

BERNARDO LUIS RODRIGUES DE ANDRADE

DINÂMICA DE LINHAS DE AMARRAÇÃO
ESTUDO EXPERIMENTAL
E MÉTODO DE CÁLCULO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

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

São Paulo

1994

BERNARDO LUIS RODRIGUES DE ANDRADE

**DINÂMICA DE LINHAS DE AMARRAÇÃO
ESTUDO EXPERIMENTAL
E MÉTODO DE CÁLCULO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

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

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Carlos Alberto Nunes Dias

São Paulo

1994

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE SÍMBOLOS
RESUMO
ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contexto do Trabalho.....	1
1.2	A Importância da Análise Dinâmica no Projeto das Linhas de Amarração.....	7
1.3	Objetivos do Trabalho.....	10
1.4	Apresentação do Trabalho.....	15
2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UMA LINHA DE AMARRAÇÃO..	17
2.1	A Geometria de uma Linha de Amarração.....	17
2.2	Os Materiais das Linhas.....	19
2.3	Equipamentos Empregados em Linhas de Amarração....	23
2.4	As Configurações das Linhas de Amarração.....	25
2.5	A Configuração Básica Adotada no Trabalho.....	28
3	ESTUDO DA ESTÁTICA DA LINHA DE AMARRAÇÃO.....	30
3.1	Considerações Gerais.....	30
3.2	A Definição do Problema Estático.....	31
3.3	As Equações de Equilíbrio da Linha.....	33
3.4	A Solução do Equilíbrio Estático da Linha.....	36
3.5	O Parâmetro Adimensional D.....	39
3.6	O Efeito Elástico no Equilíbrio Estático da Linha.....	42
3.7	A Resposta Quase-Estática da Linha a Desloca- mentos do Ponto de Amarração.....	44
3.7.1	A Rigidez do Sistema de Ancoragem.....	46
3.8	A Rigidez da Linha de Amarração.....	48

3.8.1	Interpretação Física dos Mecanismos de Resposta da Linha de Amarração.....	50
3.8.2	A Rigidez Geométrica da Linha de Amarração.....	54
3.8.3	A Rigidez Elástica da Linha de Amarração.....	55
3.9	Avaliação dos Deslocamentos da Linha Provocados pelos Movimentos do Ponto de Amarração.....	56
3.10	O Programa CATENA.....	60
4	ASPECTOS PRINCIPAIS DO PROJETO DAS LINHAS DE AMARRAÇÃO.....	62
4.1	As Solicitações Sobre o Sistema de Ancoragem e suas Linhas.....	62
4.2	As Forças Ambientais e os Movimentos da Plataforma.....	63
4.2.1	A Correnteza Marítima.....	64
4.2.2	O Vento.....	64
4.2.3	As Ondas.....	65
4.3	A Resposta do Sistema de Ancoragem aos Movimentos da Plataforma.....	66
4.4	O Procedimento para Dimensionamento das Linhas de Amarração.....	71
4.4.1	O Critério Ambiental.....	72
4.4.2	Avaliação dos Esforços Máximos nas Linhas.....	74
4.4.3	As Tensões Admissíveis.....	76
4.4.4	O Procedimento para Cálculo da Resposta das Linhas.....	76
4.5	O Cálculo da Resposta Dinâmica das Linhas.....	79
4.6	Características Não-Lineares do Problema Dinâmico.....	83
5	ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE LINHAS DE AMARRAÇÃO.....	86
5.1	Objetivos do Estudo Experimental.....	86
5.2	Características Gerais dos Ensaios.....	88
5.3	Descrição da Bancada de Ensaios.....	91
5.3.1	O Sistema para Aplicação dos Movimentos.....	92

5.3.2	O Sistema para Medida de Forças.....	96
5.3.3	O Sistema para Aquisição e Tratamento dos Dados...	98
5.4	O Planejamento dos Ensaios.....	99
5.4.1	O Critério para Definir as Condições dos Ensaios..	100
5.4.2	As Variáveis Medidas nos Ensaios.....	105
5.4.3	O Procedimento de Execução dos Ensaios.....	108
5.5	As Características Físicas dos Modelos de Linha.....	111
5.5.1	Características da Linha 1.....	112
5.5.2	Características da Linha 2.....	115
5.6	Configurações e Condições Ensaeadas.....	116
5.7	Resultados dos Ensaios.....	129
5.7.1	Resultados Estáticos.....	129
5.7.2	Resultados Dinâmicos.....	135
6	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE LINHAS DE AMARRAÇÃO.....	147
6.1	Objetivos da Análise.....	147
6.2	Introdução de Algumas Definições Auxiliares.....	147
6.2.1	Sistema de Coordenadas Auxiliar.....	148
6.2.2	A Amplitude Dinâmica da Tensão.....	150
6.2.3	O Coeficiente Principal de Rigidez.....	151
6.3	A Resposta Dinâmica no Domínio da Frequência.....	153
6.4	A Resposta Dinâmica no Domínio do Tempo.....	162
6.5	Características Não-Lineares da Resposta das Linhas.....	167
6.5.1	Os Efeitos da Não-Linearidade Geométrica.....	167
6.5.2	Os Efeitos Não-Lineares das Forças Viscosas.....	177
6.6	O Comportamento Físico das Linhas Ensaeadas.....	183
6.7	O Mecanismo e os Parâmetros que Governam o Comportamento Dinâmico das Linhas.....	197
7	MÉTODO APROXIMADO PARA CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	211
7.1	Considerações Gerais.....	211
7.2	A Idealização do Problema.....	213

7.3	Cálculo do Deslocamento Dinâmico do Centro de Gravidade.....	227
7.4	A Solução da Equação do Movimento Dinâmico do Centro de Gravidade da Linha.....	240
7.5	O Cálculo da Resposta Dinâmica da Linha.....	249
7.6	A Avaliação do Método Aproximado.....	257
8	CONCLUSÕES E RECOMENDACÕES.....	260

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	264
---------------------------------	-----

APÊNDICE A - GRÁFICOS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS
E ANALÍTICOS

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1.1 - Sistema de Produção Flutuante.....	3
Figura 1.2 - Configuração da Linha de Amarração.....	4
Figura 2.1 - Configuração Típica da Linha de A- marração.....	18
Figura 2.2 - Materiais das Linhas.....	20
Figura 2.3 - Linha Mista.....	22
Figura 2.4 - Configuração Geométrica da Linha de Amarração.....	25
Figura 2.5 - Linha em Forma de Catenária Parcial.....	27
Figura 3.1 - Configuração Básica da Linha.....	32
Figura 3.2 - Elemento de Linha.....	33
Figura 3.3 - Configurações Limites na Forma de Catenária Completa.....	41
Figura 3.4 - Efeito da Deformação Elástica.....	43
Figura 3.5 - Variação dos Esforços no Ponto de Amarração.....	45
Figura 3.6 - Efeito do Passeio Horizontal da Pla- taforma.....	47
Figura 3.7 - Efeito do Deslocamento na Curva de Equilíbrio.....	51
Figura 3.8 - Modelo da Linha de Amarração.....	53
Figura 3.9 - Deformação Elástica Provocada por Deslocamento do Ponto de Amarração.....	55
Figura 3.10 - Deslocamento do Centro de Gravidade da Parte Suspensa.....	58
Figura 4.1 - Efeito da Ação Ambiental Sobre a Plataforma.....	68
Figura 4.2 - Efeito dos Movimentos de 1 ^a Ordem.....	70
Figura 5.1 - Panorama Geral da Bancada de Ensaios.....	92

Figura 5.2	- Dispositivos Geradores de Trajetórias.....	93
Figura 5.3	- Dispositivos Geradores de Trajetórias.....	93
Figura 5.4	- Dispositivos Geradores de Trajetórias.....	94
Figura 5.5	- Célula de Carga.....	94
Figura 5.6	- Célula de Carga.....	96
Figura 5.7	- Diagrama para Planejamento das Condições dos Ensaios.....	106
Figura 5.8	- Modelo na Configuração Inicial de Equilíbrio Estático.....	110
Figura 5.9	- Configuração de um Ensaio com Trajetória Circular.....	110
Figura 5.10	- Modelos de Linha de Amarração.....	111
Figura 5.11	- Linha 1.....	111
Figura 5.12	- Dimensões dos Elos da Linha 1.....	112
Figura 5.13	- Dimensões dos Elos da Linha 2.....	115
Figura 5.14	- Trajetória do Movimento Linear Inclinado.....	118
Figura 6.1	- Sistema de Coordenadas Auxiliar.....	149
Figura 6.2	- Resposta Dinâmica do Ensaio 20.....	154
Figura 6.3	- Resposta Dinâmica do Ensaio 49.....	154
Figura 6.4	- Resultados de Suhara na Referência [5].....	160
Figura 6.5	- Resultados de Triantafyllou na Referência [10].....	161
Figura 6.6	- Resposta no Domínio do Tempo no Ensaio 27.....	164
Figura 6.7	- Resposta no Domínio do Tempo no Ensaio 68.....	164
Figura 6.8	- Resposta no Domínio do Tempo no Ensaio 22.....	165
Figura 6.9	- Os Efeitos Dinâmicos Sobre os Deslocamentos da Linha.....	186
Figura 6.10	- Deslocamentos Verticais do Ponto Médio de uma Linha Ensaçada por Suhara.....	187

Figura 7.1	- Comparação Entre as Configurações Estática e Dinâmica Assumidas pelas Linhas.....	215
Figura 7.2	- Ilustração da Hipótese Sobre a Configuração Dinâmica.....	217
Figura 7.3	- Posições do Centro de Gravidade da Linha.....	223
Figura 7.4	- Forças Atuantes num Elemento de Linha.....	229
Figura 7.5	- Modelo para Avaliar a Resposta Dinâmica Axial.....	251
Figura 7.6	- Resposta Dinâmica Axial da Linha de Amarração.....	254

LISTA DE TABELAS

	pág
Tabela 5.1 - Condições de Ensaios com a Linha 1 para Movimento Circular.....	119
Tabela 5.2 - Condições de Ensaios com a Linha 1 para Movimento Circular (continua- ção).....	120
Tabela 5.3 - Condições de Ensaios com a Linha 1 para Movimento Linear Horizontal.....	121
Tabela 5.4 - Condições de Ensaios com a Linha 1 para Movimento Linear Vertical.....	122
Tabela 5.5 - Condições de Ensaios com a Linha 1 para Movimento Linear Inclinado ($\theta_1 = 22^\circ$).....	123
Tabela 5.6 - Condições de Ensaios com a Linha 2 para Movimento Circular.....	124
Tabela 5.7 - Condições de Ensaios com a Linha 2 para Movimento Circular (continua- ção).....	125
Tabela 5.8 - Condições de Ensaio com a Linha 2 para Movimento Linear Horizontal.....	126
Tabela 5.9 - Condições de Ensaios com a Linha 2 para Movimento Linear Vertical.....	127
Tabela 5.10 - Condições de Ensaios com a Linha 2 para Movimento Linear Inclinado ($\theta_1 = 22^\circ$).....	128
Tabela 5.11 - Resultados Estáticos dos Ensaios N ^{os} 1 a 24.....	131
Tabela 5.12 - Resultados Estáticos dos Ensaios N ^{os} 25 a 30.....	132
Tabela 5.13 - Resultados Estáticos dos Ensaios N ^{os} 31 a 34.....	132
Tabela 5.14 - Resultados Estáticos dos Ensaios N ^{os} 35 a 38.....	132
Tabela 5.15 - Resultados Estáticos dos Ensaios N ^{os} 39 a 57.....	133

Tabela 5.16 - Resultados Estáticos dos Ensaios	
N ^{os} 58 a 63.....	134
Tabela 5.17 - Resultados Estáticos dos Ensaios	
N ^{os} 64 a 67.....	134
Tabela 5.18 - Resultados Estáticos dos Ensaios	
N ^{os} 68 a 71.....	134
Tabela 5.19 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 1 a 15.....	137
Tabela 5.20 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 16 a 24.....	138
Tabela 5.21 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 25 a 30.....	139
Tabela 5.22 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 31 a 34.....	140
Tabela 5.23 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 35 a 38.....	141
Tabela 5.24 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 39 a 53.....	142
Tabela 5.25 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 54 a 57.....	143
Tabela 5.26 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 58 a 63.....	144
Tabela 5.27 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 64 a 67.....	145
Tabela 5.28 - Resultados Dinâmicos dos Ensaios	
N ^{os} 68 a 71.....	146
Tabela 6.1 - Ensaio 42.....	171
Tabela 6.2 - Ensaio 43.....	171
Tabela 6.3 - Ensaio 44.....	171
Tabela 6.4 - Ensaio 27 e Ensaio 29.....	175
Tabela 6.5 - Ensaio 28 e Ensaio 30.....	175
Tabela 6.6 - Ensaio 39 e Ensaio 48.....	176
Tabela 6.7 - Ensaio 62 e Ensaio 63.....	181
Tabela 6.8 - Ensaio 68 e Ensaio 69.....	181
Tabela 6.9 - Ensaio 70 e Ensaio 71.....	182

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Amplitude do movimento oscilatório do ponto de amarração (m)
- CG - centro de gravidade da parte suspensa da linha
- Cd - coeficiente de arrasto hidrodinâmico da linha na direção normal
- Ca - coeficiente de massa adicional da linha na direção normal
- C - coeficiente de arrasto da linha
- c - coeficiente de amortecimento
- D - parâmetro adimensional que caracteriza a configuração da linha
- d_c - diâmetro equivalente da linha (m)
- EA - coeficiente da rigidez elástica axial da linha (N)
- f - frequência do movimento do ponto de amarração (Hz)
- ℓ - empuxo hidrostático da linha por unidade de comprimento (N/m)
- F - força ou tensão axial na linha (N)
- F_H - componente horizontal da tensão axial na linha (N)
- F_V - componente vertical da tensão axial na linha (N)
- F_{mℓ} - tensão axial média na linha (N)
- F_m - força ambiental média sobre a plataforma (N)
- \mathcal{F}_v - força de arrasto viscoso na linha por unidade de comprimento (N/m)
- \mathcal{F}_{v1} - força de arrasto viscoso linearizada (N/m)
- g - aceleração da gravidade (m/s^2)
- H - componente horizontal da tensão no ponto de amarração (N)
- H₀ - componente horizontal da tensão no ponto de amarração na configuração estática inicial (N)
- K - coeficiente de rigidez da linha (N/m)
- K_g - coeficiente de rigidez geométrica da linha (N/m)
- K_G - idem K_g
- K_e - coeficiente de rigidez elástica da linha (N/m)
- K_E - idem K_e

- KG - coeficiente de deslocamento do centro de gravidade da parte suspensa da linha (m/m)
- K_{θ} - coeficiente de rigidez da linha na direção θ (N/m)
- K_L - coeficiente principal ou máximo de rigidez da linha (N/m)
- K_{GL} - coeficiente de rigidez geométrica na direção θ_L (N/m)
- K_{EL} - coeficiente de rigidez elástica na direção θ_L (N/m)
- K_T^D - coeficiente de proporcionalidade para o cálculo da tensão dinâmica na linha (N/m)
- K_V^D - coeficiente de proporcionalidade para o cálculo da componente vertical da tensão dinâmica na linha (N/m)
- l - comprimento total da linha (m)
- l_i - comprimento total indeformado da linha (m)
- l_d - comprimento total deformado da linha (m)
- l_o - comprimento total da linha na configuração estática inicial (m)
- l_c - comprimento suspenso da linha (m)
- l_{co} - comprimento suspenso na configuração estática inicial (m)
- m - massa da linha por unidade de comprimento (kg/m)
- m_a - massa adicional da linha por unidade de comprimento, na direção normal (kg/m)
- m - massa de um oscilador harmônico simples (kg)
- M_o - massa do trecho suspenso da linha na configuração estática inicial (kg)
- P - profundidade ou distância vertical do ponto de amarração ao solo marinho (m)
- p - peso linear da linha no ar (N/m)
- q - peso submerso da linha por unidade de comprimento (N/m)
- s - coordenada curvilínea medida ao longo da linha (m)
- T - força ou tensão no ponto de amarração (N)
- T_c - tensão estática no ponto de amarração após o deslocamento médio da plataforma (N)
- T_1 - tensão na linha devido aos movimentos de 1^a ordem (N)
- T_2 - tensão na linha devido aos movimentos de 2^a ordem (N)
- T_o - tensão estática no ponto de amarração após deslocamento médio da plataforma acrescido da

amplitude do movimento de 2^a ordem ; ou tensão estática no ponto de amarração na configuração estática inicial (N)

- T_{max}- tensão máxima no ponto de amarração durante o movimento (N)
- T_{min}- tensão mínima no ponto de amarração durante o movimento (N)
- T_{Emx}- tensão máxima no ponto de amarração durante o movimento quase-estático (N)
- T_{Emi}- tensão mínima no ponto de amarração durante o movimento quase-estático (N)
- T^D - tensão dinâmica no ponto de amarração (N)
- T^S - tensão quase-estática no ponto de amarração (N)
- V - componente vertical da tensão no ponto de amarração (N)
- v - amplitude do deslocamento de um ponto qualquer da linha numa certa direção (m)
- v^s - deslocamento de um ponto qualquer da linha numa certa direção (m)
- V^S - componente vertical da tensão quase-estática no ponto de amarração (N)
- V^D - componente vertical da tensão dinâmica no ponto de amarração (N)
- V_o - componente vertical da tensão no ponto de amarração na configuração estática inicial (N)
- α_l - raio de ancoragem ou distância horizontal entre os pontos de amarração e ancoragem (m)
- α_c - projeção horizontal do comprimento suspenso da linha ou distância horizontal entre o ponto de amarração e o ponto de toque (m)
- α_a - componente horizontal da posição do ponto de amarração durante um movimento harmônico (m)
- X_a - amplitude da componente horizontal do movimento do ponto de amarração (m)
- Z^D - amplitude do movimento dinâmico do ponto médio do trecho suspenso (m)
- Z^S - amplitude do movimento quase-estático do ponto médio do trecho suspenso (m)

- z_g^D - posição vertical dinâmica do centro de gravidade (m)
 z_g^S - posição vertical quase-estática do centro de gravidade (m)
 Z_g^D - amplitude do movimento vertical dinâmico do centro de gravidade (m)
 Z_g^S - amplitude do movimento vertical quase-estático do centro de gravidade (m)
 z_a - componente vertical da posição do ponto de amarração durante um movimento harmônico (m)
 Z_a - amplitude da componente vertical do movimento do ponto de amarração (m)
 β - ângulo entre a linha eo eixo horizontal
 β_a - ângulo entre a tangente à linha no ponto de amarração e o eixo horizontal
 β_m - ângulo correspondente à inclinação média do trecho suspenso da linha
 θ - ângulo que indica a direção do deslocamento do ponto de amarração em relação ao eixo horizontal
 θ_1 - ângulo entre a direção da trajetória linear inclinada e o eixo horizontal
 θ_L - ângulo da direção em relação ao eixo horizontal para a qual a rigidez da linha é máxima
 τ_s - amplitude da variação da tensão no ponto de amarração calculada a partir da tensão máxima (N)
 τ_i - amplitude da variação da tensão no ponto de amarração calculada a partir da tensão mínima (N)
 τ - amplitude média da variação da tensão no ponto de amarração (N)
 τ_{sq} - amplitude da variação da tensão quase-estática no ponto de amarração calculada a partir da tensão máxima quase-estática (N)
 τ_{iq} - amplitude da variação da tensão quase-estática no ponto de amarração calculada a partir da tensão mínima quase-estática (N)
 τ_q - amplitude média da variação quase-estática da tensão no ponto de amarração (N)
 τ_e - amplitude da variação elástica equivalente da tensão no ponto de amarração (N)

- ρ - densidade do material da linha (kg/m^3)
- ρ_a - densidade da água (kg/m^3)
- T - período (s)
- ω - frequência do movimento do ponto de amarração (rad/s)
- ω_n - frequência natural da linha ou de um oscilador harmônico (rad/s)
- ω_e - frequência natural elástica da linha (rad/s)
- ξ - fator de amortecimento
- ξ_L - fator de amortecimento da linha
- φ_x - fase da componente horizontal do movimento do ponto de amarração
- φ_z - fase da componente vertical do movimento do ponto de amarração
- δ_L - amplitude do movimento do ponto de amarração projetado na direção θ_L (m)
- Λ - razão entre a rigidez elástica e a rigidez geométrica da linha
- x, z - coordenadas cartesianas com origem no ponto de toque
- x_a, z_a - coordenadas cartesianas com origem no ponto de amarração

RESUMO

O emprego de plataformas flutuantes para produção de petróleo no mar, em águas profundas, vem exigindo extensas modificações nos procedimentos usuais de projeto das linhas de amarração do sistema de ancoragem destas plataformas, responsável pela manutenção de sua posição sobre a locação.

Destaca-se como alteração marcante na metodologia para dimensionamento destas linhas a necessidade de se avaliar a resposta dinâmica das mesmas, quando solicitadas pelos movimentos de primeira ordem da plataforma.

Com o objetivo de fornecer subsídios para se avaliar o comportamento dinâmico das linhas de amarração apresenta-se neste trabalho os resultados de uma extensa série de ensaios experimentais realizados com modelos em escala reduzida submetidos a solicitações equivalentes aos movimentos da plataforma.

Desenvolve-se a partir destes resultados uma análise do comportamento dinâmico destas linhas, onde procura-se elucidar as principais características de sua resposta dinâmica e determinar quais os mecanismos e parâmetros que a governam.

Com base nesta análise e em trabalhos de outros autores propõe-se um método aproximado para cálculo da resposta dinâmica destas linhas, no domínio da frequência, com o propósito de fornecer ao projetista uma ferramenta de fácil e rápida aplicação que o auxilie no processo de síntese do sistema de ancoragem nos ciclos iniciais de projeto.

ABSTRACT

The recent use of floating platforms for oil production in deep waters have changed significantly the requirements on the design of the mooring system of these units.

One of the most important modifications in the design methodology is the requirement of mooring line dynamic analysis.

