração no topo

Critério muito importante pois o topo é o ponto onde o riser sofre maior tração, e portanto corre maior risco de falha por fadiga.

- $\alpha_t$ : ângulo do cabo no topo

Devido a limitações técnicas impostas pelos conectores ligados ao riser, o ângulo de topo deve estar restrito a uma certa faixa, para a qual o componente foi projetado.

- $H_{\max}$  e  $H_{\min}$  : restrições relativas a profundidade de cada trecho

Pode-se querer limitar estas variáveis por motivos de manutenção, que fica mais complicada ou até impossível com o aumento da profundidade.

- $RC_{min}$  : mínimo raio de curvatura
- $X_{RC_{min}}$  : posição onde ocorre o raio de curvatura mínimo

Por motivos construtivos, um riser tem um raio mínimo de curvatura adequado à sua utilização, usualmente especificado pelo fabricante. Por isto este parâmetro foi incluído visando o cumprimento desta restrição.

Também foi incluída a possibilidade de controlar a posição onde ocorre este mínimo valor, pois é um provável ponto de fadiga e pode precisar de manutenção.

- $T_b$  : Tração incidente sobre a âncora

Como todo equipamento mecânico, a âncora também tem uma capacidade que não deve ser excedida. Este parâmetro permite limitar a tração incidente sobre a bóia, respeitando assim o limite desta.

- $T_{eff_{min}}$  : Tração efetiva mínima
- $X_{eff_{min}}$  : Posição do ponto onde a tração efetiva é mínima

Um cabo deve sempre trabalhar sobre tração, por isso justifica-se esta restrição, já que a existência de uma tração muito pequena pode levar a um caso de compressão se houver algum distúrbio.

- $X_{tdp}$  : posição do TDP

O TDP (touch-down point) é o ponto onde o cabo toca o chão pela primeira vez.

A seguir está representado o diálogo que permite a definição da faixa de valores desejada para cada um dos parâmetro escolhidos.

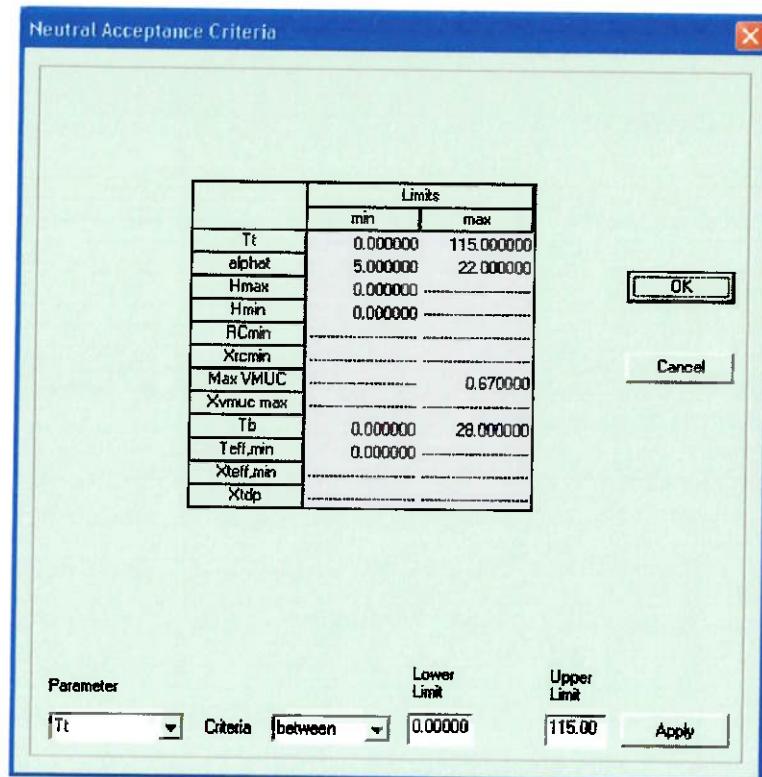


Figura 36 – Diálogo que permite a definição dos critérios de aceitação para a configuração neutra