In order to help the overall understanding of the dynamic behavior of the mooring lines many experiments with reduced models were performed. The analysis of these experimental results make possible to understand the main characteristics of the dynamic response and the effect of the major parameters that govern this response.

Based on these analysis an approximate method is proposed to calculate the mooring line dynamic response in the frequency domain, with the purpose to assist the designer in the preliminary design phase.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Contexto do Trabalho

As recentes descobertas de importantes bacias marítimas de petróleo em águas profundas onde, no caso brasileiro, destacam-se os campos de Marlin e Albacora na bacia de Campos, situados em águas de até 2000 metros de profundidade, desencadearam um processo de análise e avaliação de diversas alternativas de Sistemas de Produção para tornar viável, tanto técnica como economicamente, a sua exploração.

Em função das restrições encontradas no emprego de plataformas fixas convencionais para produção de petróleo em águas profundas, ganhou impulso a busca de novas alternativas, dentre as quais tem se destacado como uma das mais promissoras os chamados Sistemas de Produção Flutuante (Floating Production Systems), ou SPF, que empregam plataformas flutuantes.

No caso brasileiro, as plataformas semi-submersíveis tem sido consideradas as mais indicadas para constituir este tipo de sistema de produção, dada a larga experiência já adquirida no emprego destas plataformas em operações de perfuração de poços de petróleo.

Uma ilustração deste tipo de sistema pode ser vista na Figura 1.1 a seguir.

Para operar como sistema de produção estas plataformas ficarão sujeitas a novos requisitos e condições opera-

cionais, o que evidentemente impõe a necessidade de se proceder uma revisão nos critérios, procedimentos e métodos hoje empregados no projeto dos diversos sistemas que as compõem.

Em particular isto se aplica, dada a sua importância, ao *Sistema de Ancoragem* destas plataformas.

O sistema de ancoragem de uma plataforma flutuante é um dos que tem um papel fundamental em seu desempenho operacional. Sua função é manter a plataforma posicionada sobre uma determinada locação no solo marinho, restringindo os deslocamentos desta no plano horizontal, provocados pelas forças ambientais provenientes da ação de ondas, ventos e correntezas. Esta restrição deve satisfazer os limites operacionais impostos pelos equipamentos que se ligam às instalações submersas, de modo a garantir a continuidade das operações e a integridade física destes equipamentos.

O sistema de ancoragem típico das plataformas semi-submersíveis é formado por *Linhas de Amarração* distribuídas ao redor de seu casco, que após serem lançadas assumem a forma de uma catenária. Uma representação deste tipo de sistema de ancoragem encontra-se também na Figura 1.1.

Na figura 1.2 mostra-se uma configuração típica de linha de amarração instalada numa plataforma semi-submersível, onde se indica a posição dos dois principais pontos que caracterizam a geometria da linha, que são: o ponto de amarração e o ponto de ancoragem.

O princípio de funcionamento deste tipo de sistema de ancoragem baseia-se no desequilíbrio que um deslocamento

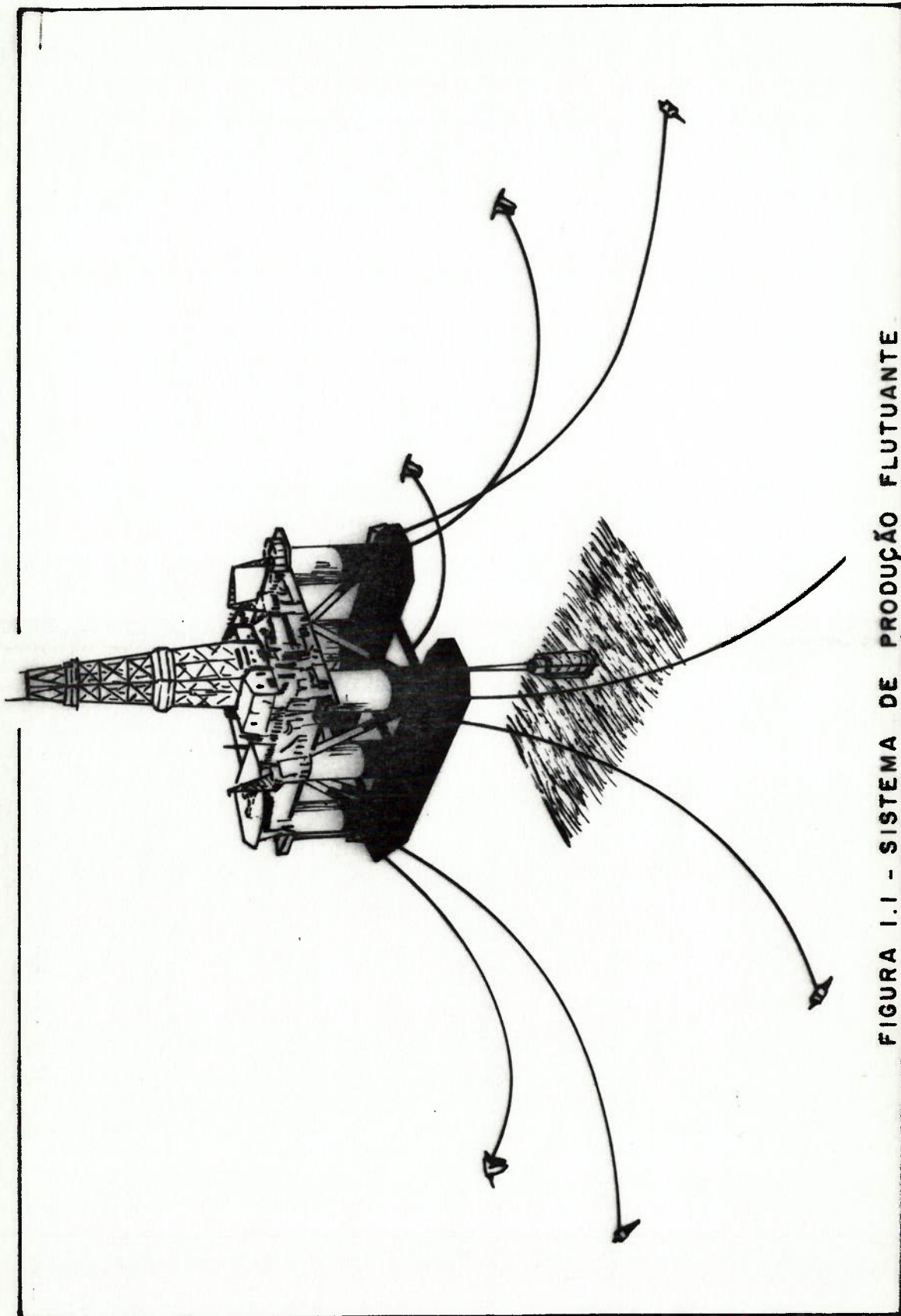


FIGURA 1.1 - SISTEMA DE PRODUÇÃO FLUTUANTE

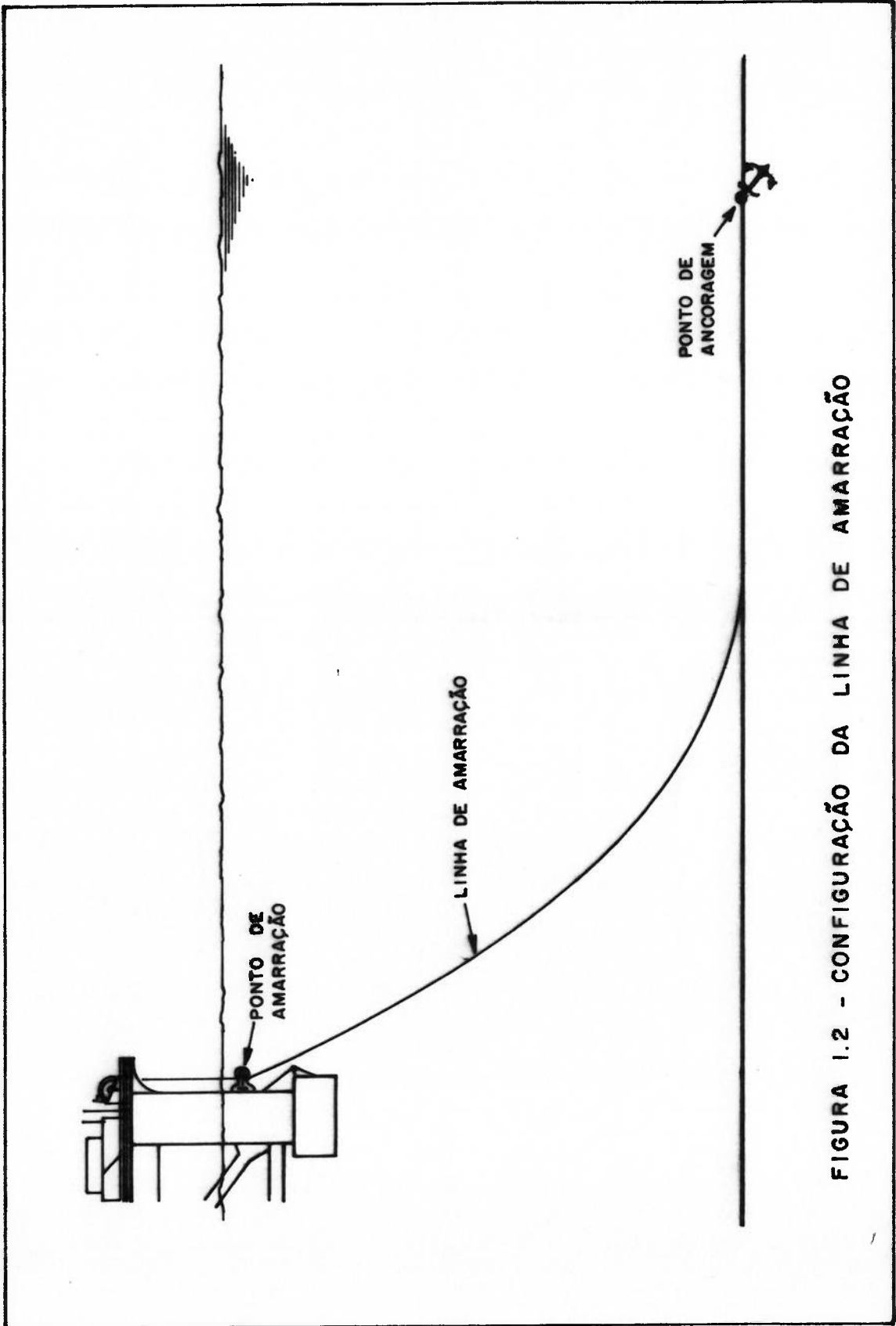


FIGURA 1.2 - CONFIGURAÇÃO DA LINHA DE AMARRAÇÃO

qualquer da plataforma no plano horizontal, provoca nas forças exercidas pelas linhas sobre a plataforma, desequilíbrio este determinado pela capacidade de restauração, ou rigidez, do sistema de ancoragem. A componente horizontal da resultante destas forças cresce na medida em que ocorre o deslocamento, até que a plataforma atinja uma nova posição de equilíbrio. Nesta situação a componente horizontal tem a mesma magnitude da força ambiental que provoca o deslocamento com sentido oposto a esta.

Este tipo de sistema de ancoragem já vem sendo empregado há longo tempo nas plataformas envolvidas nas operações de perfuração de poços de petróleo. Em função desta experiência, tanto os critérios e procedimentos de projeto, como os métodos de cálculo empregados no dimensionamento destes sistemas e de suas linhas de amarração, para as plataformas de perfuração, já estão plenamente consolidados.

Como exemplo destes procedimentos, conhecidos como clássicos, pode-se citar a norma API-RP2P do American Petroleum Institute [1]¹.

A principal característica destes procedimentos é que neles assume-se, como hipótese, que a resposta das linhas de amarração aos deslocamentos da plataforma seja quase-estática. Como consequência, o método empregado na determinação dos esforços que agem nas linhas é totalmente baseado nas equações de equilíbrio estático das mesmas. Os possí-

¹ Os números entre colchetes indicam as referências bibliográficas citadas no final do trabalho.

veis efeitos dinâmicos sobre estes esforços, causados principalmente pelos movimentos de 1ª ordem da plataforma devidos à ação das ondas, não são diretamente considerados nestes cálculos, sendo indiretamente acomodados via adoção de coeficientes de segurança elevados ou conservadores.

No caso das plataformas de produção, os procedimentos clássicos tem sido considerados inadequados para o projeto de seu sistema de ancoragem, basicamente por não considerarem estes efeitos dinâmicos na avaliação dos esforços nas linhas de amarração.

Como consequência novos procedimentos vem sendo sugeridos, estabelecendo novos critérios de projeto, exigindo o cálculo dinâmico dos esforços nas linhas de amarração, e introduzindo a necessidade de avaliação de sua vida em fadiga. Como exemplo pode-se citar as novas normas da API[2] e do DNV[3].

Com este novo cenário houve uma intensificação no desenvolvimento de estudos e pesquisas com o propósito de se conhecer e avaliar melhor o comportamento dinâmico de linhas de amarração, resultando na proposição de diversos métodos para cálculo da resposta dinâmica destas linhas, quando sujeitas aos vários tipos de solicitação provenientes das operações com plataformas flutuantes.

O presente trabalho se insere basicamente neste contexto. Mais precisamente procura-se estudar o comportamento dinâmico de uma configuração típica de linha de amarração, com o propósito de se determinar os principais mecanismos e parâmetros que governam este comportamento e quais os efeitos resultantes sobre os esforços na linha.

O desenvolvimento do estudo está baseado numa série de ensaios experimentais realizados no Tanque de Provas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, onde simulou-se, com modelos em escala reduzida, as solicitações mais relevantes em termos de efeitos dinâmicos sobre os esforços resultantes nas linhas.

Como resultado destas investigações propõem-se um método de cálculo dos esforços máximos em linhas de amarração, quando sujeitas às solicitações dinâmicas provenientes dos movimentos de 1ª ordem da plataforma flutuante.

1.2 - A Importância da Análise Dinâmica no Projeto das Linhas de Amarração

Os efeitos dinâmicos sobre os esforços atuantes em linhas de amarração, sujeitas às condições usuais de operação de estruturas oceânicas flutuantes, já vem sendo estudados há algum tempo (ver referências bibliográficas ao final do trabalho).

Nestes estudos constata-se que os movimentos de 1ª ordem da estrutura flutuante podem provocar uma amplificação dinâmica acentuada nos esforços atuantes nas linhas, levando-os a valores muito superiores àqueles determinados através de métodos quase-estáticos.

Entretanto, no caso dos sistemas de ancoragem de plataformas de perfuração, a experiência adquirida na operação e no projeto destas plataformas, permitiu que se estabelecesse procedimentos e critérios de projeto suficientemente confiáveis para o dimensionamento das linhas, empregando-se

os métodos de cálculo quase-estáticos.

Já no caso das plataformas de produção, as diferenças de objetivos, requisitos e condições operacionais, em relação às de perfuração, tornaram necessária uma revisão nos critérios e métodos de projeto, para garantir um dimensionamento seguro das linhas nesta nova situação. Como modificação mais marcante destaca-se a exigência da análise dinâmica para avaliação dos esforços atuantes nas linhas de amarração.

As principais diferenças entre as características operacionais destas plataformas, que motivaram esta revisão, são as seguintes:

- a) Plataformas de perfuração permanecem em geral poucos meses em operação numa dada locação, enquanto que as plataformas de produção podem permanecer até 20 anos num mesmo local, sendo portanto uma operação de caráter permanente. Nesta situação há maior probabilidade das plataformas de produção ficarem expostas a condições ambientais mais severas.
- b) Em função dos requisitos de mobilidade as plataformas de perfuração não devem operar com sistemas de ancoragem excessivamente robustos, projetados para condições ambientais muito severas. Nestas condições as operações são interrompidas e, se for o caso, abandona-se a locação. Já no caso das plataformas de produção, por questões econômicas, o sistema de ancoragem deve ser capaz de garantir a continuidade da produção nas condições ambientais

mais severas possíveis.

- c) Em geral, plataformas de perfuração operam isoladas, ou seja, sem outras estruturas oceânicas em suas vizinhanças, enquanto que a presença de navios tanques, embarcações de apoio e mesmo outras plataformas nas proximidades das plataformas de produção são eventos quase que permanentes. Assim, as possíveis consequências de uma falha no sistema de ancoragem são muito mais severas no caso das plataformas de produção.
- d) Plataformas de perfuração estão normalmente envolvidas com trabalhos em um único poço, enquanto que, as de produção, operam normalmente com vários poços, o que significa uma presença muito maior de equipamentos e tubulações ("Risers") submersos. Nestas condições uma falha no sistema de ancoragem nas plataformas de produção está associada a uma probabilidade muito maior de danos aos equipamentos submersos, seja em função do maior número destes como também da maior possibilidade de interferência com as linhas de amarração.
- e) As linhas de amarração das plataformas de perfuração são frequentemente lançadas e recolhidas, permitindo uma inspeção e manutenção constantes e uma fácil substituição quando da constatação de danos. No caso das plataformas de produção a instalação do sistema de ancoragem é de caráter permanente, não sendo economicamente viável um recolhimento frequente para inspeção e manutenção.

Os fatos acima permitem as seguintes constatações:

- a) as plataformas de produção deverão operar em condições ambientais bem mais severas do que as de perfuração.
- b) uma falha no sistema de ancoragem de uma plataforma de produção poderá ter consequências muito mais sérias do que no caso de uma plataforma de perfuração.
- c) as plataformas de produção devem operar continuamente durante um período de tempo muito maior do que as de perfuração e com possibilidades limitadas de inspeção e manutenção das linhas de amarração, o que sugere que uma análise de fadiga é um fator de projeto importante para garantir a confiabilidade do sistema de ancoragem.

Toda esta análise mostra a necessidade de uma avaliação mais rigorosa dos esforços atuantes nas linhas de amarração de plataformas de produção. É evidente que para se obter tal avaliação, tanto dos esforços máximos como da vida em fadiga, é necessário que os métodos de cálculo determinem com precisão os principais efeitos dinâmicos sobre os esforços nas linhas, de forma a garantir um dimensionamento confiável face às condições mais severas enfrentadas por estas plataformas.

1.3 - Objetivos do Trabalho

Com o intuito de apresentar os objetivos do trabalho e situá-lo melhor dentro do contexto do projeto de sistemas

de ancoragem, será apresentado a seguir um resumo do procedimento de projeto destes sistemas, baseado na referência [2].

O projeto do sistema de ancoragem de uma plataforma semi-submersível inicia-se com o estabelecimento das condições ambientais de projeto que atuarão sobre a plataforma, definidas através das intensidades de vento, ondas e correnteza e de suas direções de ocorrência em relação à plataforma.

Estabelecidas estas condições e conhecida a geometria da plataforma, pode-se calcular as forças ambientais atuantes na mesma e também seus movimentos de 1ª ordem devidos à ação das ondas que, para profundidades superiores à 70 metros, são considerados independentes do sistema de ancoragem.

A partir deste estágio o procedimento de projeto do sistema de ancoragem segue basicamente a conhecida espiral de projeto de estruturas oceânicas, sendo que cada ciclo da espiral pode ser subdividido em duas etapas.

Na primeira etapa realiza-se fundamentalmente a síntese do sistema de ancoragem, determinando-se o número de linhas do sistema, sua distribuição ao redor da plataforma, as propriedades físicas e a configuração geométrica de cada linha.

Procura-se nesta primeira etapa um sistema de ancoragem com capacidade de restauração suficiente para manter os deslocamentos da plataforma dentro dos limites pré-estabelecidos, quando atuam as forças ambientais já calculadas. Neste processo, devido às características das

forças ambientais atuantes, os novos procedimentos de projeto não diferem dos clássicos, empregando-se, em ambos os casos, métodos quase-estáticos para determinação da rigidez do sistema de ancoragem no plano horizontal.

No primeiro ciclo de projeto a síntese do sistema de ancoragem se espelha bastante em sistemas semelhantes já projetados. Nos demais ciclos o sistema inicial é alterado de acordo com os resultados da segunda etapa do ciclo precedente.

Na segunda etapa realiza-se o cálculo dos esforços máximos atuantes nas linhas de amarração do sistema escolhido e avalia-se a vida em fadiga das mesmas. Os resultados são então comparados com os critérios de projeto que, não sendo satisfeitos, obrigam a realização de novo ciclo de projeto.

É nesta segunda etapa que os novos procedimentos de projeto diferem dos clássicos, exigindo um cálculo mais preciso dos esforços atuantes nas linhas de amarração, que deve ser realizado através de uma análise dinâmica da resposta das linhas. Nesta análise, a principal solicitação a ser considerada são os deslocamentos impostos ao ponto de amarração das linhas pelos movimentos de 1^a ordem da plataforma.

Para o cálculo desta resposta dinâmica diversos métodos já foram propostos e implementados através de programas de computador, a grande maioria desenvolvida com base no método dos elementos finitos.

Com o intuito de se obter maior precisão nos resultados procura-se, nestes métodos, representar as principais

características não-lineares existentes no problema dinâmico das linhas de amarração. Como consequência a resposta só pode ser obtida via integração numérica no domínio do tempo das equações de equilíbrio dinâmico da linha. Neste caso, o preço que se paga pela maior precisão são os inevitáveis problemas numéricos e o maior tempo de processamento inerentes à este tipo de programas.

Por outro lado, a resposta numérica que se obtém, por mais precisa que seja, não fornece subsídios que orientem o projetista nas modificações das características do sistema e de suas linhas para iniciar um novo ciclo de projeto, caso necessário. Para tanto, é imprescindível que o projetista disponha de conhecimentos básicos sobre os mecanismos e principais parâmetros que governam o comportamento dinâmico das linhas de amarração, caso contrário a otimização do sistema passa a ser um longo processo de tentativa e erro.

As considerações acima mostram não só a importância de se conhecer o comportamento dinâmico das linhas de amarração mas indicam também que um método de cálculo mais simples da resposta dinâmica das linhas, para ser empregado nos ciclos iniciais de projeto, pode facilitar e tornar bem mais rápido o projeto do sistema de ancoragem. Os métodos numéricos mais sofisticados poderiam então ser empregados numa verificação final das linhas do sistema, para assegurar a satisfação dos critérios de projeto.