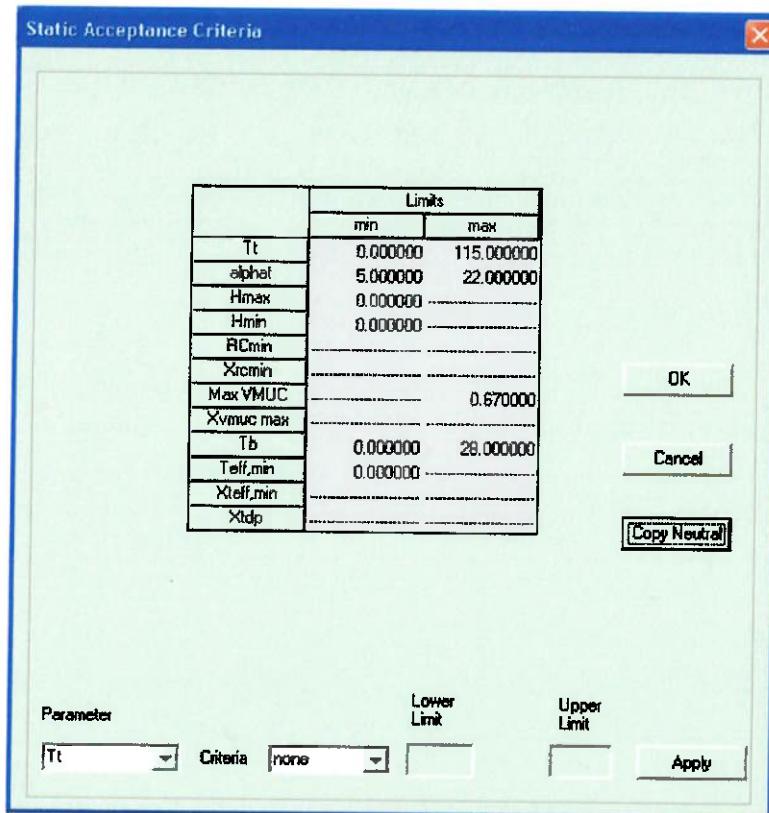


Figura 37 – Diálogo que permite a definição dos critérios de aceitação para a configuração estática

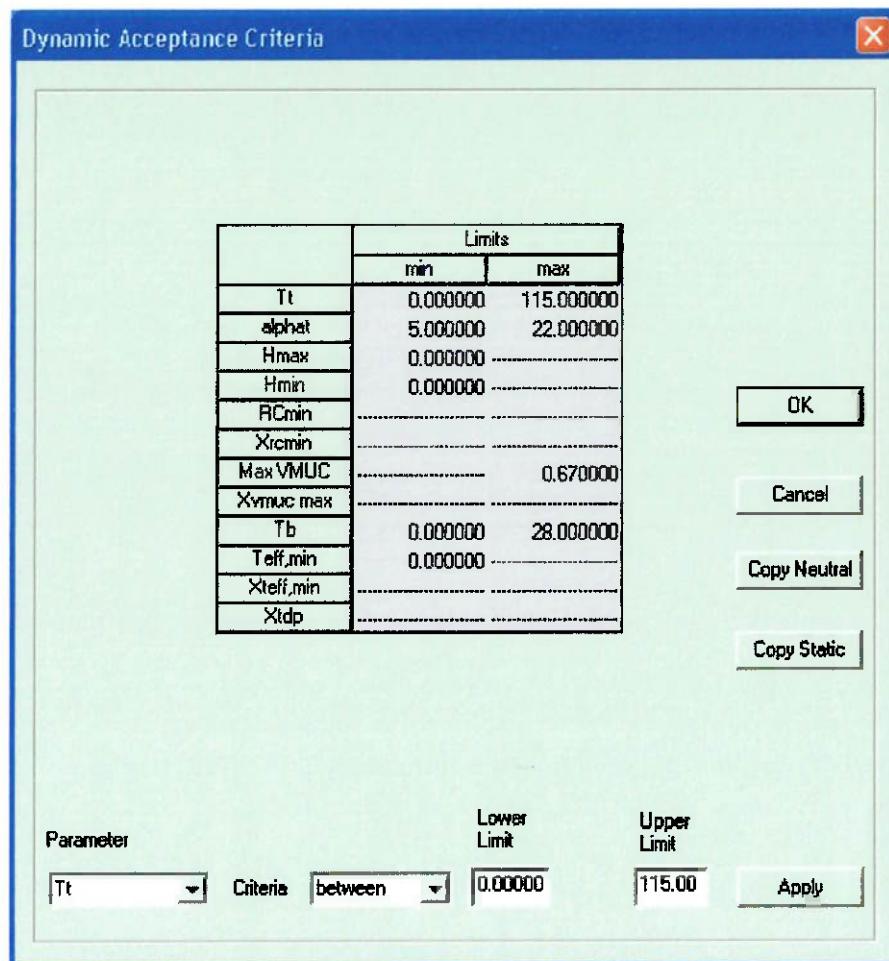


Figura 38 – Diálogo que permite a definição dos critérios de aceitação para a configuração dinâmica