São com estes objetivos que se desenvolve o presente trabalho.

Inicialmente desenvolve-se uma série de ensaios experimentais com modelos em escala reduzida de linhas de amar-

ração. Nestes ensaios, para simular a ação dos movimentos de 1^a ordem da plataforma, impõe-se movimentos harmônicos ao ponto de amarração das linhas. A força que atua neste ponto é medida durante a aplicação destes movimentos, caracterizando-se assim a resposta dinâmica das linhas.

Através de variações nos parâmetros físicos e geométricos dos modelos e com as respostas dinâmicas correspondentes, procura-se caracterizar o comportamento dinâmico das linhas de amarração e avaliar a influência dos diversos parâmetros envolvidos.

Este trabalho experimental segue a linha apresentada por Suhara nas referências [4],[5],[6],[7] e [8] e por Lindahl na referência [9].

A partir das observações experimentais e com base em métodos apresentados por Suhara nas referências já citadas e Triantafyllou nas referências [10] e [15], propõem-se um método simples de cálculo da resposta dinâmica, no domínio da frequência, de linhas de amarração sujeitas aos movimentos de 1^a ordem da plataforma. Este método pode ser facilmente implementado em microcomputador e empregado nos ciclos iniciais de projeto de sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes.

Em princípio o método foi desenvolvido para o cálculo do esforço máximo atuante em uma linha de amarração. No entanto, verificadas algumas condições, é possível aplicá-lo também na avaliação da vida em fadiga destas linhas.

Por motivos de maior simplicidade adotou-se como base para o desenvolvimento do trabalho a configuração típica mais simples de uma linha de amarração, que é aquela na

qual a linha é homogênea, ou seja, constituída de um único material. Como se verá no capítulo 2 as linhas também podem ser mistas, ou seja, constituídas por trechos de diferentes materiais.

Em termos qualitativos, no entanto, as conclusões e observações sobre o comportamento dinâmico permanecem válidas para o caso de linhas mistas, havendo apenas a necessidade de se introduzir algumas correções para a aplicação do método de cálculo proposto.

1.4 - Apresentação do Trabalho

Para sua apresentação o trabalho foi subdividido em capítulos que abrangem os tópicos delineados a seguir.

No capítulo 2 descreve-se brevemente as principais características físicas e geométricas das linhas de amarração e apresenta-se a configuração básica adotada para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 3 apresenta-se um estudo da estática de uma linha de amarração, onde algumas propriedades importantes são analisadas e discutidas.

No capítulo 4 apresenta-se uma descrição das condições operacionais e solicitações que sofrem um sistema de ancoragem e suas linhas e uma breve discussão dos procedimentos de projeto destes sistemas, nos aspectos relacionados ao dimensionamento mecânico das linhas. Finalmente analisa-se as principais características não-lineares presentes no problema dinâmico das linhas de amarração.

O capítulo 5 é dedicado a apresentação do trabalho

experimental, onde se descreve toda a montagem e o planejamento dos ensaios executados e se apresenta, de forma tabular, os principais resultados medidos durante o estudo experimental.

No capítulo 6 apresenta-se uma análise do comportamento dinâmico das linhas de amarração, baseada nos resultados do estudo experimental e em trabalhos de Suhara e Triantafyllou.

No capítulo 7 é proposto um método de cálculo, no domínio da frequência, da resposta dinâmica de linhas de amarração a solicitações provenientes dos movimentos de 1^a ordem da plataforma. Apresenta-se também comparações entre resultados obtidos com este método e os resultados experimentais.

Finalmente, no capítulo 8 apresenta-se as conclusões e recomendações do trabalho.

CAPÍTULO 2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UMA LINHA DE AMARRAÇÃO

2.1 - A Geometria de uma Linha de Amarração

A configuração típica de uma linha de amarração de plataforma flutuante pode ser vista na figura 2.1 a seguir.

Os pontos característicos indicados nesta figura, cujas posições determinam a forma geométrica da linha, são conhecidos como "ponto de amarração" e "ponto de ancoragem".

O ponto de amarração coincide com a posição do "fairlead" na estrutura, que é uma espécie de roldana através da qual passa-se a linha em direção ao ponto de ancoragem. A partir do "fairlead" é que a linha assume propriamente a forma de catenária e, em termos práticos, é neste ponto que se considera a ligação da linha com a estrutura. Em geral o ponto de amarração encontra-se sempre abaixo da linha d'água da estrutura, ou seja, submerso.

O ponto de ancoragem corresponde à extremidade da linha ligada à âncora, estando portanto sempre situado ao nível do solo marinho.

O comprimento da linha lançado após o "fairlead" e a posição relativa entre os pontos de amarração e ancoragem são os principais parâmetros geométricos que determinam a forma da linha de amarração.

O comprimento de linha lançado após o "fairlead" pode em geral ser subdividido em dois trechos, como indicado na

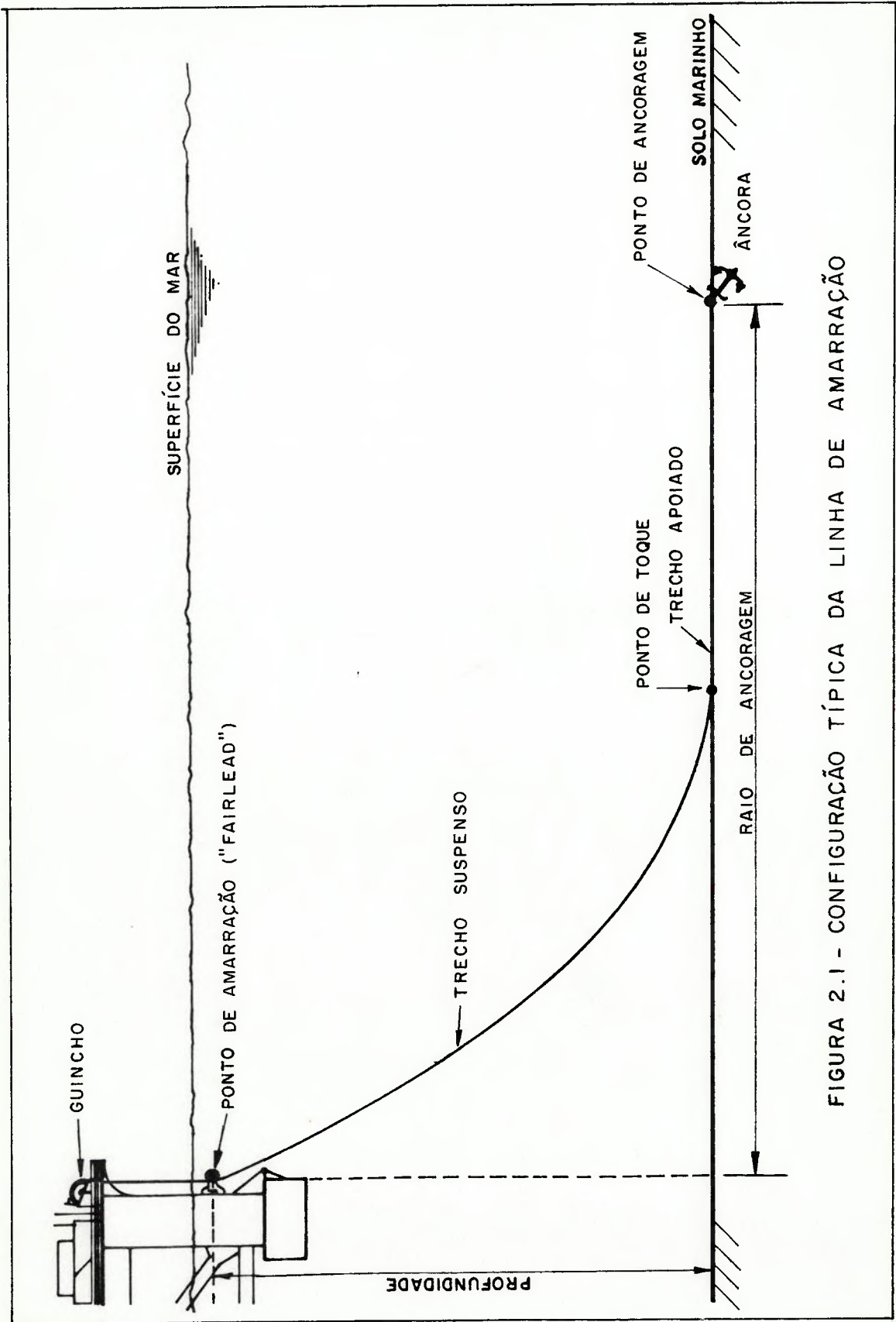


FIGURA 2.1 - CONFIGURAÇÃO TÍPICA DA LINHA DE AMARRAÇÃO

figura 2.1. O primeiro, chamado de "trecho suspenso" da linha, é aquele que assume a forma de catenária. O segundo é a parcela da linha que se apoia sobre o solo marinho até a âncora, chamado de "trecho apoiado". O ponto de encontro entre estes dois trechos é conhecido como "ponto de toque", ou "touch down point", cuja posição depende da forma da catenária que é assumida pela linha.

A posição relativa entre os pontos de amarração e ancoragem é caracterizada pela profundidade de ancoragem, ou simplesmente profundidade, e pelo raio de ancoragem. A profundidade é a distância vertical entre o ponto de amarração e o solo marinho e o raio de ancoragem é a distância horizontal entre os pontos de amarração e ancoragem, como mostra a figura 2.1.

2.2 - Os Materiais das Linhas

As linhas de amarração são formadas normalmente por corrente de aço ou por cabo de aço trançado. Recentemente tem-se tentado viabilizar também o uso de cabos de material sintético.

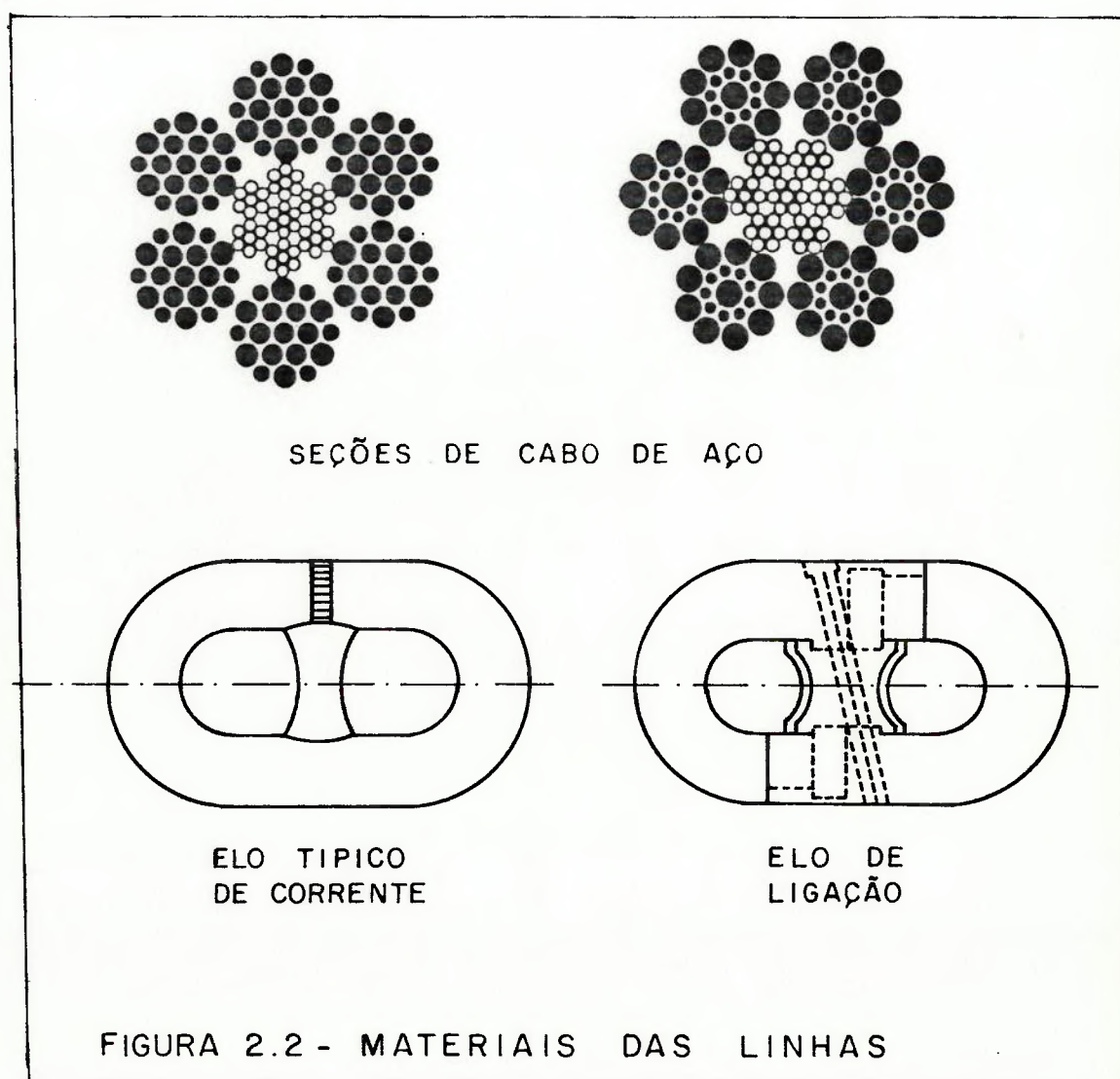
Os cabos de aço empregados são formados por fios de aço galvanizados e têm diâmetros nominais variando normalmente entre 38 e 170 milímetros. Alguns tipos apresentam também um revestimento externo de material sintético para proteção contra corrosão.

As correntes são formadas por arames de aço com diâmetros variando normalmente entre 20 e 180 milímetros e são classificadas em função do tipo de aço empregado na sua

confeção. Para aços mais resistentes é atribuído um grau mais elevado à qualidade da corrente e vice versa.

Em termos comparativos, para uma mesma resistência à tração, as correntes apresentam um peso linear da ordem de 3 a 5 vezes maior do que os cabos de aço. Para os diâmetros apresentados o peso linear das correntes varia entre 90 e 6700 N/m e sua resistência à tração entre 380 e 25600 kN. No caso dos cabos o peso linear varia entre 60 e 1150 N/m e sua resistência à tração entre 1000 e 14700 kN.

Na figura 2.2 a seguir ilustra-se elos de corrente e seções típicas de cabos de aço.



A característica mais importante de ambos os materiais é a alta flexibilidade ou baixa rigidez à flexão. No caso das correntes pode-se efetivamente assumir que a rigidez à flexão seja nula. Para os cabos, como os diâmetros são muito menores do que os comprimentos das linhas e como as curvaturas destas são em geral pequenas, pode-se assumir que esta rigidez seja também nula ou desprezível.

Esta característica é que faz com que as linhas de amarração assumam a forma de catenária. Neste caso o único esforço interno nas linhas que equilibra o carregamento externo atuante é uma força com direção tangente à curva formada pela linha, em todos os seus pontos.

Os materiais empregados também não apresentam resistência à compressão, perdendo totalmente as características de linha de amarração se submetidos a esforços desta natureza.

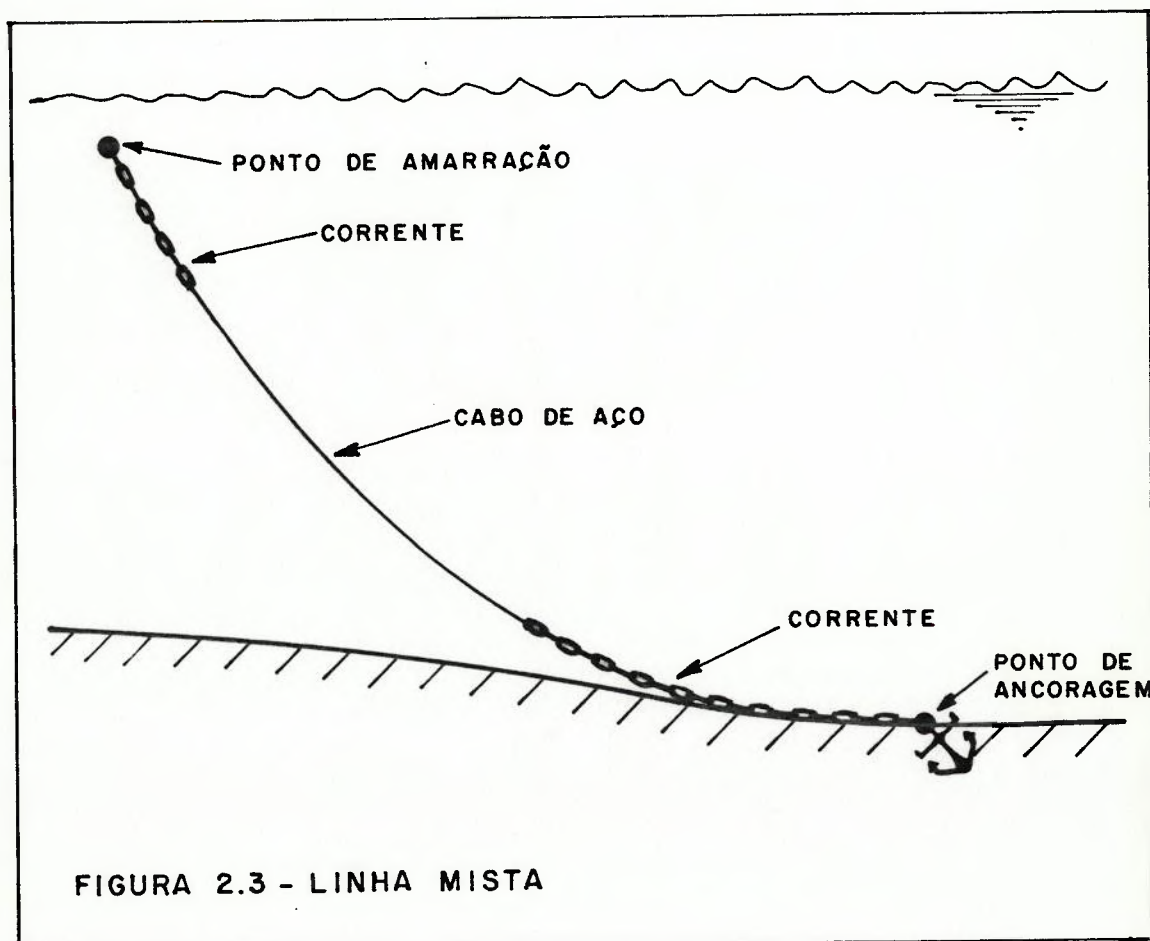
Com relação a outras características destes materiais duas comparações merecem destaque.

As correntes apresentam uma resistência a abrasão superior aos cabos de aço e portanto resistem mais ao desgaste provocado pelo atrito com o solo marinho. Além disto, em função de sua total flexibilidade e da geometria dos elos, as correntes são mais fáceis tanto de serem manipuladas pelos guinchos como de serem armazenadas, apesar de apresentarem peso maior do que os cabos.

Em termos de sua composição, as linhas são classificadas como homogêneas ou mistas. As linhas homogêneas são aquelas formadas por um único material e as mistas são formadas por trechos de diferentes materiais.

As linhas homogêneas em geral são formadas por correntes e são usualmente empregadas em sistemas de ancoragem de caráter não-permanente, como nas plataformas de perfuração, ou em águas menos profundas.

As linhas mistas são formadas pela combinação de correntes e cabos de aço e usualmente possuem três trechos diferentes, como ilustrado na figura 2.3 a seguir. No primeiro trecho, que é aquele que se liga à plataforma, utiliza-se corrente. No segundo trecho, que em geral se situa sempre na parte suspensa da linha, utiliza-se o cabo de aço. No último trecho, que é o que permanece em contato com o solo, emprega-se as correntes. Esta combinação é a mais empregada em função das características dos materiais já descritas acima.



Ao longo das linhas mistas, para se efetuar a união entre os diversos trechos, emprega-se elementos de ligação que efetuam a transição entre um tipo e outro de material. Estes elementos são também empregados nas linhas homogêneas porque, em geral, os comprimentos fabricados de corrente ou cabo são insuficientes para formar uma linha completa. Na figura 2.2 mostra-se um elo típico de ligação empregado na união de correntes.

Estes elementos de ligação em geral constituem-se em pontos problemáticos numa linha de amarração porque sua resistência a fadiga é usualmente bem inferior à do material da linha.

Alem das composições já descritas as linhas de amarração podem possuir também singularidades ao longo de seu comprimento tais como bóias e poitas. Estas singularidades visam melhorar a capacidade de restauração das linhas. Entretanto, em função de custo e dificuldades de instalação estas singularidades são empregadas apenas em casos muito específicos.

2.3 - Equipamentos empregados em Linhas de Amarração

Dois são os equipamentos auxiliares mais importantes que fazem parte da instalação de uma linha de amarração.

O primeiro deles é a âncora, que é o equipamento instalado no ponto de ancoragem da linha com a função de manter fixa a posição deste ponto. A âncora deve suportar os esforços aplicados pela linha sem se deslocar de sua posição de instalação.

A escolha do tipo e o dimensionamento da âncora é função da magnitude e direção da carga imposta pela linha e do tipo de solo marinho em que se instalará a mesma.

A maioria das âncoras empregadas em sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes são as conhecidas âncoras de arraste. A principal característica deste tipo de âncora é o fato das mesmas suportarem apenas esforços paralelos ao solo marinho, ou seja, que tendam a arrastá-la por sobre o solo. Cargas aplicadas perpendicularmente ao solo não são suportadas por estas âncoras e provocam o seu deslocamento, comprometendo a ancoragem da plataforma.

Para garantir a ação efetiva das âncoras de arraste é necessário que haja sempre, em qualquer situação, um certo trecho de linha apoiado sobre o solo, de modo que os esforços sobre a âncora sejam sempre paralelos a este. Caso isto não ocorra deve-se empregar outros tipos de âncora, como por exemplo as estacas ou pilares de ancoragem, ou ainda as âncoras de gravidade.