## 6. Desenho e implantação do algoritmo de escolha da melhor configuração

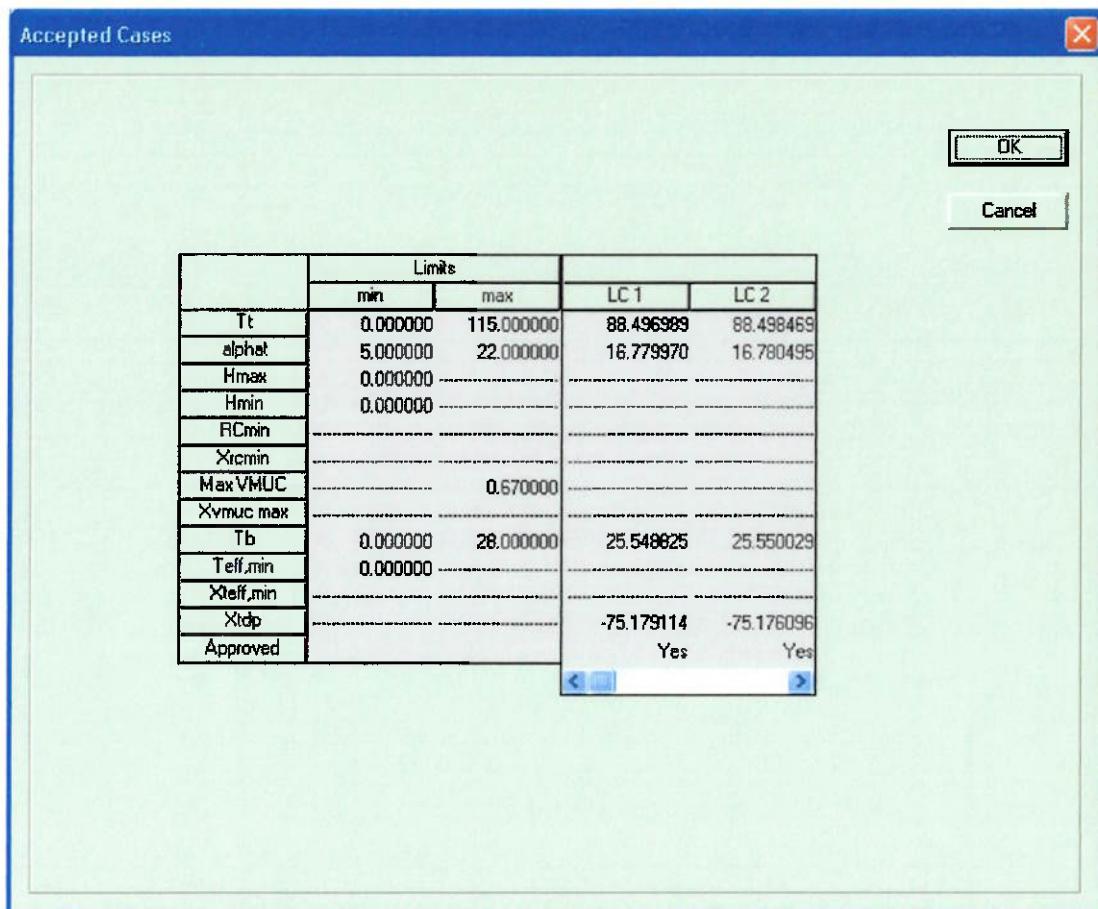


Figura 39 – Diálogo que mostra se os casos satisfizeram os critérios após a análise neutra

Os valores dos critérios de aceitação fornecidos pelo usuário estão à esquerda e os resultados para cada caso de carregamento estão nas colunas da direita, de modo que a última linha da tabela indica se o caso satisfez ou não os critérios. No diálogo apresentado na figura 38 os dois primeiros casos de carregamento foram aprovados (não ultrapassaram os limites impostos pelo usuário).

Os casos reprovados nesta etapa não são submetidos à análise estática.

Accepted Static Cases			
	Limits		
	min	max	
Tt	0.000000	115.000000	88.496389 88.498469
alphat	5.000000	22.000000	16.779370 16.780495
Hmax	0.000000		
Hmin	0.000000		
RCmin			
Xicmin			
Max VMUC		0.670000	
Xvmuc max			
Tb	0.000000	28.000000	25.548825 25.550029
Teff,min	0.000000		
Xteff,min			
Xtdp			-75.179114 -75.176096
Approved			Yes Yes

Figura 40 – Diálogo que mostra se os casos satisfizeram os critérios após a análise estática

Analogamente ao diálogo de casos neutros os valores dos critérios de aceitação estão à esquerda e os resultados para cada caso estão nas colunas da direita, de modo que a última linha da tabela indica se o caso satisfez ou não os critérios. No diálogo apresentado na figura acima os dois primeiros casos de carregamento foram aprovados (ambos mantiveram-se dentro dos limites estipulados).

Os casos reprovados nesta etapa não são submetidos à análise dinâmica.

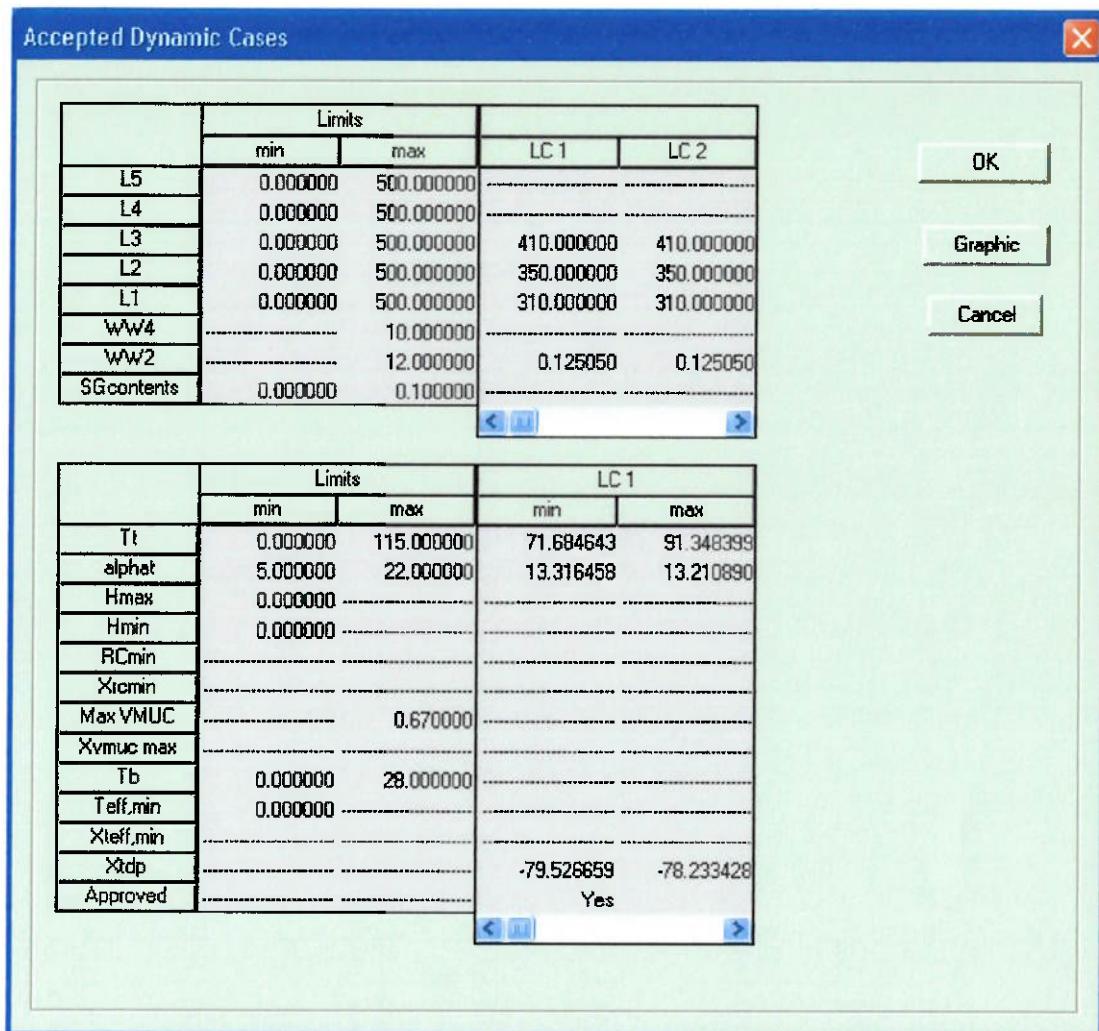


Figura 41 – Diálogo que mostra se os casos satisfizeram os critérios após a análise dinâmica

A tabela superior apresenta os critérios fornecidos pelo usuário referentes à geometria do cabo (à esquerda) e os valores destes para cada caso de carregamento dinâmico (à direita). A tabela inferior apresenta à esquerda os valores limites fornecidos pelo usuário e à direita os valores máximos e mínimos resultantes da análise dinâmica do cabo, sendo que a última linha indica se o caso foi aprovado (satisfaz todos os critérios) ou não.

Se clicarmos no botão *Graphic* obteremos o gráfico da figura 42.

As linhas tracejadas representam os limites superior e inferior para cada grandeza sendo que a parte da curva em vermelho representa a faixa de valores fora dos limites fornecidos pelo usuário, no caso da figura abaixo representa-se um caso em que a tração no topo teve resultados acima do máximo estipulado.