O outro equipamento importante na instalação da linha de amarração é o guincho instalado na plataforma com a função de manipular a linha e controlar o esforço no ponto de amarração. Eles permitem operações de liberação ou recolhimento de certa quantidade de linha, de modo a acertar o comprimento lançado de projeto ou alterar o esforço atuante no ponto de amarração, caso necessário.

Os guinchos mais empregados são os que manipulam correntes e normalmente vem equipados com dinamômetro, freio e trava de linha.

Os dois equipamentos ou componentes citados são na

verdade os responsáveis pela manutenção da configuração de projeto da linha de amarração e conseqüentemente pela eficácia de sua atuação como parte do sistema de ancoragem. Na figura 2.1 representa-se esquematicamente a posição destes equipamentos.

2.4 - As Configurações das Linhas de Amarração

As linhas de amarração podem ser projetadas para assumir diversas configurações que são função da magnitude dos parâmetros geométricos, da topografia do local e da composição da linha.

Na figura 2.4 a seguir apresenta-se a configuração mais genérica de uma linha de amarração sem singularidades. As linhas com singularidades (boias, poitas, etc.) não serão consideradas por serem de emprego mais restrito.

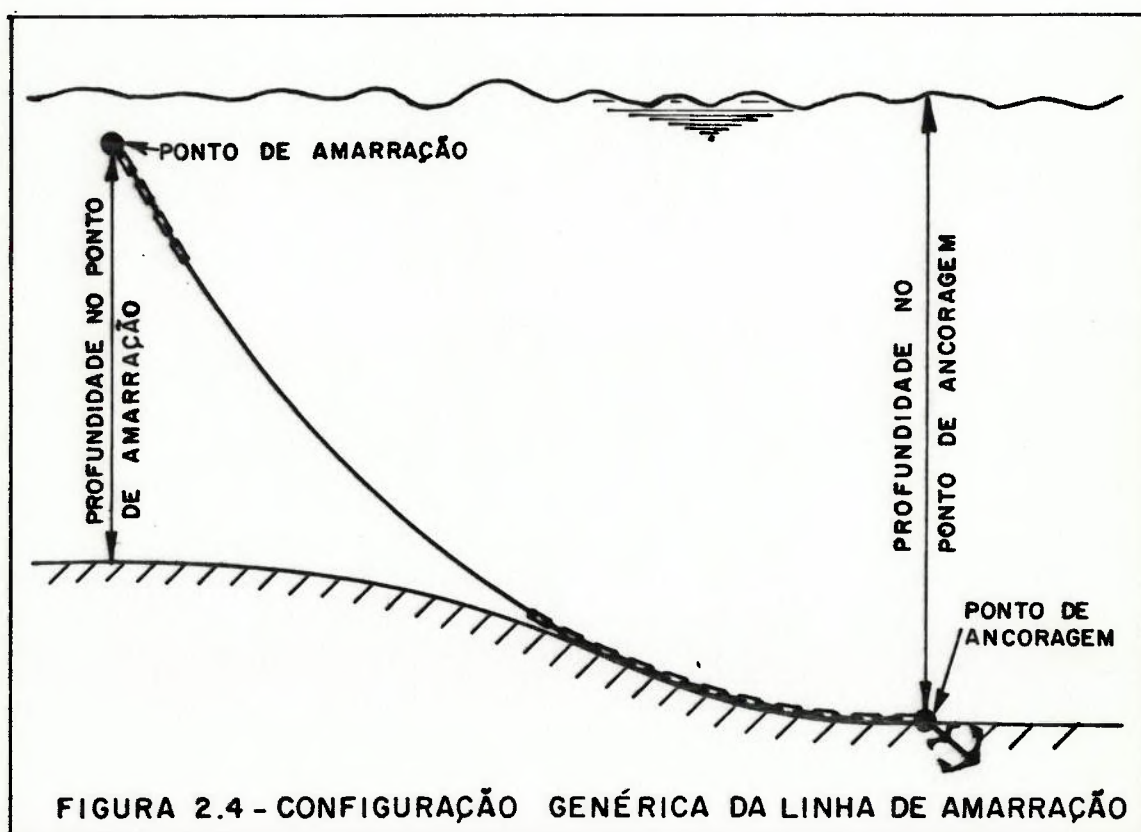


FIGURA 2.4 - CONFIGURAÇÃO GENÉRICA DA LINHA DE AMARRAÇÃO

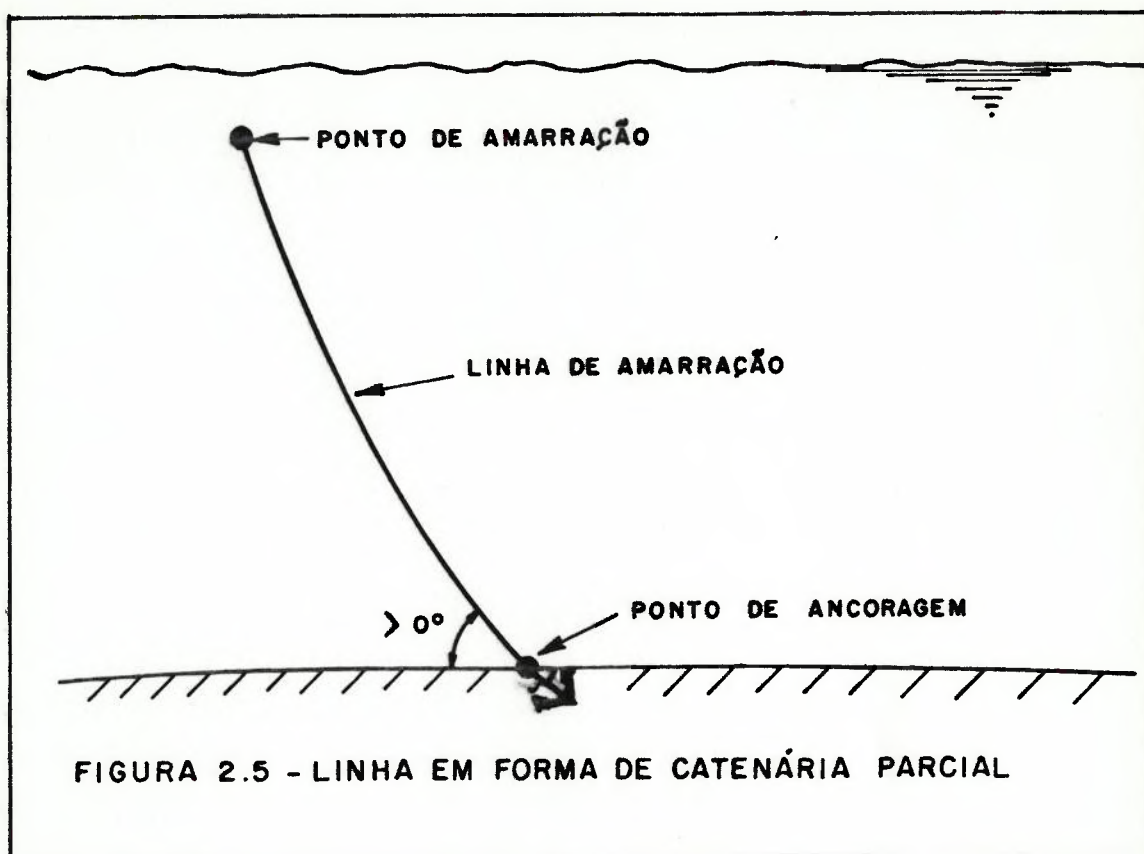
A configuração apresentada na figura 2.4 mostra uma linha mista, instalada num local com profundidade variável, que apresenta um trecho suspenso e um trecho apoiado no solo marinho.

Nesta representação está implícita a hipótese de que toda linha se situa em um plano perpendicular à superfície do mar que contém os pontos de amarração e ancoragem. A este plano dá-se o nome de "plano da linha".

Esta hipótese é considerada válida para todas as linhas de um sistema, mesmo durante os deslocamentos da plataforma e em qualquer posição de equilíbrio no plano horizontal que a mesma venha assumir.

As configurações estáticas assumidas pelas linhas podem ser classificadas em dois grupos. Quando o ângulo entre a linha e o solo, no ponto de encontro entre ambos, for nulo, ou seja, quando a linha é tangente ao solo, diz-se que a mesma se configura como "catenária frouxa". Em particular, caso o solo seja paralelo à superfície do mar, ou seja, caso a profundidade seja constante, esta configuração é conhecida também como "catenária completa". Nestas configurações em geral existe um trecho de linha apoiado sobre o solo e a tangência ocorre no ponto de toque, como no exemplo da figura 2.4.

Caso o ângulo de encontro entre a linha e o solo não seja nulo, o que só é possível se o ponto de encontro for o próprio ponto de ancoragem, diz-se que a linha se configura como "catenária esticada" ou "catenária parcial". Neste caso evidentemente não existirá trecho de linha apoiado sobre o solo, como se mostra na figura 2.5.



O emprego de âncoras de arraste exige que as linhas permaneçam sempre na forma de catenária frouxa para evitar o levantamento da âncora, mesmo durante os deslocamentos da plataforma. Em termos práticos, para satisfazer esta exigência, impõe-se no projeto das linhas que o comprimento das mesmas seja tal que, para qualquer posição da plataforma, haja sempre um trecho de linha apoiado sobre o solo.

A grande maioria dos sistemas de ancoragem emprega linhas na forma de catenária frouxa, não só devido à maior utilização de âncoras de arraste, mas também em função dos menores esforços que resultam nas linhas com esta configuração. Linhas em forma de catenária parcial são empregadas apenas em casos específicos onde é necessária uma grande rigidez nas linhas de amarração.

Para se determinar a configuração estática de uma

linha de amarração deve-se conhecer, além das características físicas do material da linha, as magnitudes dos parâmetros geométricos que são : o comprimento da linha e dos trechos com diferentes materiais; o raio de ancoragem e a profundidade de ancoragem. Caso a profundidade não seja constante no local deve-se dispor também de um levantamento topográfico do solo ao longo do plano da linha.

Com estes parâmetros é possível se determinar as equações matemáticas da curva que representa a configuração estática da linha e se conhecer os esforços resultantes ao longo de seu comprimento.

2.5 - A Configuração Básica Adotada no Trabalho

Para se determinar com precisão os esforços nas linhas de amarração, sejam eles estáticos ou dinâmicos, é evidente que deve-se procurar representar o mais fielmente possível a configuração real assumida pela linha.

No entanto, em termos qualitativos, o comportamento estático ou dinâmico das linhas encontradas em plataformas flutuantes é fundamentalmente o mesmo para valores usuais dos parâmetros físicos e geométricos que determinam suas configurações e para condições usuais de operação destas plataformas.

Esta constatação decorre do fato de que os mecanismos que governam o comportamento estático ou dinâmico destas linhas são função de propriedades e características gerais que são comuns às configurações usuais assumidas pelas linhas, como se verá nos capítulos posteriores.

Neste sentido, para facilitar o desenvolvimento dos ensaios e para possibilitar o tratamento analítico de algumas propriedades da linha de amarração, adotou-se para o desenvolvimento do trabalho uma única configuração de linha que pode ser considerada como a mais simples dentre as usualmente encontradas nos sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes. Esta configuração é a apresentada na figura 2.1.

Assume-se no trabalho que a linha de amarração seja homogênea e apresente-se sempre na forma de catenária completa, mesmo durante os deslocamentos da plataforma, como ocorre na maioria dos sistemas de ancoragem deste tipo.

As conclusões e observações sobre o comportamento dinâmico de uma linha com esta configuração básica poderão ser estendidas para linhas com outras configurações usuais. Apenas com relação ao método de cálculo proposto algumas correções devem ser implementadas para adequá-lo à outras configurações.

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DA ESTÁTICA DA LINHA DE AMARRAÇÃO

3.1 - Considerações Gerais

Em função das características físicas das linhas de amarração, o estudo de seu comportamento estático nada mais é do que uma aplicação das conhecidas equações de equilíbrio da catenária. A partir destas equações é possível avaliar como as linhas respondem, em termos quase-estáticos, aos deslocamentos da plataforma e determinar algumas propriedades importantes associadas à configuração da linha, como por exemplo sua rigidez geométrica.

A escolha da configuração básica definida no capítulo anterior permite que se obtenha analiticamente tanto a solução das equações da catenária para a linha de amarração como as propriedades estáticas mais importantes. O tratamento analítico é interessante porque possibilita uma melhor compreensão e visualização do problema físico estudado. No caso de outras configurações a solução do equilíbrio estático só é possível numericamente caso a caso, o que não permite uma compreensão mais geral do comportamento estático das linhas.

No entanto, em termos qualitativos, os resultados apresentados neste capítulo são gerais e podem ser estendidos às configurações mais genéricas das linhas.

Para o projeto do sistema de ancoragem o conhecimento do comportamento estático das linhas é importante por dois motivos.

Em primeiro lugar, como se viu no capítulo 1, a síntese do sistema de ancoragem é totalmente baseada no comportamento estático das linhas, em função da natureza das solicitações sobre o mesmo.

Por outro lado, como será visto no estudo dinâmico, a resposta dinâmica das linhas aos movimentos de 1ª ordem da plataforma depende significativamente tanto da configuração estática em que se encontra a linha ao ser submetida a estes movimentos como das propriedades estáticas associadas a tal configuração.

3.2 - A Definição do Problema Estático

Na figura 3.1 a seguir apresenta-se a configuração geométrica básica da linha de amarração em catenária, indicando-se o sistema de coordenadas adotado para o estudo estático e as definições dos parâmetros geométricos que caracterizam a linha.

O problema estático da linha de amarração pode ser posto como a determinação da curva de equilíbrio e da tensão resultante ao longo de uma linha com comprimento indeformado l_1 , instalada com uma profundidade P e com raio de ancoragem αl . Em outras palavras, o problema é determinar a configuração de equilíbrio estático de uma linha com comprimento l_1 instalada entre dois pontos pré-fixados, que são os pontos de amarração e ancoragem, com posição relativa entre si determinada pela profundidade P e pelo raio de ancoragem αl .

Para o problema estático os únicos carregamentos ex-

ternos considerados são o peso próprio e o empuxo hidrostático na linha. Como a linha é homogênea, o carregamento pode ser definido, a partir do peso linear no ar (p) e do empuxo linear (f), como um peso linear submerso (q) constante e dado por:

$$q = p - f \quad (1)$$

Em função das características físicas da linha a curva de equilíbrio da parte suspensa da linha é a catenária e o único esforço interno resultante é uma força $F(\Delta)$, também chamada de tensão na linha, tangente a linha em todos os pontos. No ponto de amarração esta tensão tem valor T , com componentes vertical V e horizontal H .

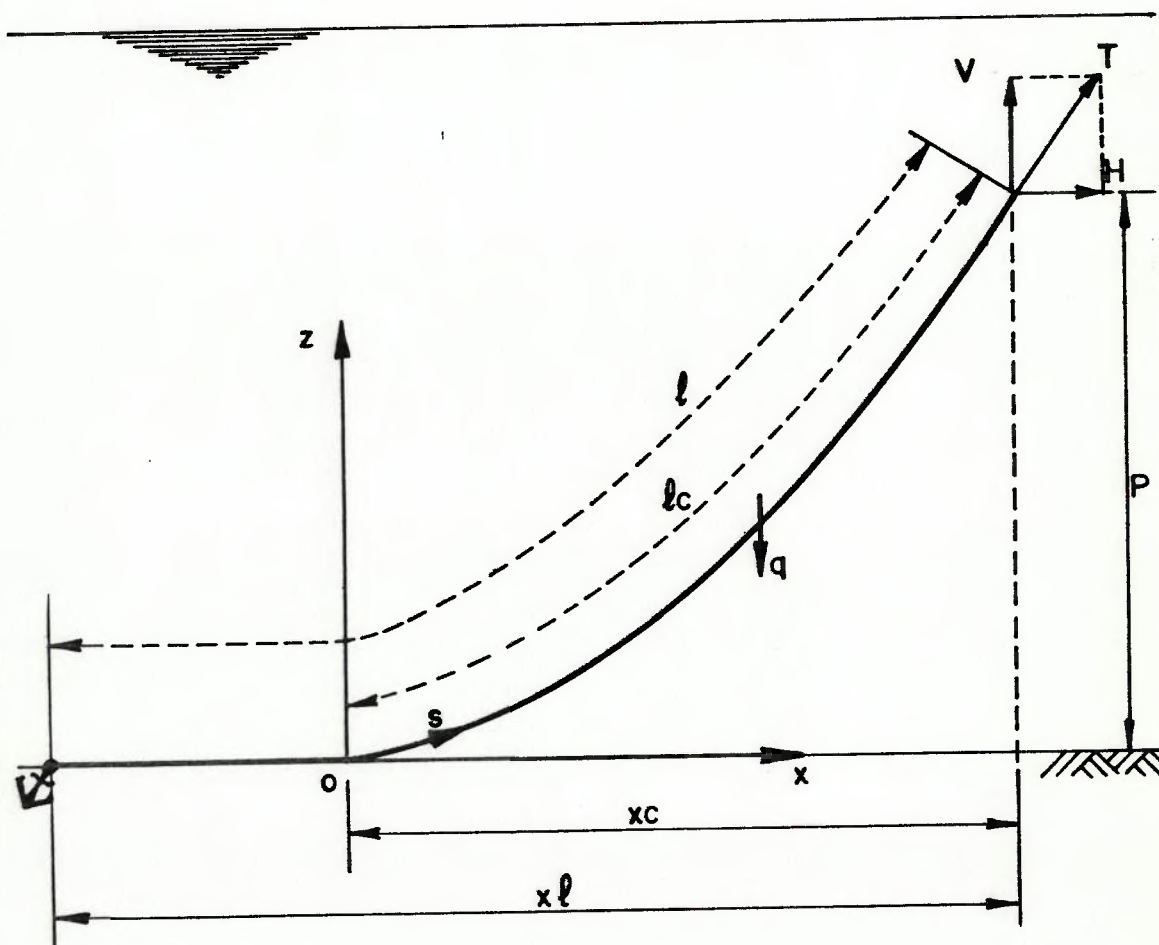


FIGURA 3.1 - CONFIGURAÇÃO BÁSICA DA LINHA

3.3 - As Equações de Equilíbrio da Linha

Se a linha da figura 3.1 está em equilíbrio então um elemento infinitesimal qualquer da parte suspensa, como o mostrado na figura 3.2, também está e a ele pode-se aplicar as condições necessárias para tal equilíbrio.

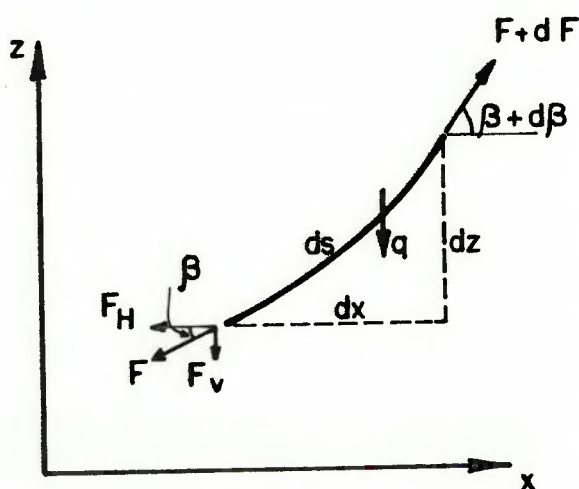


FIGURA 3.2 - ELEMENTO DE LINHA

Num ponto qualquer da linha as componentes da tensão F valem:

$$F_H(\Delta) = F \cdot \cos\beta \quad (2)$$

$$F_V(\Delta) = F \cdot \sin\beta \quad (3)$$

O ângulo $\beta(\Delta)$ é o ângulo entre a linha e a direção do eixo x , ou direção horizontal.

Impondo o equilíbrio de forças na direção horizontal obtém-se:

$$F_H(\Delta) = H = \text{constante} \quad (4)$$

O equilíbrio de forças na direção vertical fornece:

$$\frac{d(F\text{sen}\beta)}{dx} = q \cdot \frac{d\Delta}{dx} \quad (5)$$

Da geometria diferencial as seguintes relações se aplicam ao elemento de linha:

$$d\Delta^2 = dx^2 + dz^2 \quad (6)$$

$$\frac{dx}{d\Delta} = \cos\beta ; \frac{dz}{d\Delta} = \text{sen}\beta ; \frac{dz}{dx} = \text{tg}\beta \quad (7)$$

Utilizando as equações (2) e (7) na equação (5) obtem-se:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{q}{H} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} \quad (8)$$

A equação (8) é a equação diferencial da curva de equilíbrio da parte suspensa da linha de amarração. A solução desta equação fornece a curva descrita pela parte suspensa da linha.

A solução da equação (8) é a conhecida equação da catenária apresentada a seguir:

$$z = \frac{H}{q} \cdot \cosh\left(\frac{q \cdot x}{H} + C_1\right) + C_2 \quad (9)$$

onde C_1 e C_2 são constantes de integração.

As condições de contorno para a configuração em catenária completa são:

$$\text{para } x=0 \longrightarrow \begin{cases} z=0 \\ \frac{dz}{dx}=0 \end{cases}$$

Aplicando-as na equação (9) obtem-se:

$$z = \frac{H}{q} \cdot \left[\cosh\left(\frac{q \cdot x}{H}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

Combinando a equação (10) com as relações da geometria diferencial obtem-se:

$$\Delta = \frac{H}{q} \cdot \sinh\left(\frac{q \cdot x}{H}\right) \quad (11)$$

As equações (10) e (11) são as equações da curva de equilíbrio assumida pela linha entre o ponto de amarração e o ponto de toque. Estas são as equações básicas para se resolver o equilíbrio estático de uma linha na forma de catenária completa.

Combinando estas equações entre si e com as relações da geometria diferencial pode-se obter várias relações adicionais, que complementam a solução do problema.