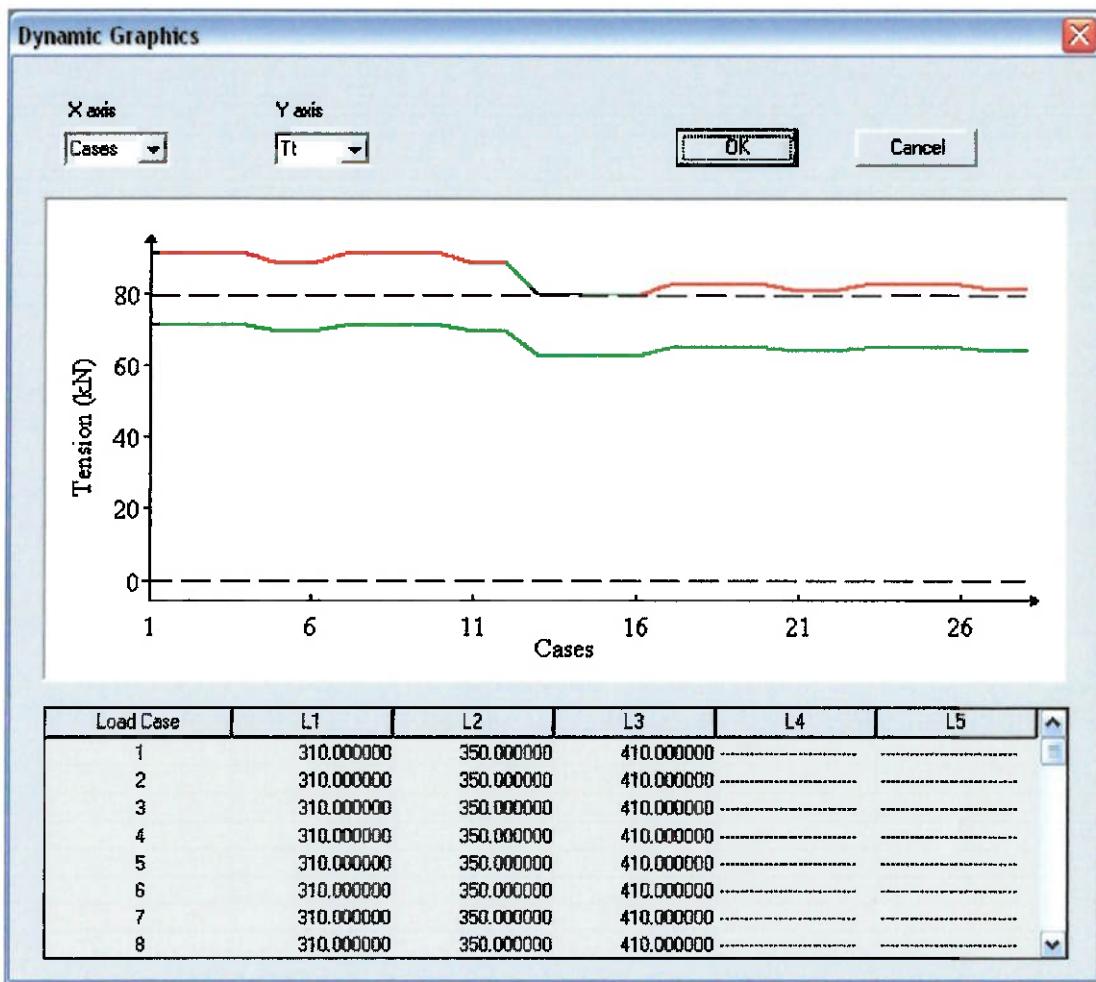


Figura 42 – Exemplo de gráfico de resultados dinâmicos (Tração no topo x casos de carregamento)

Este gráfico apresenta os valores máximo e mínimo de tração no topo para cada caso de carregamento dinâmico. As linhas tracejadas indicam os valores máximo e mínimo fornecidos pelo usuário, delimitando a região de valores de tração desejados. Quando os resultados encontram-se dentro desta região a curva é traçada em verde e quando está fora é traçada em vermelho.

Além da tração no topo o usuário pode escolher os valores de ângulo no topo ( $\alpha_t$ ) ou da posição do ponto de contato com o solo ( $X_{tdp}$ ) para serem plotados no eixo y (em função dos casos de carregamento). A tabela que se encontra abaixo do gráfico mostra as características dos casos de carregamento e é apresentada para que o usuário identifique rapidamente cada caso.