As equações (10) e (11) combinadas fornecem:

$$z^2 + \frac{2 \cdot H}{q} \cdot z = \Delta^2 \quad (12)$$

Derivando-se as equações (10) e (11) obtem-se as seguintes relações:

$$\frac{dz}{dx} = \operatorname{tg}\beta = \sinh\left(\frac{q \cdot x}{H}\right) \quad (13)$$

$$\frac{dx}{d\Delta} = \cos\beta = \frac{1}{\cosh\left(\frac{q \cdot x}{H}\right)} \quad (14)$$

$$\frac{dz}{d\Delta} = \operatorname{sen}\beta = \operatorname{tgh}\left(\frac{q \cdot x}{H}\right) \quad (15)$$

Aplicando as equações (14) e (15) nas equações (2) e (3) obtem-se:

$$F_v = H \cdot \sinh\left(\frac{q \cdot x}{H}\right) \quad (16)$$

$$F = H \cdot \cosh\left(\frac{q \cdot x}{H}\right) \quad (17)$$

As equações (16) e (17) combinadas com as equações (10) e (11) fornecem:

$$F_v = q \cdot \Delta \quad (18)$$

$$F = q \cdot z + H \quad (19)$$

As equações (18) e (19) mostram que no ponto de toque, onde $\Delta=0$ e $z=0$, a componente F_v é nula e a tensão na linha é igual a própria componente horizontal. A partir deste ponto a tensão permanece constante até a âncora, em função da geometria do problema.

A equação (19) mostra também que a tensão máxima na linha ocorre em $z=P$, que é o valor máximo da coordenada z , coincidindo com o ponto de amarração. Este resultado confirma o fato de que o dimensionamento das linhas é sempre feito com base na tensão que ocorre no ponto de amarração. Neste ponto o valor da tensão é dado por:

$$T = q \cdot P + H \quad (20)$$

O conjunto de equações (10), (11), (18) e (19) indica que uma vez determinado o valor da componente H o problema do equilíbrio estático de uma linha de amarração está completamente resolvido. Esta componente será determinada aplicando-se as equações acima à configuração geométrica pré-fixada através dos valores da profundidade P , do raio de ancoragem αl e do comprimento indeformado l_1 .

3.4 - A Solução do Equilíbrio Estático da Linha

Nas equações (10) e (11) verifica-se que a componente

H estará perfeitamente determinada uma vez conhecidas as coordenadas de um ponto qualquer da parte suspensa da linha. Explicitando então as equações (10) e (11) para o ponto de amarração obtem-se:

$$P = \frac{H}{q} \cdot \left[\cosh\left(\frac{q \cdot xc}{H}\right) - 1 \right] \quad (21)$$

$$lc = \frac{H}{q} \cdot \sinh\left(\frac{q \cdot xc}{H}\right) \quad (22)$$

No entanto, na forma como o problema está posto não se conhece a priori a posição do ponto de toque e consequentemente a posição da origem do sistema de coordenadas em relação aos pontos de amarração e ancoragem. Neste caso a única coordenada conhecida é a ordenada do ponto de amarração, que é a própria profundidade, permanecendo como incógnitas o comprimento suspenso lc e a distância horizontal xc entre o ponto de toque e o ponto de amarração.

Assim, as incógnitas nas equações (21) e (22) são H , xc e lc , havendo portanto necessidade de mais uma equação para solução do problema.

Esta terceira equação não pode ser tirada das relações adicionais apresentadas no item anterior pois estas, ou foram obtidas da combinação das equações (10) e (11), ou apenas acrescentam mais uma incógnita ao problema.

A terceira equação será obtida de uma relação de compatibilidade geométrica que deve ser satisfeita pelos parâmetros geométricos que caracterizam a configuração da linha. Na figura 3.1 é possível observar que esta relação deve ser:

$$l - lc = \alpha l - \alpha c \quad (23)$$

Admitindo inicialmente que a linha seja inextensível, o valor de l na equação (23) será igual ao comprimento indeformado l_1 . O efeito da deformação elástica da linha no seu equilíbrio estático será introduzido mais adiante.

Como l_1 , αl e P são os parâmetros geométricos conhecidos, as equações (21), (22) e (23) formam um sistema de três equações algébricas com três incógnitas que resolvido fornece os valores de H , lc e αc , resolvendo portanto o problema do equilíbrio estático da linha de amarração.

Para resolução deste sistema define-se inicialmente o parâmetro adimensional D :

$$D = \frac{q \cdot \alpha c}{H} \quad (24)$$

Combinando-se as equações (21), (22) e (23) e introduzindo a definição dada na equação (24) as seguintes relações são obtidas:

$$\frac{l - \alpha l}{P} = \frac{\sinh D - D}{\cosh D - 1} \quad (25)$$

$$\frac{P}{lc} = \frac{\cosh D - 1}{\sinh D} \quad (26)$$

$$\frac{P}{\alpha c} = \frac{\cosh D - 1}{D} \quad (27)$$

Na equação (25), que é o resultado da combinação das três equações anteriores, a única incógnita é o parâmetro D . Os demais parâmetros são aqueles que definem a configuração geométrica da linha e portanto conhecidos.

A solução da equação (25) para o parâmetro D fornece a solução do equilíbrio estático da linha de amarração.

Como não é possível explicitar o parâmetro D na equação (25) a solução deve ser obtida através de um método numérico qualquer.

Com o valor de D obtem-se das equações (26) e (27) os valores de l_c e x_c e da equação (24) o valor da componente horizontal H . Este último valor introduzido na equação (19) permite o cálculo da tensão em toda parte suspensa da linha, resolvendo completamente o problema do equilíbrio estático.

3.5 - O Parâmetro Adimensional D

A solução do equilíbrio estático através da equação (25) mostra uma característica interessante das linhas de amarração inextensíveis com a forma de catenária completa.

O termo a esquerda na equação (25) depende apenas das características geométricas da configuração. Portanto, o parâmetro D independe do peso linear submerso da linha instalada com aquela configuração. O mesmo ocorre para as variáveis l_c e x_c obtidas das equações (26) e (27). Neste caso, é imediato verificar que a relação H/q terá sempre um mesmo valor qualquer que seja o peso linear da linha instalada com uma certa configuração pré-fixada.

A relação H/q é o único parâmetro que aparece na equação (10) que descreve a curva de equilíbrio da parte suspensa da linha. Como esta relação é constante para a configuração geométrica pré-fixada, a curva de equilíbrio será a mesma qualquer que seja o peso linear da linha utilizada.

Em outras palavras, para uma geometria pré-fixada através dos parâmetros l_1 , P e αl , a linha de amarração assumirá uma única curva de equilíbrio, qualquer que seja seu peso linear. Apenas os esforços internos ao longo da linha dependerão de seu peso linear, como pode-se depreender da equação (19) e da relação H/q .

Como para cada conjunto de valores l_1 , P e αl está associado um único valor do parâmetro D , diz-se que este caracteriza a configuração geométrica da linha de amarração, desde que a mesma seja considerada inextensível.

Como será visto no item seguinte a deformação elástica da linha invalida esta análise, mas não descharacteriza o resultado mais geral que será apresentado a seguir.

Para se relacionar fisicamente o valor do parâmetro D com a configuração da linha considere-se que, uma linha com comprimento l_1 , instalada numa certa locação onde a profundidade é constante, pode assumir qualquer configuração entre os limites apresentados na figura 3.3, em função do valor adotado para o raio de ancoragem.

A configuração (a) da figura 3.3 mostra a linha na condição mais frouxa possível, enquanto que a configuração (b) mostra a linha na condição mais esticada possível, respeitando-se a forma de catenária completa.

Reescrevendo-se a equação (26), a seguinte expressão pode ser obtida para o parâmetro D :

$$D = \ln \left[\frac{1 + (P/lc)}{1 - (P/lc)} \right] \quad (28)$$

Para a configuração mais frouxa o seguinte limite po-

de ser obtido através da equação (28):

$$\text{para } P/lc \rightarrow 1 \rightarrow D \rightarrow \infty$$

Para a configuração mais esticada, o limite para linhas bastante longas será:

$$\text{para } P/lc \rightarrow 0 \rightarrow D \rightarrow 0$$

Estes resultados mostram que quanto menor o valor de D mais esticada estará a linha e que, quanto maior este valor, mais frouxa será a configuração.

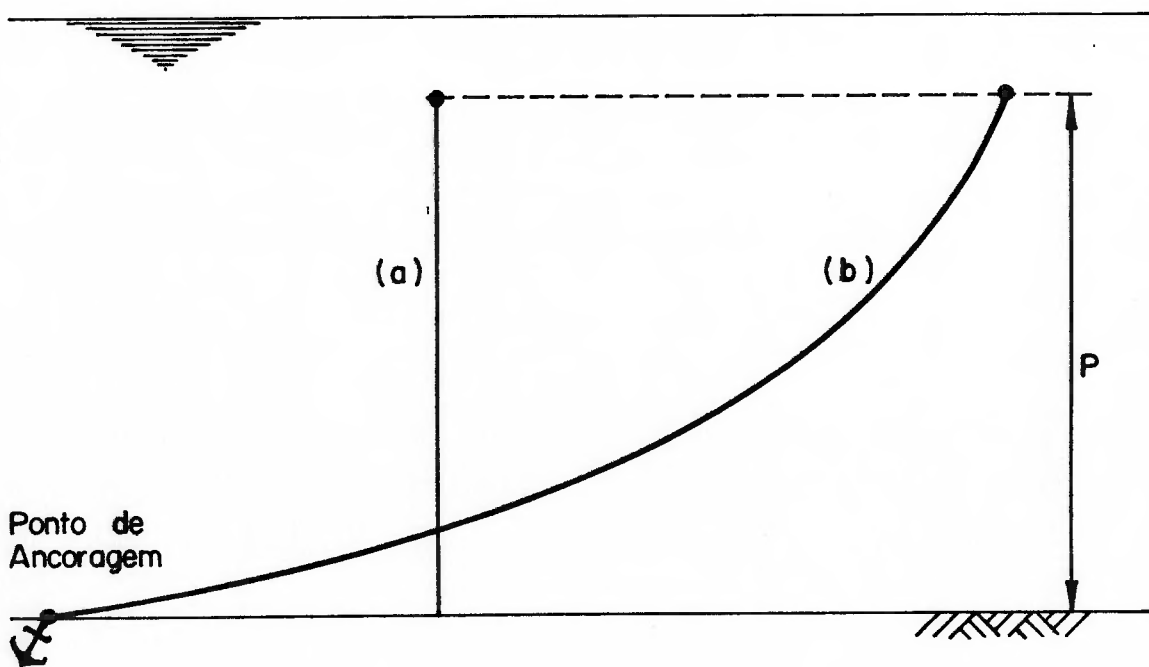


FIGURA 3.3 - CONFIGURAÇÕES LIMITES NA FORMA DE CATENÁRIA COMPLETA

Nas situações em que a plataforma fica sujeita a condições ambientais extremas, as linhas mais solicitadas do sistema de ancoragem se apresentam com configuração mais esticada. Segundo Suhara[4], nestas condições as linhas se

caracterizam por valores do parâmetro D entre os seguintes limites:

$$0,3 \leq D \leq 0,5$$

3.6 - O Efeito Elástico no Equilíbrio Estático da Linha

Na solução do equilíbrio estático apresentada no item 3.4 admitiu-se inicialmente que a linha fosse inextensível e que, portanto, o comprimento total da mesma na configuração de equilíbrio permanecesse igual ao comprimento indeformado l_1 .

No entanto os materiais empregados nas linhas evidentemente apresentam uma rigidez elástica axial finita, o que implica numa configuração de equilíbrio diferente da obtida com a hipótese da inextensibilidade. Como a tensão ao longo da linha é sempre de tração, na configuração real de equilíbrio estático a linha apresentará sempre um comprimento total l maior do que l_1 .

Em outras palavras a linha na configuração real de equilíbrio se apresentará mais frouxa do que na configuração com linha inextensível, como se ilustra na figura 3.4 a seguir. A diferença entre as configurações será tanto maior quanto menor for a rigidez elástica axial, o que implica também em valores menores de tensão ao longo da linha.

A configuração real de equilíbrio pode ser obtida através de um processo iterativo que se inicia a partir da solução obtida para a linha inextensível. Para tanto, avalia-se inicialmente a tensão média ao longo da linha que, a partir dos resultados já apresentados, pode ser obtida a-

través da seguinte expressão:

$$Fml = \frac{T \cdot lc}{l} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{D}{\sinh(2D)} \right] + \frac{H \cdot (l - lc)}{l} \quad (29)$$

No primeiro ciclo da iteração, com a linha considerada inextensível, o valor de l na equação (29) é igual a l_1 .

Com o valor da tensão média pode-se obter o comprimento total deformado da linha através da seguinte expressão:

$$ld = l_1 + \frac{Fml}{EA} \cdot l_1 \quad (30)$$

Nesta equação o termo EA representa a rigidez elástica axial da linha, que pode ser determinada através de um ensaio de tração simples ou a partir de formulações aproximadas dadas por exemplo na referência [1].

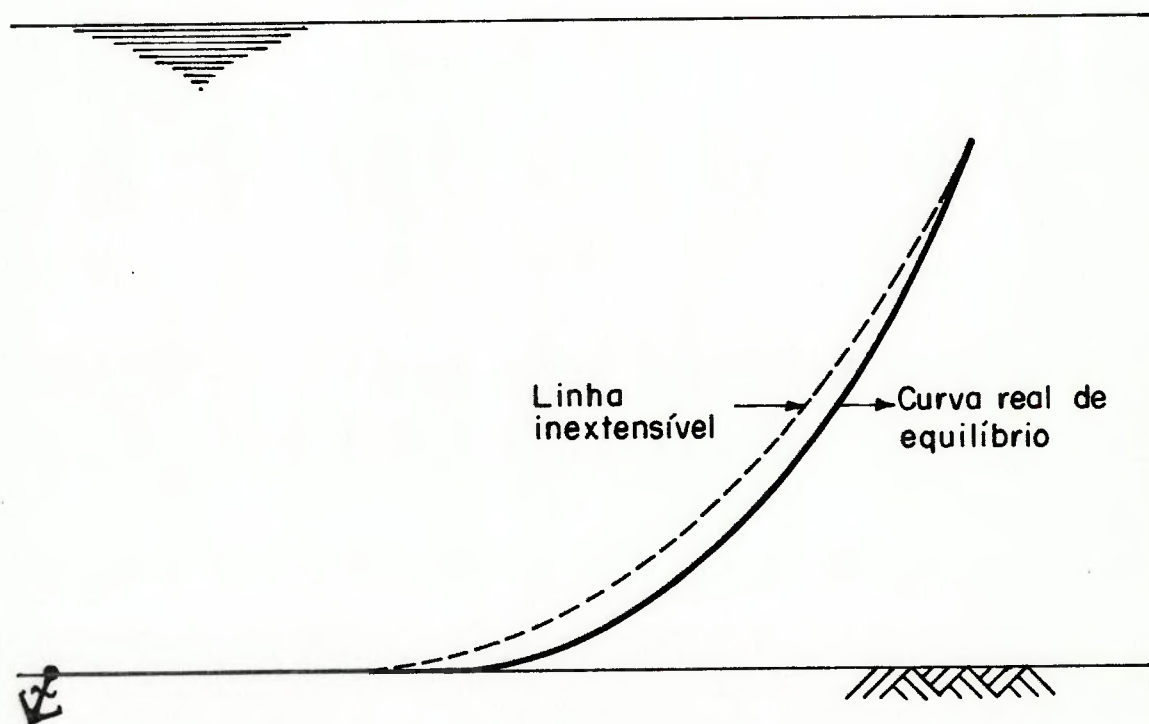


FIGURA 3.4 - EFEITO DA DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

Na equação (30) verifica-se que, quanto maior o termo EA em relação à tensão média na linha, menor será o efeito elástico na configuração de equilíbrio e a aproximação de linha inextensível torna-se mais precisa.

Com o valor de l_d da equação (30) inicia-se um novo ciclo iterativo empregando-se nas equações do item 3.4 um valor de l igual ao valor de l_d do ciclo anterior. A iteração pode ser realizada tantas vezes quantas necessárias para que a diferença entre os últimos valores de l e l_d seja inferior a um determinado erro admissível.

Nesta situação, a configuração real de equilíbrio estático apresentará uma linha com comprimento total l maior do que l_1 e valores menores de tensão ao longo de seu comprimento.

3.7 - A Resposta Quase-Estática da Linha a Deslocamentos do Ponto de Amarração

Um deslocamento qualquer do ponto de amarração de uma linha, com uma certa configuração inicial de equilíbrio, pode ser sempre interpretado como uma alteração, simultânea ou não, do raio de ancoragem e da profundidade. Em particular, no caso de deslocamentos no plano horizontal, a alteração ocorrerá apenas no raio de ancoragem da linha.

Estas alterações nos parâmetros geométricos evidentemente provocam mudanças nas condições de equilíbrio, em particular na tensão no ponto de amarração.

Supondo que estes deslocamentos ocorram de forma quase-estática, é possível determinar a variação da tensão

no ponto de amarração a partir das equações apresentadas nos itens anteriores.

A forma como esta tensão varia com os deslocamentos aplicados numa dada direção caracteriza a resposta quase-estática da linha aos deslocamentos nesta direção.

Como exemplo apresenta-se na figura 3.5 gráficos da variação da tensão no ponto de amarração e da variação da

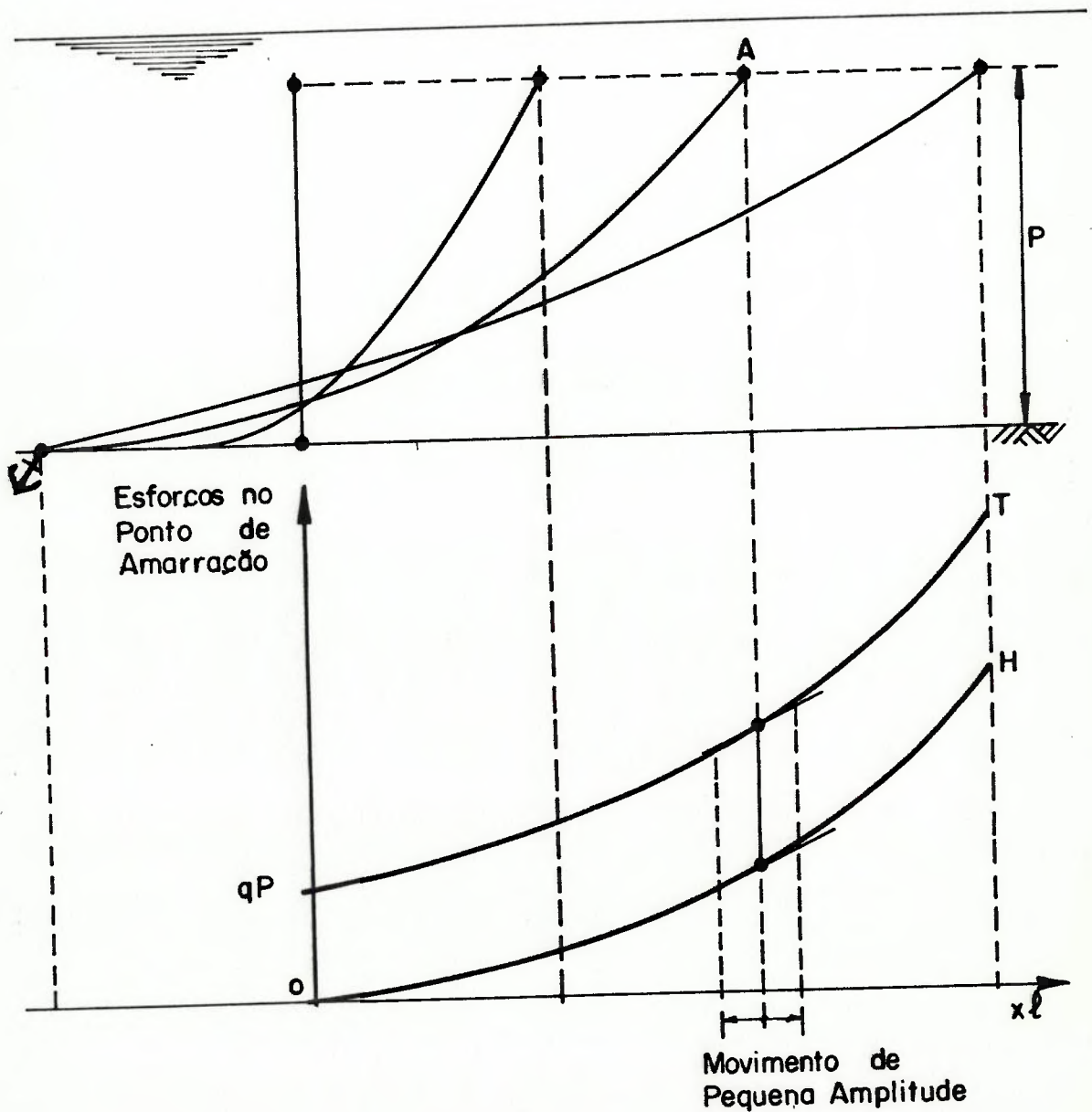


FIGURA 3.5 - VARIACÃO DOS ESFORÇOS NO PONTO DE AMARRAÇÃO

componente horizontal, para uma linha cujo ponto de amarração sofre deslocamentos horizontais no plano da linha. Estes deslocamentos equivalem a uma alteração sucessiva do raio de ancoragem da linha, entre as configurações limites definidas na figura 3.3.

Gráficos semelhantes podem ser levantados para qualquer direção de deslocamento, em particular para as outras duas direções características definidas pelos eixos coordenados, quais sejam: a direção vertical no plano da linha, caracterizando uma mudança de profundidade e a direção perpendicular ao plano da linha.

A característica mais importante desta resposta quase-estática é o fato da variação da tensão no ponto de amarração, com os deslocamentos, não ocorrer de forma linear, conforme se representa na figura 3.5. Esta característica se repete qualquer que seja a direção do deslocamento e se verifica também para as componentes horizontal e vertical da tensão no ponto de amarração.

Gráficos como os da figura 3.5 são empregados na determinação dos esforços no ponto de amarração de uma linha que, a partir de uma configuração inicial, sofra deslocamentos numa direção qualquer. Em particular, no caso de deslocamentos apenas sobre o plano horizontal, basta um único gráfico apresentando a resposta da linha a variações no raio de ancoragem.

3.7.1 - A Rigidez do Sistema de Ancoragem

A função do sistema de ancoragem é restringir os des-

locamentos da plataforma no plano horizontal, provocados pela ação das forças ambientais.

As forças ambientais que provocam este passeio no plano horizontal são em geral consideradas de natureza quase-estática, por motivos que serão apresentados no capítulo 4.

Neste caso, a resposta do sistema de ancoragem a ação destas forças sobre a plataforma pode ser determinada a partir da resposta quase-estática das linhas de amarração.

Para tanto, considere-se um deslocamento da plataforma numa certa direção no plano horizontal, a partir de uma posição qualquer de equilíbrio, provocado por uma ação ambiental, como mostra a figura 3.6.

O deslocamento da plataforma provoca mudanças no raio

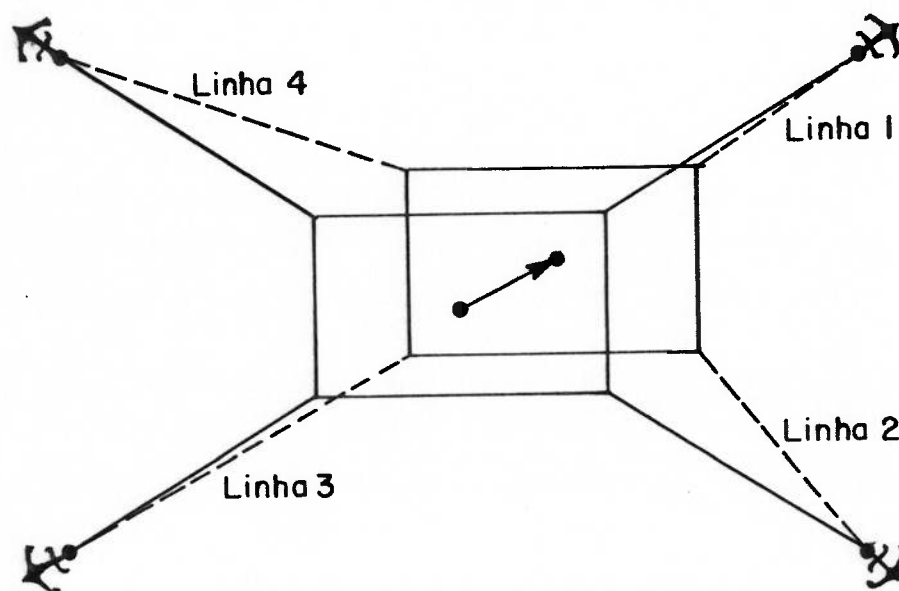


FIGURA 3.6 - EFEITO DO PASSEIO HORIZONTAL DA PLATAFORMA

de ancoragem de todas as linhas do sistema, alterando conseqüentemente o valor da componente horizontal da tensão no ponto de amarração de cada uma. A variação destes esforços pode ser determinada a partir de gráficos como os da figura 3.5.

A resultante das novas componentes horizontais, que equilibra a ação ambiental, é chamada de força de restauração do sistema de ancoragem.

Aplicando-se sucessivos deslocamentos na direção pré-estabelecida, pode-se levantar uma curva de variação da força de restauração do sistema em função destes deslocamentos horizontais. Para cada direção ao redor da plataforma pode-se levantar curvas deste tipo, que são conhecidas como "curvas de rigidez do sistema de ancoragem".

Estas curvas de rigidez permitem a determinação dos deslocamentos máximos da plataforma no plano horizontal, quando submetida às condições ambientais extremas de projeto. Comparando-se estes deslocamentos com os limites máximos de projeto avalia-se a possibilidade de emprego ou não do sistema de ancoragem estudado.

A descrição acima é na realidade um resumo do procedimento de síntese realizado na 1^a fase dos ciclos da espiral de projeto dos sistemas de ancoragem, conforme se discutiu no capítulo 1.

3.8 - A Rigidez da Linha de Amarração

Os movimentos de 1^a ordem da plataforma em torno de uma certa posição de equilíbrio, causados pela ação das on-

das, resultam evidentemente em movimentos dos pontos de amarração das linhas em torno de suas posições de equilíbrio.

Numa primeira aproximação, pode-se avaliar os efeitos destes movimentos sobre os esforços no ponto de amarração a partir do comportamento quase-estático das linhas descrito nos itens anteriores.

Como estes movimentos são em geral de pequena magnitude quando comparados com os parâmetros geométricos da linha, aqueles que ocorrem na direção perpendicular ao plano da linha não provocam alterações significativas na configuração geométrica e na tensão no ponto de amarração.

Os efeitos importantes são causados pelos movimentos que ocorrem sobre o plano da linha, que são na verdade a projeção do movimento total sobre este plano. Estes movimentos no plano podem ainda ser decompostos em dois movimentos paralelos aos eixos de coordenadas.

Para se avaliar em termos quase-estáticos estes efeitos considere-se, por exemplo, um movimento horizontal oscilatório de pequena magnitude, em torno da posição de equilíbrio "A", do ponto de amarração da linha ilustrada na figura 3.5.

Linearizando-se a resposta quase-estática da linha em torno desta posição, pode-se obter uma boa avaliação da variação dos esforços no ponto de amarração a partir das derivadas das curvas apresentadas naquela figura.

Estas derivadas são chamadas de coeficientes de rigidez da linha de amarração, que podem ser definidos para qualquer direção do movimento no plano da linha, tanto para

a tensão no ponto de amarração como para suas componentes.

O produto destes coeficientes pela amplitude do movimento fornece uma aproximação linear da variação dos esforços no ponto de amarração, que será tanto melhor quanto menor for esta amplitude.

Face ao comportamento não-linear da linha é evidente que os coeficientes de rigidez não são constantes, mas dependem da configuração em que a linha se encontra. Portanto os efeitos de um movimento idêntico, aplicado em duas configurações de equilíbrio distintas, serão também distintos.

Os coeficientes de rigidez para qualquer direção do movimento podem ser determinados a partir dos coeficientes relativos a duas outras direções quaisquer, perpendiculares entre si. Determinando-se então os coeficientes para as duas direções características no plano da linha definidas pelos eixos de coordenadas, pode-se avaliar em termos quase-estáticos a variação dos esforços no ponto de amarração, para pequenos movimentos do mesmo numa direção qualquer em torno de uma certa posição de equilíbrio.

Para tanto, a interpretação física dos mecanismos através dos quais a linha responde a estes movimentos torna mais simples a obtenção destes coeficientes, em qualquer posição de equilíbrio.

3.8.1 - Interpretação Física dos Mecanismos de Resposta da Linha de Amarração

A linha de amarração responde fisicamente a movimentos quase-estáticos de seu ponto de amarração através de

dois mecanismos distintos, que atuam simultâneamente e de forma interativa.

O primeiro deles é a mudança na curva de equilíbrio da linha, provocada pelas alterações de magnitude que os movimentos no plano da linha causam em dois dos parâmetros geométricos que determinam seu equilíbrio estático, mais precisamente na profundidade e no raio de ancoragem.

Como consequência destas mudanças geométricas os esforços no ponto de amarração também sofrem alterações. A razão entre a variação destes esforços, decorrente das mudanças geométricas, e a amplitude do deslocamento aplicado é chamada de rigidez geométrica da linha de amarração.

Na figura 3.7 ilustra-se as alterações na curva de equilíbrio da linha provocadas por um deslocamento do ponto de amarração a partir de uma posição de equilíbrio inicial.

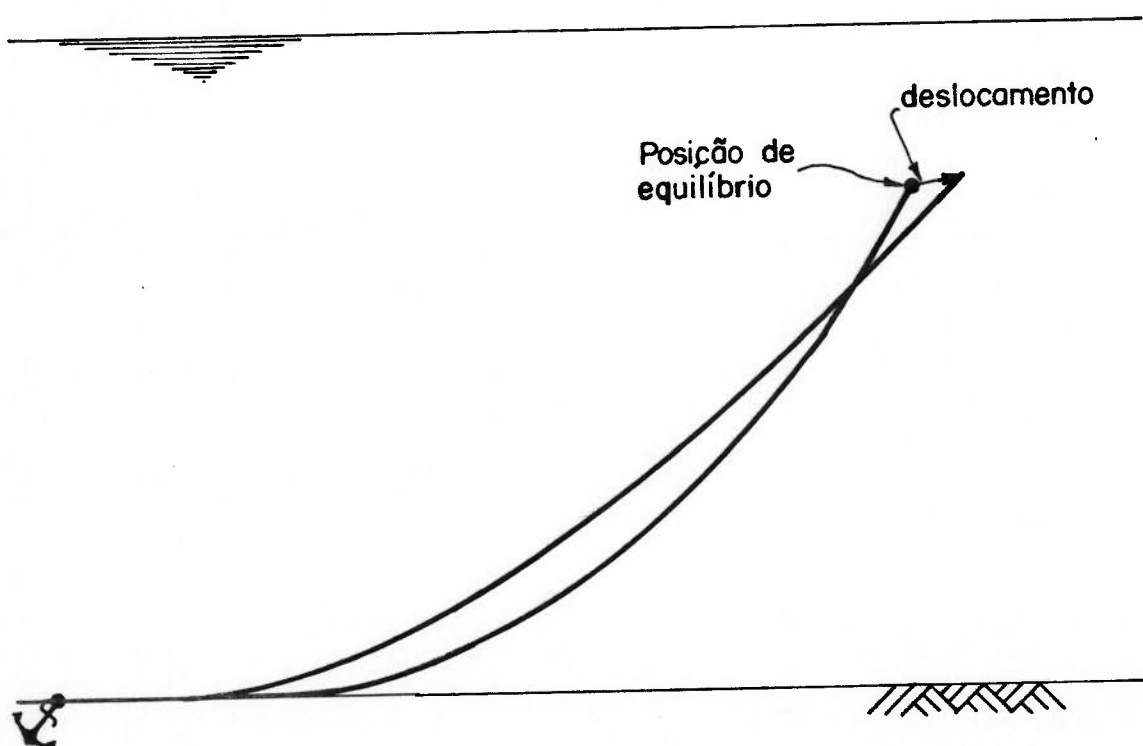


FIGURA 3.7 - EFEITO DO DESLOCAMENTO NA CURVA DE EQUILÍBRIO

A alteração dos esforços ao longo da linha como consequência do deslocamento do ponto de amarração provoca, por sua vez, deformações elásticas que alteram o comprimento total da linha, que é o terceiro parâmetro geométrico que governa seu equilíbrio estático. Logo, a curva de equilíbrio e os esforços ao longo da linha sofrerão novas alterações em função desta alteração no comprimento total.

A deformação elástica é na verdade o outro mecanismo através do qual a linha responde ao movimento de seu ponto de amarração, e depende basicamente da rigidez elástica axial da mesma.

Conclue-se portanto que o processo de mudança na curva de equilíbrio e nos esforços ocorre de forma interativa durante o movimento do ponto de amarração, através de dois mecanismos de resposta da linha que atuam simultaneamente e de forma interdependente.

Em outras palavras pode-se dizer que, uma parcela do deslocamento do ponto de amarração é absorvida por uma mudança apenas geométrica na forma da linha, como se a mesma fôsse infinitamente rígida em termos elásticos, e a outra absorvida através da deformação elástica. A ordem de grandeza destas parcelas depende da relação entre a rigidez geométrica e a rigidez elástica da linha.

Este processo sugere um modelo simples de duas molas em série para representar o mecanismo de resposta de uma linha de amarração a movimentos de seu ponto de amarração. Na figura 3.8 apresenta-se este modelo, onde uma das molas representa a rigidez geométrica e a outra a rigidez elástica da linha.



FIGURA 3.8 - MODELO DA LINHA DE AMARRAÇÃO

A rigidez equivalente deste modelo representa a rigidez da linha de amarração numa certa posição de equilíbrio. O coeficiente da rigidez equivalente pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$K = \frac{K_g \cdot K_e}{K_g + K_e} = \frac{K_g}{1 + (K_g/K_e)} = \frac{K_e}{1 + (K_e/K_g)} \quad (31)$$

Pode-se definir coeficientes de rigidez da linha tanto em termos da tensão no ponto de amarração como de suas componentes, para deslocamentos na direção dos dois eixos de coordenadas. Estes coeficientes são:

$$K_x = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (32)$$

$$K_z = \frac{\partial T}{\partial z} \quad (33)$$

$$K_{xx} = \frac{\partial H}{\partial x} \quad (34)$$

$$K_{xz} = \frac{\partial H}{\partial z} \quad (35)$$

$$K_{zx} = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (36)$$

$$K_{zz} = \frac{\partial V}{\partial z} \quad (37)$$

Os deslocamentos do ponto de amarração, implícitos

nas equações acima, representam na realidade variações na profundidade e no raio de ancoragem da configuração de equilíbrio em que a linha se encontra.

Para se obter qualquer dos coeficientes acima definidos deve-se determinar as parcelas elástica e geométrica da rigidez da linha, na configuração de equilíbrio em que ela se encontra.

3.8.2 - A Rigidez Geométrica da Linha de Amarração

Empregando-se o modelo proposto no item anterior, a rigidez geométrica da linha pode ser determinada impondo-se que, na configuração de equilíbrio em questão, a linha possua rigidez elástica infinita. Neste caso, a partir das equações dos itens 3.3 e 3.4, os seguintes resultados são obtidos:

$$\left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_G = K_{xx}_G = \frac{q \cdot \sinh(D)}{2 - 2 \cdot \cosh(D) + D \cdot \sinh(D)} \quad (38)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial z} \right|_G = K_{xz}_G = \frac{q \cdot [\cosh(D) - 1]}{2 - 2 \cdot \cosh(D) + D \cdot \sinh(D)} \quad (39)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_G = K_{zx}_G = K_{xz}_G \quad (40)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_G = K_{zz}_G = \frac{q \cdot [D \cdot \cosh(D) - \sinh(D)]}{2 - 2 \cdot \cosh(D) + D \cdot \sinh(D)} \quad (41)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_G = K_{x}_G = K_{xx}_G \quad (42)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_G = K_{z}_G = q + K_{xz}_G \quad (43)$$

3.8.3 - A Rigidez Elástica da Linha de Amarração

A rigidez elástica da linha pode ser determinada de modo semelhante à rigidez geométrica supondo-se que, para um determinado deslocamento, a linha esteja impedida de sofrer alterações em sua geometria ou curva de equilíbrio.

Neste caso, a força necessária para impor um certo deslocamento, suposto pequeno, pode ser considerada proporcional a projeção deste deslocamento na direção da tangente à linha no ponto de amarração. Esta hipótese está ilustrada na figura 3.9 a seguir.

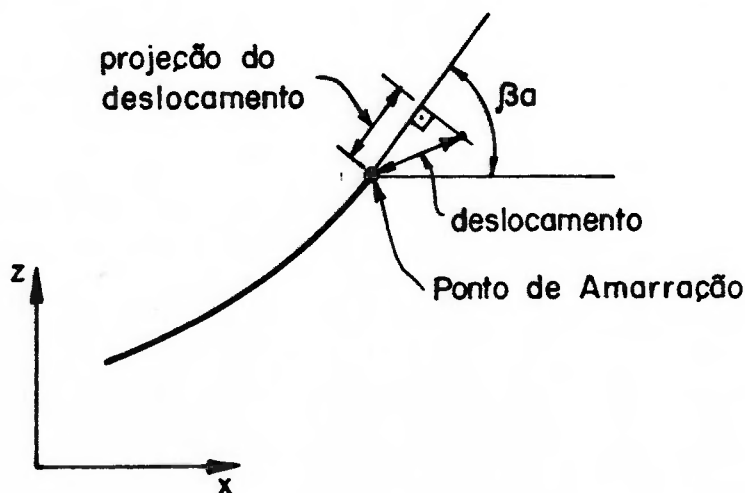


FIGURA 3.9 - DEFORMAÇÃO ELÁSTICA PROVOCADA POR DESLOCAMENTO DO PONTO DE AMARRAÇÃO

Os coeficientes de rigidez elástica para deslocamentos paralelos aos eixos de coordenadas, nas condições da hipótese acima, são dados por:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_E = Kx_E = \frac{EA}{l_1} \cdot \cos(\beta a) \quad (44)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_E = Kz_E = \frac{EA}{\ell_1} \cdot \text{sen}(\beta a) \quad (45)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_E = Kxx_E = \frac{EA}{\ell_1} \cdot \cos^2(\beta a) \quad (46)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial z} \right|_E = Kxz_E = \frac{EA}{\ell_1} \cdot \cos(\beta a) \cdot \text{sen}(\beta a) \quad (47)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_E = Kzx_E = Kxz_E \quad (48)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_E = Kzz_E = \frac{EA}{\ell_1} \cdot \text{sen}^2(\beta a) \quad (49)$$

Os coeficientes de rigidez elástica e geométrica determinados neste ítem e no anterior, quando combinados através da equação (31), fornecem a rigidez da linha em qualquer configuração de equilíbrio, para deslocamentos do ponto de amarração no plano da linha, nas direções dos eixos de coordenadas.

3.9 - Avaliação dos Deslocamentos da Linha Provocados pelos Movimentos do Ponto de Amarração

Nos ítems anteriores verificou-se em termos quase-estáticos que movimentos de pequena amplitude do ponto de amarração, em torno de uma certa posição de equilíbrio inicial, provocam alterações na curva de equilíbrio da linha. Estas alterações indicam que, a medida em que o ponto de amarração realiza tais movimentos, todos os pontos ao longo da linha também se deslocam para se acomodar às novas configurações de equilíbrio da linha.

Dependendo da frequência e amplitude destes movimen-

tos, os deslocamentos dos demais pontos ao longo da linha podem provocar o aparecimento de forças de inércia e arrasto hidrodinâmico distribuídas ao longo da mesma. Este é na realidade o efeito dinâmico sobre as linhas de amarração provocado pelos movimentos de 1^a ordem da plataforma, como será visto na capítulo 4.

É possível obter-se uma avaliação prévia destes efeitos, em termos quase-estáticos, conhecendo-se a ordem de grandeza dos deslocamentos dos pontos ao longo da linha, provocados pelos movimentos do ponto de amarração.

Esta ordem de grandeza pode ser obtida, para movimentos do ponto de amarração em torno de uma certa posição inicial de equilíbrio, determinando-se a amplitude do deslocamento do centro de gravidade dos pontos situados na parte suspensa da linha nesta condição de equilíbrio inicial. A figura 3.10 ilustra este procedimento aplicado para o caso de um deslocamento horizontal do ponto de amarração.

Os deslocamentos deste centro de gravidade podem ser determinados a partir de coeficientes de deslocamento horizontal e vertical, definidos de forma semelhante a dos coeficientes de rigidez. Assim, para deslocamentos do ponto de amarração nas direções dos eixos de coordenadas, os coeficientes de deslocamento são definidos através das seguintes equações:

$$\frac{\partial CG_x}{\partial x} = KG_{xx} \quad (50)$$

$$\frac{\partial CG_x}{\partial z} = KG_{xz} \quad (51)$$

$$\frac{\partial CG_z}{\partial x} = KG_{zx} \quad (52)$$

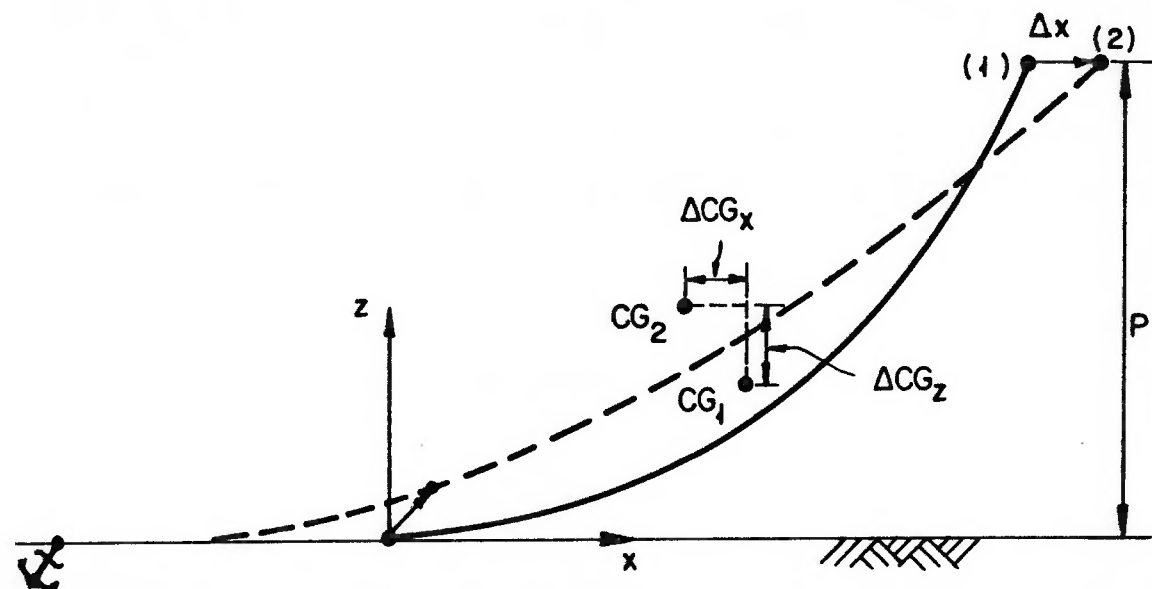


FIGURA 3.10 - DESLOCAMENTO DO CENTRO DE GRAVIDADE DA PARTE SUSPENSA DA LINHA

$$\frac{\partial CG_z}{\partial z} = KG_{zz} \quad (53)$$

Desconsiderando por simplicidade os efeitos elásticos, os coeficientes acima podem ser obtidos através das equações de equilíbrio da linha de amarração inextensível, resultando nas seguintes expressões:

$$KG_{xx} = 1 - \frac{\sinh(D) - D}{2 - 2 \cdot \cosh(D) + D \cdot \sinh(D)} \cdot \frac{\cosh(D) - 1}{\sinh(D)} \quad (54)$$

$$KG_{xz} = \frac{\cosh(D) - 1}{\sinh(D)} - \frac{D \cdot \cosh(D) - \sinh(D)}{2 - 2 \cdot \cosh(D) + D \cdot \sinh(D)} \cdot \frac{\sinh(D) - D}{\sinh(D)} \quad (55)$$

$$KG_{zx} = \frac{1}{\sinh(D)} \quad (56)$$

$$KG_{zz} = 1 \quad (57)$$

Para valores do parâmetro D entre os limites apresentados por Suhara[4] ($0,3 < D < 0,5$), representando as condições extremas de solicitação das linhas, os coeficientes acima variam entre os seguintes valores:

$$KG_{xx} = 0,009 \text{ a } 0,024$$

$$KG_{xz} = -0,050 \text{ a } -0,082$$

$$KG_{zx} = 3,284 \text{ a } 1,919$$

$$KG_{zz} = 1,0$$

Os valores acima apresentados mostram que a amplitude média dos deslocamentos dos pontos da parte suspensa da linha pode chegar a ser mais de três vezes maior do que a amplitude dos movimentos do ponto de amarração. Isto sugere que, mesmo para pequenas amplitudes destes movimentos, os efeitos dinâmicos podem ser relevantes.