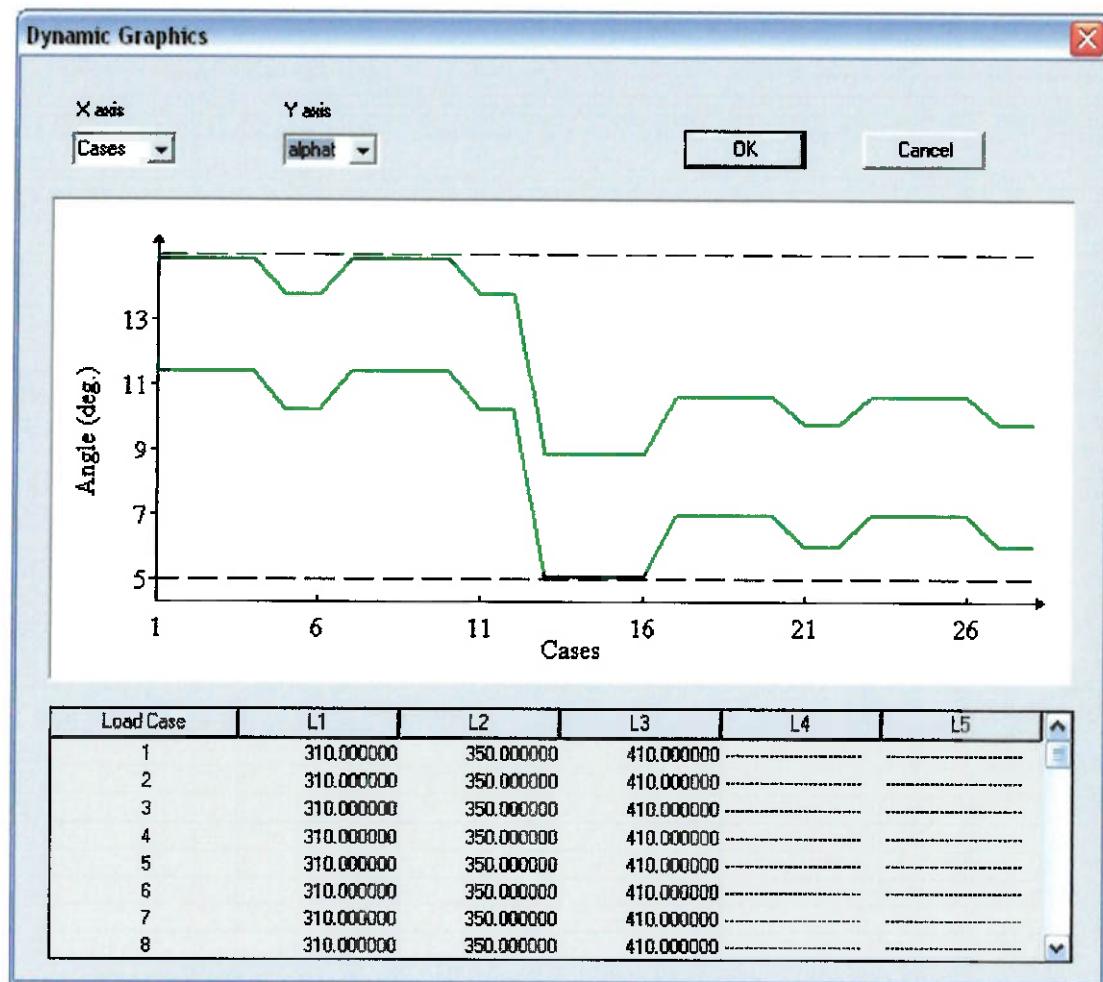


Figura 43 – Exemplo de gráfico de resultados dinâmicos (Ângulo no topo x casos de carregamento)