Outra indicação interessante destes resultados é o fato dos deslocamentos verticais médios, representados pelos coeficientes KG_{zx} e KG_{zz} , preponderarem sobre os horizontais, representados pelos coeficientes KG_{xx} e KG_{xz} . Isto indica que, nas configurações analisadas, os pontos ao longo da linha se deslocam, de uma forma geral, preponderantemente na direção vertical, quando o ponto de amarração se movimenta em torno de sua posição de equilíbrio. Este resultado será utilizado mais adiante no desenvolvimento do

método de cálculo da resposta dinâmica das linhas.

3.10 - O Programa CATENA

O procedimento para solução do equilíbrio estático de um linha de amarração, apresentado neste capítulo, foi implementado no programa CATENA para microcomputador, desenvolvido na linguagem Pascal.

Este programa foi desenvolvido tendo em vista dois objetivos.

O primeiro era o de se desenvolver um programa para o cálculo estático de linhas de amarração que pudesse ser empregado no projeto de sistemas de ancoragem, mais precisamente na etapa de síntese destes sistemas.

O segundo objetivo era desenvolver um ferramental que auxiliasse na definição das configurações dos modelos de linha empregados nos ensaios experimentais descritos no capítulo 5. Os resultados estáticos obtidos com o programa seriam posteriormente empregados para aferir os resultados experimentais estáticos, servindo como uma indicação do funcionamento adequado da bancada de ensaios.

Os dados de entrada no programa CATENA são as características físicas da linha, definidas através de seu peso linear e sua rigidez elástica axial, e os parâmetros geométricos da configuração, definidos através da profundidade, do raio de ancoragem e do comprimento indeformado da linha.

Com estes dados o programa resolve o problema do equilíbrio estático de uma linha de amarração determinando

sua configuração de equilíbrio, os esforços no ponto de amarração e ao longo da linha e os coeficientes de rigidez e de deslocamento do centro de gravidade da parte suspensa.

Tendo em vista o desenvolvimento do trabalho, o programa está limitado ao cálculo de linhas com a configuração básica adotada, ou seja, na forma de catenária completa.

CAPÍTULO 4 - ASPECTOS PRINCIPAIS DO PROJETO DAS LINHAS DE AMARRAÇÃO

4.1 - As Solicitações Sobre o Sistema de Ancoragem e suas Linhas

As solicitações sobre um sistema de ancoragem têm duas origens principais, quais sejam: a ação ambiental direta sobre as linhas de amarração e os movimentos da plataforma provocados pela ação ambiental sobre ela.

A ação ambiental direta sobre as linhas se traduz através dos efeitos da ação das ondas e da correnteza marítima sobre cada uma das linhas do sistema.

A ação das ondas está restrita ao trecho das linhas próximo à superfície e seu efeito é pequeno quando comparado ao das outras formas de solicitação, não sendo em geral considerado no dimensionamento das mesmas.

O efeito da correnteza aparece através de forças de arrasto hidrodinâmico, distribuídas ao longo das linhas, que dependem do perfil de velocidades desta correnteza, dos coeficientes de arrasto característicos do material das linhas e da configuração geométrica das mesmas. As normas de um modo geral não exigem a inclusão deste efeito direto da correnteza no dimensionamento das linhas, admitindo que os mesmos estejam cobertos pelos coeficientes de segurança adotados. Ainda assim, alguns métodos computacionais mais sofisticados, empregados no dimensionamento dinâmico das linhas, permitem a inclusão destes efeitos no cálculo dos esforços atuantes sobre elas.

As solicitações mais relevantes sobre as linhas são aquelas causadas pelos movimentos da plataforma.

Estes movimentos são provocados pelas forças que resultam da ação dos ventos, correnteza e ondas sobre a plataforma que, por sua vez, dependem da intensidade e direção da ação ambiental e da geometria da plataforma.

Os movimentos da plataforma causam modificações nas configurações das linhas que resultam na alteração dos esforços atuantes nos pontos de amarração de cada uma, como se viu no capítulo 3. Dependendo da natureza dos movimentos, efeitos dinâmicos podem ser introduzidos na resposta das linhas, resultando numa amplificação dinâmica destes esforços que pode ser relevante para o dimensionamento das mesmas.

Do ponto de vista da resposta das linhas, a natureza dos movimentos da plataforma - se quase-estáticos ou dinâmicos - depende da forma como se considera cada um dos tipos de ação ambiental e dos efeitos destes sobre a plataforma ancorada.

4.2 - As Forças Ambientais e os Movimentos da Plataforma

As forças resultantes dos três tipos de ação ambiental e seus efeitos sobre a plataforma devem ser avaliados e combinados para se estabelecer as solicitações de projeto sobre o sistema de ancoragem.

As características destas solicitações dependem das hipóteses normalmente assumidas no projeto de sistemas de ancoragem, sobre as características e os efeitos sobre a

plataforma de cada tipo de ação ambiental. Uma descrição destas hipóteses para cada tipo de ação ambiental está apresentada a seguir.

4.2.1 - A Correnteza Marítima

A correnteza marítima, encontrada no local de operação, atua sobre a porção submersa da plataforma resultando no aparecimento de uma força de arrasto hidrodinâmico paralela ao plano horizontal, cuja intensidade depende da geometria da plataforma, da direção de incidência e do perfil de velocidades da correnteza.

Admite-se em geral que, durante a ocorrência de uma certa condição ambiental, a direção e o perfil de velocidades da correnteza permaneçam constantes, pelo menos por períodos de tempo suficientemente maiores do que o tempo de resposta da plataforma ancorada à força resultante desta ação.

Esta hipótese permite que se trate as forças de correnteza como constantes no projeto de sistemas de ancoragem.

A ação desta força constante provoca o deslocamento da plataforma até uma nova posição no plano horizontal, onde a mesma é equilibrada pela força de restauração do sistema de ancoragem.

4.2.2 - O Vento

O vento associado a uma certa condição ambiental atua

sobre a porção emersa da plataforma, resultando numa força de arrasto aerodinâmico paralela ao plano horizontal, cuja intensidade depende também da geometria da plataforma, da direção de incidência e do perfil de velocidades do vento.

Da mesma forma que para a correnteza, admite-se em geral que a força do vento seja constante durante a ação de uma determinada condição ambiental. O efeito em termos de deslocamento da plataforma é também idêntico ao caso da correnteza.

4.2.3 - As Ondas

As ondas são o principal tipo de ação ambiental sobre a plataforma, do ponto de vista do projeto do sistema de ancoragem. A ação delas provoca o aparecimento de dois tipos de força sobre a plataforma: as forças de 1ª ordem e as forças de 2ª ordem.

As forças de 1ª ordem oscilam com a frequência das ondas e provocam os conhecidos movimentos de 1ª ordem da plataforma: "surge", "sway", "heave", "pitch", "roll" e "yaw". Estes movimentos são considerados independentes da presença do sistema de ancoragem quando a plataforma se encontra em águas profundas e, de um modo geral, suas amplitudes são pequenas quando comparadas às dimensões dos parâmetros geométricos das linhas.

Os movimentos de 1ª ordem são causadores de uma parcela significativa dos esforços totais que agem nas linhas de amarração, devido aos efeitos dinâmicos que podem introduzir nas respostas das mesmas.

As forças de 2^a ordem se constituem de duas parcelas: uma parcela constante e uma parcela que oscila com frequência inferior a das ondas.

A parcela constante é chamada de força de deriva média e, para um determinado estado de mar, seu efeito é idêntico ao do vento e da correnteza, ou seja, provoca o deslocamento da plataforma para uma nova posição de equilíbrio no plano horizontal.

A parcela variável é conhecida como força de deriva variável e provoca os movimentos de 2^a ordem da plataforma, também chamados de movimentos de baixa frequência.

A força de deriva variável é de um modo geral muito pequena quando comparada às forças de 1^a ordem, o que faz com que seus efeitos sejam relevantes para o sistema de ancoragem apenas em termos de movimentos no plano horizontal, que são aqueles não afetados pela restauração hidrostática da plataforma.

4.3 - A Resposta do Sistema de Ancoragem aos Movimentos da Plataforma

A incidência da correnteza, do vento e das ondas sobre a plataforma causa o aparecimento de três forças constantes sobre a mesma, paralelas ao plano horizontal: a força de arrasto hidrodinâmico, a força de arrasto aerodinâmico e a força de deriva média.

Para uma certa condição ambiental estas forças devem ser avaliadas separadamente e depois somadas para fornecer a resultante das forças ambientais constantes, chamada de

força ambiental média.

No projeto do sistema de ancoragem admite-se que a ação desta força ambiental média ocorra de forma quase estática, resultando num deslocamento estático da plataforma no plano horizontal, chamado de deslocamento médio associado a condição ambiental aplicada. A magnitude deste deslocamento é função da rigidez do sistema de ancoragem na direção em que ocorre a ação ambiental.

Quando submetida a esta solicitação a plataforma permanece em equilíbrio numa nova posição no plano horizontal, com a força de restauração equilibrando a força ambiental média, conforme o que foi discutido no item 3.7.1 do capítulo 3. A figura 4.1 ilustra a resposta da plataforma a esta força ambiental média.

A resposta das linhas de amarração ao deslocamento médio pode ser determinada através de métodos quase-estáticos semelhantes ao discutido no capítulo anterior, dada a natureza quase-estática admitida para este deslocamento. Esta resposta se traduz na determinação das tensões estáticas nos pontos de amarração de todas as linhas, na nova posição de equilíbrio.

A ação das ondas sobre a plataforma resulta ainda nas forças de 1^a ordem e na força de deriva variável.

As forças de deriva variável provocam um movimento oscilatório da plataforma em torno da nova posição de equilíbrio. A amplitude deste movimento de 2^a ordem depende da rigidez do sistema de ancoragem nesta posição de equilíbrio e do amortecimento viscoso sobre a plataforma e sobre os equipamentos e linhas que se ligam ao solo marinho.

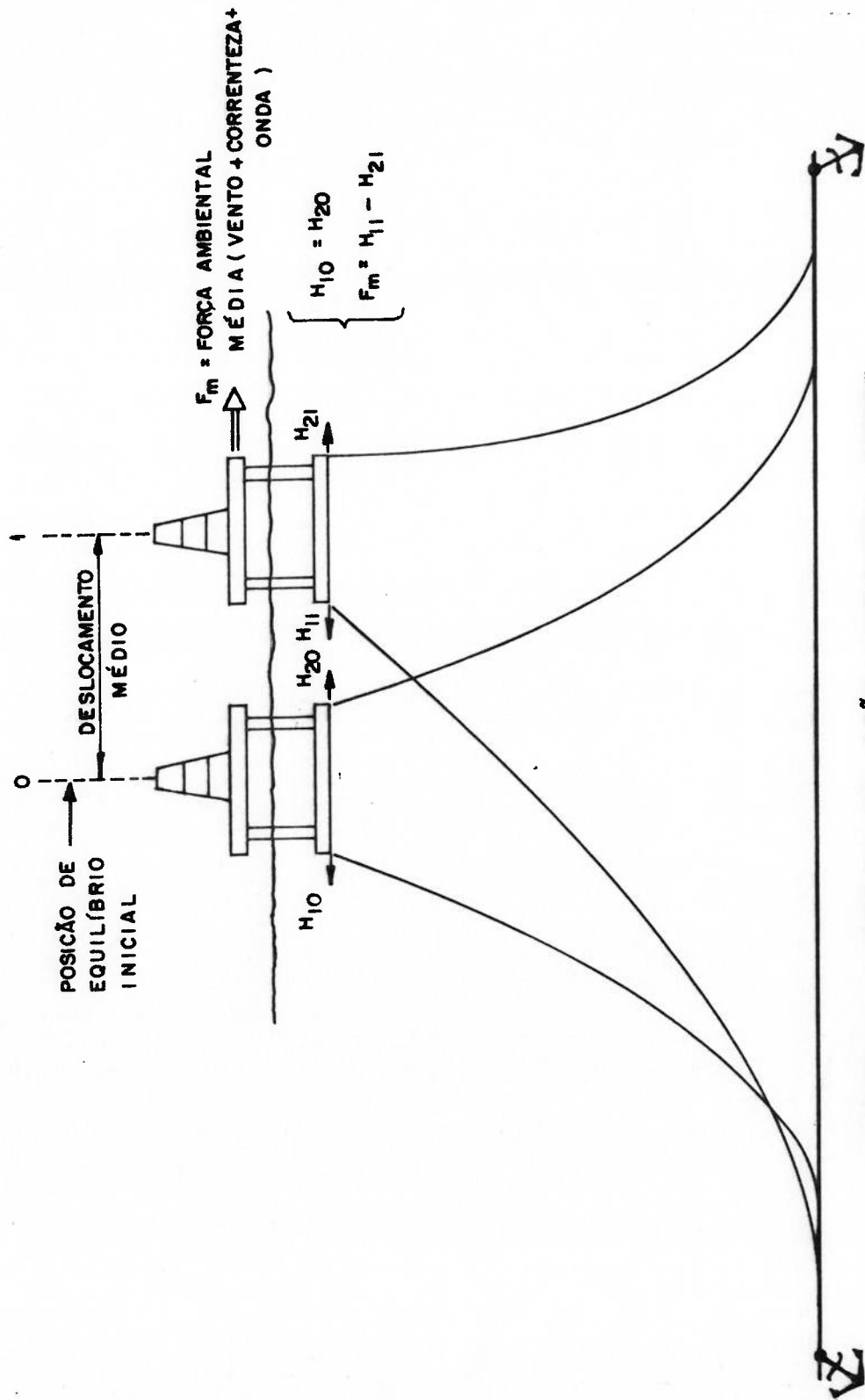


FIGURA 4.1 - EFEITO DA AÇÃO AMBIENTAL SOBRE A PLATAFORMA

Como a frequência dos movimentos de 2^a ordem em geral é bastante inferior a frequência das ondas, admite-se que a resposta das linhas a tais movimentos seja também de natureza quase-estática e portanto possível de ser determinada através dos métodos descritos no capítulo anterior.

As forças de 1^a ordem provocam os movimentos de 1^a ordem da plataforma que resultam em movimentos de mesma natureza nos pontos de amarração de cada linha do sistema.

Face a pequena magnitude dos movimentos de 1^a ordem, os efeitos mais relevantes sobre as linhas decorrem do movimento resultante no plano de cada uma, já que a alteração causada em suas configurações por movimentos perpendiculares a este plano é insignificante.

Como se viu no capítulo anterior, pequenos movimentos do ponto de amarração no plano da linha podem provocar alterações significativas em sua configuração geométrica, implicando em movimentos de todos os pontos ao longo da mesma.

Dependendo da amplitude e frequência dos movimentos de 1^a ordem, os movimentos resultantes nos demais pontos da linha podem causar o aparecimento de forças de inércia e arrasto hidrodinâmico distribuídas ao longo da mesma, conforme ilustra-se na figura 4.2 a seguir.

Estas forças caracterizam um carregamento dinâmico sobre as linhas e, como consequência, os esforços no ponto de amarração ficam sujeitos a amplificação dinâmica, o que pode resultar em tensões máximas com valores bem superiores aos obtidos através de métodos quase-estáticos semelhantes ao descrito no item 3.8.

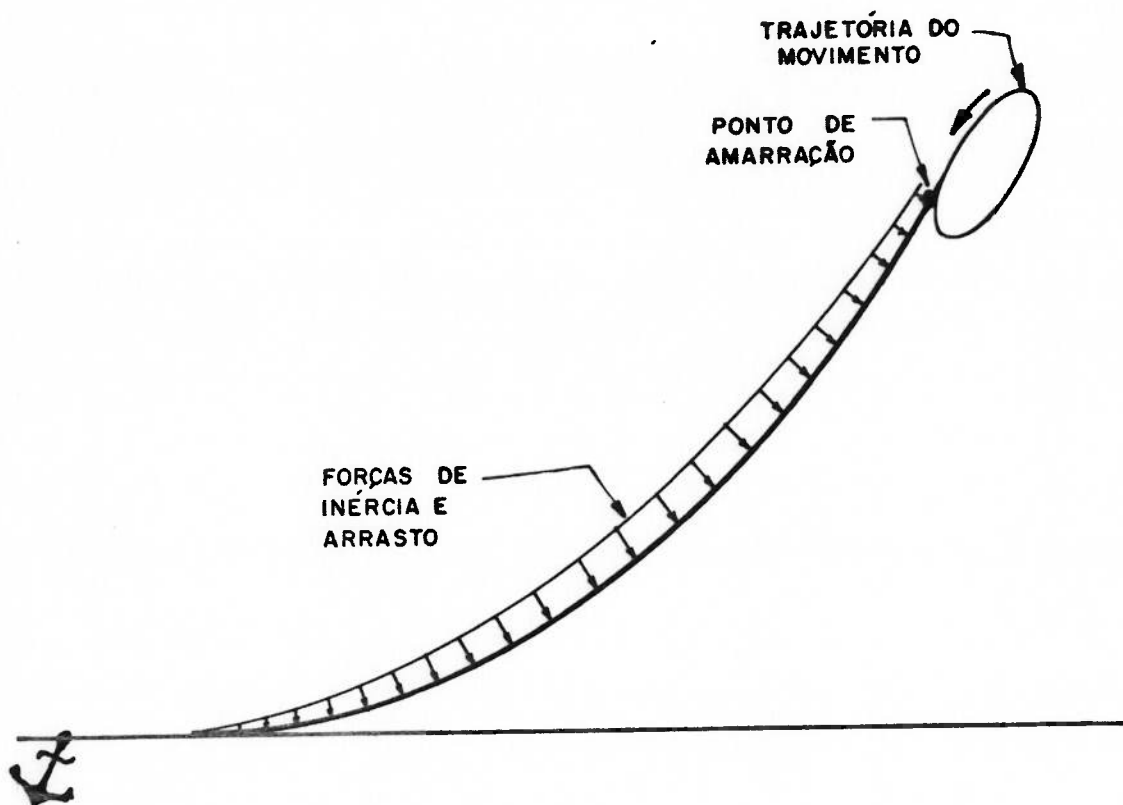


FIGURA 4.2 - EFEITO DOS MOVIMENTOS DE 1ª ORDEM

Assim, para um dimensionamento seguro das linhas, a resposta aos movimentos de primeira ordem do ponto de amarração deve necessariamente ser determinada através de uma análise dinâmica.

Esta forma de se tratar as solicitações devidas aos movimentos de 1ª é que diferencia os métodos atuais de projeto dos métodos clássicos. Nos métodos clássicos admite-se também que, as respostas das linhas a estes movimentos sejam de natureza quase-estática e todo o dimensionamento é feito com base em procedimentos semelhantes ao descrito no capítulo anterior.

Portanto, para uma dada condição ambiental, conhecendo-se a resposta das linhas a combinação do deslocamento médio da plataforma com os movimentos de 1ª e 2ª ordem, pode-se determinar a tensão máxima resultante em cada uma para posterior comparação com as tensões admissíveis de projeto.

Evidentemente que, os três efeitos da ação ambiental sobre a plataforma descritos acima não ocorrem de forma isolada e independente e portanto, um método exato para cálculo da resposta das linhas deveria considerá-los simultaneamente durante a ocorrência da condição ambiental estudada.

No entanto, um procedimento desta natureza seria extremamente trabalhoso, senão inviável tecnicamente, face a complexidade do problema a ser modelado.

No caso do projeto de linhas de amarração admite-se que as respostas das mesmas às três formas de solicitação possam ser avaliadas independentemente umas das outras e depois combinadas para fornecer a tensão total nas linhas.

Esta hipótese é bastante razoável quando se verifica que as escalas de tempo que caracterizam o deslocamento médio e os movimentos de 1ª e 2ª ordem da plataforma são muito discrepantes durante a ocorrência de uma certa condição ambiental.

Os procedimentos usualmente adotados para dimensionar as linhas de amarração estão calcados basicamente nesta hipótese, como se verá a seguir.

4.4 - O Procedimento para Dimensionamento das Linhas de Amarração

O projeto de um sistema de ancoragem está centrado basicamente na determinação da resposta do mesmo às condições ambientais extremas de projeto e na avaliação da vida em fadiga das linhas.

Normalmente as respostas às condições extremas é que governam o projeto do sistema e de suas linhas. Estas respostas se traduzem através da avaliação dos esforços máximos nas linhas, dos deslocamentos máximos da plataforma, dos esforços máximos nas âncoras e dos comprimentos suspensos das linhas nas condições extremas.

Do ponto de vista do dimensionamento mecânico das linhas, que é o objeto deste trabalho, a principal avaliação a ser feita é dos esforços máximos atuantes nas condições extremas de projeto.

Para este dimensionamento as normas de um modo geral estabelecem critérios e procedimentos bastante semelhantes para definir e avaliar as condições ambientais extremas, os esforços máximos nas linhas e os esforços admissíveis. O mesmo ocorre para as demais variáveis do projeto citadas acima.

Para permitir uma visão geral do projeto das linhas apresenta-se a seguir uma breve descrição deste critérios e procedimentos, baseada nas recomendações da API[2]. Esta descrição contempla basicamente os aspectos relevantes para o cálculo dos esforços máximos nas linhas.