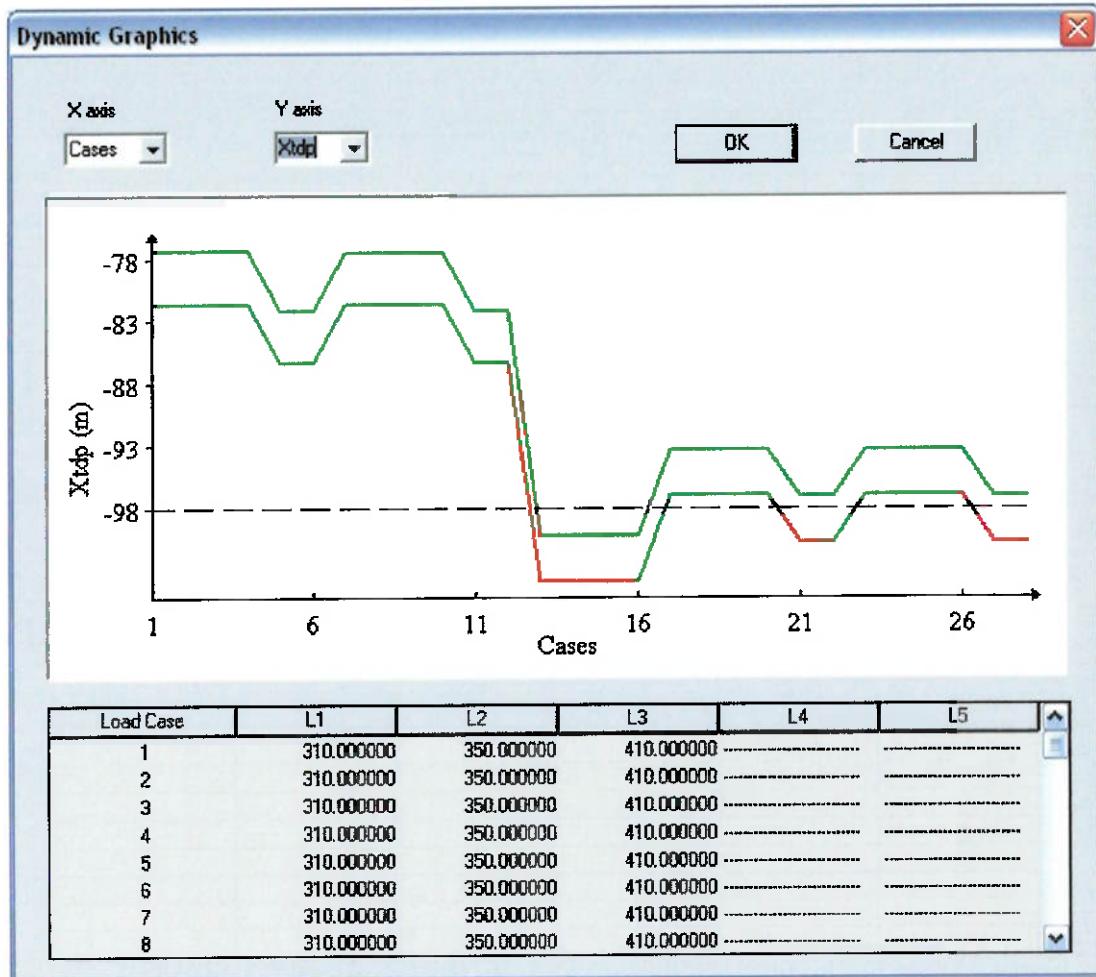


Figura 44 – Exemplo de gráfico de resultados dinâmicos (Posição do tdp x casos de carregamento)

Estes gráficos permitem avaliar de maneira mais rápida e fácil quais os casos aprovados ou reprovados, qual a variável que possui valores mais próximos dos limites e quanto esta ultrapassou o valor limite ou está próxima dele.

Neste caso iniciou-se a análise com 8 configurações neutras. Existiam também 3 casos de carga estáticos e 2 dinâmicos, o que levaria a uma análise de 24 configurações estáticas e 48 dinâmicas, caso não fossem utilizados os critérios de reprovação. Porém devido a estas restrições foram simulados apenas 15 casos estáticos e 28 dinâmicos, levando a um ganho de cerca de 40% no tempo de simulação, sem levar em conta a diferença entre o tempo de criação de apenas um arquivo ou 48 diferentes.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] Martins, C.A., *Uma Ferramenta Expedita para Estudo da Viabilidade de Risers Rígidos em Catenária*. Tese de Livre-Docência, EPUSP, 2000.
- [2] Pesce, C.P., *Mecânica de Cabos e Tubos Submersos Lançados em Catenária: Uma Abordagem Analítica e Experimental*. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997, 450 pp.
- [3] Pesce, C.P., Martins, C.A., Aranha, J.A.P. & Sertã, O.B., *Cabos e Tubos Submersos em Configuração de Catenária – Elementos de Análise e Dimensionamento*. Segunda Edição. Apostila de curso ministrado na Petrobrás, Maio de 1995.