4.4.1 - O Critério Ambiental

As solicitações sobre o sistema de ancoragem são determinadas pelas condições ambientais adotadas no projeto, tanto para o dimensionamento mecânico como para avaliação da vida em fadiga das linhas.

O projeto das linhas é normalmente governado pela a-

valiação das respostas às solicitações causadas pela chamada "condição ambiental extrema de projeto". Esta condição extrema é definida como a combinação de vento, correnteza e onda para qual o sistema de ancoragem é projetado para suportar.

Na maioria das normas esta condição ambiental extrema é determinada pelas intensidades de vento, correnteza e onda presentes numa tempestade com período de retorno de 100 anos, compatível com o local de operação da plataforma. Estas intensidades são especificadas através de um perfil de velocidades do vento, de um perfil de velocidades da correnteza e de um espectro de energia do estado de mar, com seus valores característicos perfeitamente definidos.

A especificação destas intensidades deve levar em consideração as relações de interação existentes entre os três tipos de ação ambiental no local de operação, de modo a não se estabelecer condições excessivamente conservadoras para o projeto.

Neste caso a consideração destas relações de interação pode levar à necessidade de se ter que investigar diversas combinações de intensidade de vento, correnteza e ondas, caracterizadas por um período de retorno de 100 anos, até se estabelecer aquela combinação que provoca a maior solicitação sobre o sistema de ancoragem.

Para se estabelecer esta solicitação extrema admite-se normalmente que os três tipos de ação ambiental incidam conjuntamente na direção, ou direções, em relação à plataforma que resulte na maior força ambiental média sobre ela.

Uma vez definida a condição ambiental extrema de pro-

jeto determina-se as magnitudes e demais características das solicitações de projeto sobre o sistema de ancoragem, quais sejam; o deslocamento médio e os movimentos da 1ª e 2ª ordem da plataforma.

4.4.2 - Avaliação dos Esforços Máximos nas Linhas

De um modo geral a tensão máxima numa linha de amarração ocorre em seu ponto de amarração.

O cálculo desta tensão máxima de projeto baseia-se na hipótese de que as respostas das linhas às três formas de solicitação de projeto podem ser determinadas isoladamente e depois combinadas para fornecer o valor desta tensão.

As recomendações de projeto da API[2] sugerem que a tensão máxima na linha seja definida como a soma da tensão estática atuante após o deslocamento médio da plataforma, com uma combinação apropriada das tensões devidas aos movimentos de 1ª e 2ª ordem do ponto de amarração.

Para avaliação da tensão máxima emprega-se as seguintes definições:

T_{max} = tensão máxima na linha

T_c = tensão na linha devida ao deslocamento médio

T_{1max} = amplitude máxima da tensão devida aos movimentos de 1ª ordem

T_{1sig} = amplitude significativa da tensão devida aos movimentos de 1ª ordem

T_{2max} = amplitude máxima da tensão devida aos movimentos de 2ª ordem

T_{2sig} = amplitude significativa da tensão devida aos movimentos de 2^a ordem

A tensão máxima na linha é então calculada através do seguinte procedimento:

a) Se $T_{2max} > T_{1max}$ então:

$$T_{max} = T_c + T_{2max} + T_{1sig} \quad (58)$$

b) Se $T_{1max} > T_{2max}$ então:

$$T_{max} = T_c + T_{2sig} + T_{1max} \quad (59)$$

Os valores máximos e significativos das tensões devidas aos movimentos de 1^a e 2^a ordem devem ser determinados a partir de uma análise estatística das respostas características destas tensões. Segundo a API[2] estes valores podem ser calculados a partir do desvio padrão (RMS) das respostas, aplicando-se as seguintes equações:

$$\text{Valores Significativos} = 2 \cdot (\text{RMS}) \quad (60)$$

$$\text{Valores Máximos} = \sqrt{2 \cdot \ln(\Omega_t / \Omega_m)} \cdot (\text{RMS}) \quad (61)$$

onde: Ω_t = tempo de duração da tempestade (seg)
 Ω_m = período médio entre cruzamentos ascendentes da tensão oscilatória (seg)

As tensões devidas ao deslocamento médio e aos movimentos de 2^a ordem podem ser calculadas através de métodos quase-estáticos semelhantes ao descrito no capítulo 3. As

tensões devidas aos movimentos de 1ª ordem devem ser calculadas através de uma análise dinâmica da resposta das linhas.

4.4.3 - As Tensões Admissíveis

O critério de projeto sugerido pela API[2] define as tensões admissíveis nas linhas de amarração para duas condições de operação do sistema de ancoragem: a "condição intacta" e a "condição avariada".

A condição intacta ocorre quando todas as linhas do sistema operam sem dano algum. Nesta situação impõem-se que, na condição extrema de projeto, a tensão máxima na linha mais carregada do sistema não ultrapasse 60% de sua tensão nominal de ruptura.

A condição avariada é aquela na qual o sistema opera com uma de suas linhas rompidas. Nesta situação, na condição extrema de projeto, a tensão máxima na linha mais carregada não deve ultrapassar 75% de sua tensão nominal de ruptura.

O procedimento para se calcular a tensão máxima na linha mais carregada, em ambas as condições acima definidas, é exatamente o mesmo e está resumido no item seguinte.

4.4.4 - O Procedimento para Cálculo da Resposta das Linhas

O procedimento para cálculo da resposta das linhas às condições extremas de projeto pode ser subdividido nas diversas fases resumidas a seguir.

- 1) Estabelecer as condições ambientais extremas de projeto
- 2) Determinar as características gerais do sistema de ancoragem, tais como: número e posição das linhas; características físicas e configuração geométrica das linhas; etc.
- 3) Determinar a força ambiental média sobre a plataforma
- 4) Determinar o deslocamento médio da plataforma, empregando métodos quase-estáticos.
- 5) Determinar os movimentos de 2^a ordem e suas amplitudes características em torno da posição de equilíbrio assumida após o deslocamento médio. Empregar também métodos quase-estáticos.
- 6) Determinar os movimentos de 1^a ordem da plataforma e os movimentos resultantes nos pontos de amarração de cada linha. Determinar as amplitudes características destes movimentos.
- 7) Determinar o deslocamento máximo da plataforma no plano horizontal e o comprimento suspenso máximo das linhas, empregando os resultados anteriores e um procedimento quase-estático. Nesta fase completa-se a primeira etapa do ciclo da espiral de projeto.
- 8) Determinar as tensões máximas nas linhas mais carregado sistema, através de um cálculo dinâmico das respostas aos movimentos de 1^a ordem. Este cálculo deve seguir os seguintes passos:
 - a- Deslocar a plataforma para a posição correspondente ao deslocamento médio somado à amplitude significativa do movimento de 2^a ordem. Calcular a ten-

são estática nas linhas nesta posição. Esta tensão estática é representada por T_0 . Aplicar no ponto de amarração da linha mais carregada os movimentos de 1ª ordem projetados no plano da linha. Calcular a resposta da linha através de uma análise dinâmica. Determinar a tensão máxima através das equações (59) e (61), onde:

$$T_0 = T_C + T_{2sig} \quad (62)$$

b- Deslocar a plataforma para a posição correspondente ao deslocamento médio somado a amplitude máxima do movimento de 2ª ordem. Calcular nesta posição a tensão estática T_0 nas linhas. Aplicar no ponto de amarração da linha mais carregada os movimentos de 1ª ordem projetados no plano desta linha e calcular a resposta através de uma análise dinâmica. Determinar a tensão máxima através das equações (58) e (60), onde:

$$T_0 = T_C + T_{2max} \quad (63)$$

- c- Comparar as tensões máximas obtidas nos passos a e b e selecionar o maior valor. A carga máxima nas âncoras pode ser determinada da mesma maneira.
- 9) Comparar as respostas obtidas com os critérios de projeto. Se os mesmos não forem satisfeitos, modificar o sistema de ancoragem e repetir a análise, iniciando um novo ciclo da espiral de projeto.

4.5 - O Cálculo da Resposta Dinâmica das Linhas

No dimensionamento de linhas de amarração a fase mais trabalhosa é aquela que envolve o cálculo dinâmico da resposta aos movimentos de 1^a ordem.

A resposta às solicitações provenientes do deslocamento médio e dos movimentos de 2^a ordem podem ser avaliadas em termos quase-estáticos. Neste caso, a maior simplicidade do comportamento estático das linhas permite rápidas avaliações do sistema de ancoragem e de modificações eventualmente introduzidas.

No entanto, para o cálculo da tensão total deve-se acrescentar ainda as tensões provenientes da resposta aos movimentos de 1^a ordem. Caso as tensões máximas obtidas superem os valores admissíveis deve-se introduzir modificações no sistema de ancoragem para adequá-lo aos critérios de projeto. É neste momento que o projetista deve dispor de conhecimentos sobre o comportamento dinâmico das linhas para que as modificações no sistema não sejam introduzidas de forma incoerente ou aleatória, ou ainda baseadas apenas em avaliações quase-estáticas.

O desconhecimento deste comportamento pode redundar num longo processo de tentativa e erro até a obtenção de uma solução que satisfaça os critérios de projeto que, provavelmente, não será a melhor entre todas as possíveis.

Este é um aspecto do projeto que deve merecer sempre atenção especial, muito embora se disponha hoje de métodos bastante precisos para calcular a resposta dinâmica das linhas aos movimentos de 1^a ordem.

Estes métodos são de natureza computacional e a maioria é desenvolvida com base no método dos elementos finitos.

A equação matricial de equilíbrio dinâmico, resultante deste tipo de modelagem do problema, incorpora os principais efeitos dinâmicos devidos a inércia da linha, ao amortecimento viscoso e a aceleração do fluido que cerca a linha.

Na resolução desta equação emprega-se uma das duas formas clássicas de se obter a solução numérica deste tipo de equação que são: a análise no domínio do tempo e a análise no domínio da frequência.

Ambas as formas de solução são de um modo geral aceitas pelas normas das Sociedades Classificadoras. O que as distingue são as diferenças no tratamento dado às características não-lineares presentes no problema dinâmico das linhas de amarração.

A análise no domínio do tempo permite que as principais características não-lineares sejam incorporadas na solução do problema. No entanto, como consequência, para a obtenção da resposta deve-se resolver a equação de equilíbrio em inúmeros instantes de tempo, separados por intervalos de tempo ("time steps") adequados, até que se obtenha o histórico das tensões durante um período de tempo suficiente para permitir uma análise estatística confiável.

Em geral, associados a este tipo de análise ocorrem problemas numéricos de estabilidade e convergência da solução da equação dinâmica que, para serem superados, exigem intervalos de tempo menores entre duas soluções conse-

cutivas, resultando em tempo de processamento e custo elevados.

A análise no domínio da frequência é essencialmente linear e portanto, para ser empregada, exige a eliminação das não-linearidades do problema através de linearizações que as representem adequadamente.

Neste tipo de análise determina-se a função de transferência das tensões na linha que, combinada com o espectro das amplitudes do movimento do ponto de amarração, fornece o espectro das tensões e os valores estatísticos associados. Esta solução é mais simples do que a análise no domínio do tempo e não apresenta dificuldades numéricas acentuadas, o que redundará num cálculo mais rápido e barato.

A escolha de uma ou outra forma de solução para o problema dinâmico depende do grau de influência das características não-lineares sobre a resposta das linhas.

O estudo destas características e de como elas atuam sobre o comportamento dinâmico das linhas pode auxiliar na avaliação prévia das condições operacionais onde seus efeitos sejam significativos. Nestas condições a análise dinâmica não deve ser realizada através de métodos lineares, sob pena de se obter resultados pouco confiáveis.

As principais características não-lineares presentes no problema dinâmico das linhas de amarração são analisadas no próximo item.

Embora os métodos computacionais possam fornecer resultados numéricos bastante precisos estes, por si só, não indicam quais modificações devem ser introduzidas nos parâmetros das linhas e do sistema durante a espiral de

projeto, para se obter uma solução que satisfaça os critérios de projeto.

Portanto, o cálculo da resposta dinâmica não deve ser encarado apenas como a determinação de um resultado numérico mas, também, como uma ferramenta que, aliada ao conhecimento do comportamento dinâmico das linhas, permite a busca da melhor configuração do sistema entre aquelas que satisfazem os critérios de projeto.

Neste contexto é interessante que o projetista, além de dispor de conhecimentos básicos sobre o comportamento dinâmico das linhas, possa contar também com métodos mais simples, mas confiáveis, para o cálculo da resposta dinâmica. Estas condições permitiriam uma rápida avaliação das alternativas de configuração do sistema e das modificações introduzidas ao longo da espiral de projeto. Nos ciclos finais os cálculos passariam a ser realizados através de métodos mais precisos, apenas para pequenos ajustes no sistema e para garantir a satisfação dos critérios de projeto.

O presente trabalho está orientado basicamente por esta forma de se encarar o projeto das linhas de amarração.

O estudo experimental objetiva justamente oferecer subsídios para se determinar as características do comportamento dinâmico das linhas e quais os principais fatores e parâmetros que governam este comportamento. No capítulo 7, com base neste estudo experimental, propõem-se um método simples, no domínio da frequência, para o cálculo dinâmico das tensões máximas devidas aos movimentos de 1^a ordem, para ser empregado nos ciclos iniciais do projeto.

4.6 - Características Não-Lineares do Problema Dinâmico

O problema dinâmico das linhas de amarração apresenta características não-lineares que podem provocar efeitos importantes na resposta aos movimentos de 1ª ordem.

O estudo do comportamento dinâmico das linhas deve procurar avaliar estes efeitos e determinar em quais situações os mesmos tem uma influência preponderante sobre a resposta dinâmica.

Esta avaliação é fundamental para que se possa ter confiabilidade no emprego de métodos de cálculo simplificados ou de métodos de cálculo no domínio da frequência.

As principais características não-lineares presentes no problema dinâmico das linhas de amarração são as seguintes:

a) Arrasto viscoso

O movimento da linha dentro da água provoca o aparecimento de forças de arrasto viscoso ao longo da mesma que são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa entre o fluido e a linha, caracterizando portanto um carregamento não-linear. No caso de análises no domínio do tempo este efeito não-linear pode ser perfeitamente modelado. No caso de análises no domínio da frequência deve-se proceder uma substituição desta relação quadrática por uma relação linear equivalente.

b) Não-linearidade geométrica

Os movimentos de 1ª ordem do ponto de amarração podem

provocar alterações significativas na configuração geométrica da linha de amarração. Estas alterações provocam mudanças na massa adicional, nas forças viscosas e na rigidez da linha, caracterizando portanto um efeito não-linear. No caso de uma análise no domínio do tempo todos estes parâmetros podem ser atualizados em cada instante de tempo da simulação. No domínio da frequência, entretanto, assume-se que os deslocamentos dinâmicos sejam pequenas perturbações em torno da configuração estática de equilíbrio inicial e todos estes parâmetros são determinados apenas para esta configuração e considerados invariantes com a posição da linha. Esta linearização em torno da posição estática de equilíbrio inicial é aceitável apenas para pequenos deslocamentos do ponto de amarração.

c) Atrito com o fundo

A interação entre o trecho apoiado da linha e o solo marinho provoca o aparecimento de forças de atrito na mesma, que são de natureza não-linear. Além disto, os movimentos da linha provocam uma constante alteração no comprimento do trecho apoiado, causando uma interação desta não-linearidade com a geométrica. Este efeito de atrito com o solo pode ser bastante importante tanto na avaliação dos esforços máximos nas linhas como no dimensionamento das âncoras. Entretanto é um efeito de difícil modelagem mesmo em análises no domínio do tempo, sendo em geral representado por

modelos bastante simplificados.

Outros tipos de não-linearidades, como por exemplo o comportamento elástico não-linear dos materiais, também podem estar presentes no problema dinâmico das linhas. Mas, de um modo geral, os três já citados são os mais relevantes. Entre estes, os dois primeiros - o arrasto viscoso e a não-linearidade geométrica - são aqueles cujos efeitos sobre o comportamento dinâmico são considerados mais significativos.

Para aplicação de métodos de cálculo no domínio da frequência ou outros métodos lineares é fundamental que se avalie em que condições os efeitos não-lineares passam a ter influência preponderante sobre o comportamento dinâmico das linhas. Nestas situações as linearizações podem redundar em erros significativos, devendo-se nestes casos empregar métodos de cálculo no domínio do tempo.

CAPÍTULO 5 - ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE LINHAS DE AMARRAÇÃO

5.1 - Objetivos do Estudo Experimental

O desenvolvimento de ensaios experimentais com modelos de linhas de amarração foi motivado pelas exigências estabelecidas nos procedimentos de projeto de sistemas de ancoragem de plataformas de produção, nos aspectos relacionados ao dimensionamento mecânico das linhas.

De acôrdo com estes procedimentos, na condição extrema de projeto, a tensão máxima na linha mais carregada do sistema deve ser determinada através de uma análise dinâmica da resposta aos movimentos de 1ª ordem resultantes em seu ponto de amarração. Neste caso a avaliação, tanto dos resultados obtidos, como de alterações introduzidas no sistema, depende significativamente de conhecimentos sobre o comportamento dinâmico das linhas.

Os ensaios experimentais foram desenvolvidos justamente com o propósito de se estudar o comportamento dinâmico de linhas de amarração com configurações características assumidas nas condições extremas de projeto, quando seus pontos de amarração são submetidos a movimentos de 1ª ordem em torno de uma posição inicial de equilíbrio estático.

O objetivo deste estudo é determinar como as tensões no ponto de amarração das linhas variam quando as mesmas sofrem este tipo de solicitação e, quais os mecanismos e

parâmetros que governam esta resposta dinâmica.

O estudo está limitado a linhas com configurações do tipo da configuração básica definida no capítulo 2, ou seja, linhas homogêneas e na forma de catenária completa, submetidas unicamente às solicitações provenientes dos movimentos de 1^a ordem.

Nestas condições, as variáveis que podem influenciar o comportamento dinâmico das linhas são basicamente as características do movimento imposto, como, por exemplo, sua frequência e amplitude, o tipo e propriedades físicas da linha e a configuração geométrica inicial, definida pelos três parâmetros geométricos básicos ($P, l_1, \alpha l$).

Nas configurações ensaiadas com os modelos de linha procurou-se combinar criteriosamente alguns valores previamente estabelecidos destas variáveis, de forma que se pudesse avaliar a influência de cada uma na resposta dinâmica.

As observações efetuadas neste estudo experimental e os resultados medidos nos ensaios foram posteriormente utilizados no desenvolvimento e avaliação do método de cálculo da resposta dinâmica proposto no capítulo 7.

Todo o estudo experimental foi desenvolvido com base em trabalhos de mesma natureza realizados por Suhara [4],[5],[6],[7],[8] e por Lindhal [9].

Como no estudo não havia a preocupação de se estabelecer correlações de resultados entre modelos e linhas em escala real, procurou-se utilizar modelos e configurações geométricas semelhantes aos empregados nestes trabalhos, de forma a se evitar a simulação de situações pouco represen-

tativas das condições de operação de linhas de amarração.

Este procedimento permitiu, também, que os resultados destes trabalhos fossem utilizados como base para avaliação da qualidade dos resultados experimentais, durante a realização do estudo, facilitando eventualmente a identificação de problemas na bancada de ensaios utilizada.

5.2 - Características Gerais dos Ensaios

Os ensaios realizados durante o estudo experimental foram todos preparados e executados segundo um mesmo procedimento padrão pré-estabelecido.

Básicamente um ensaio consistia em:

- a) instalar o modelo de linha a ser ensaiado numa configuração inicial de equilíbrio estático pré-estabelecida.
- b) submeter o ponto de amarração a um movimento harmônico com trajetória situada no plano da linha e centrada na posição de equilíbrio inicial.
- c) medir e gravar a variação da tensão no ponto de amarração durante a aplicação do movimento.

As configurações iniciais impostas às linhas ensaiadas eram sempre equivalentes àquelas que caracterizam as linhas mais carregadas de um sistema de ancoragem, na condição extrema de projeto. Para se obter esta equivalência adotou-se sempre valores para os parâmetros geométricos (comprimento da linha, raio de ancoragem e profundidade)

que, quando combinados, resultavam em configurações caracterizadas pelo parâmetro D variando entre 0,3 e 0,5, conforme indicado por Suhara[4]. Estas configurações equivalem à configuração estática assumida pela linha, quando a plataforma se encontra numa posição determinada pelo deslocamento médio acrescido da amplitude do movimento de 2ª ordem.

As linhas de amarração foram simuladas através de dois modelos distintos, com características físicas semelhantes aos empregados nas referências já citadas. Os modelos eram duas correntes de uso doméstico, representando as correntes empregadas em sistemas de ancoragem reais. As propriedades físicas e a geometria dos elos destes modelos estão apresentadas mais adiante, neste capítulo.

Para simular as solicitações provenientes dos movimentos de 1ª ordem da plataforma, os pontos de amarração dos modelos de linha foram submetidos a movimentos harmônicos, com trajetórias situadas apenas no plano da linha e centradas na posição de equilíbrio inicial destes pontos.

A aplicação apenas de movimentos harmônicos se deve não só a maior facilidade para a execução dos ensaios, mas também porque, as respostas a este tipo de movimento, permitem uma identificação mais imediata dos efeitos e características não-lineares.

As trajetórias possíveis para os movimentos harmônicos com as características descritas acima são: circular, linear e elíptica. Apenas as trajetórias circular e linear foram simuladas nos ensaios, por não exigirem dispo-

sitivos muito elaborados para executá-las mecânicamente.

As trajetórias lineares foram simuladas em três direções distintas, a saber: na direção horizontal, paralela à superfície livre; na direção vertical, perpendicular à superfície livre; e numa direção inclinada em relação à superfície livre, aproximadamente coincidente com a direção da tangente às linhas em seu ponto de amarração.

Uma vez estabelecida a trajetória a ser imposta em um ensaio, a caracterização do movimento se completava com a fixação tanto da amplitude como das frequências em que o mesmo seria executado. No caso das trajetórias circulares definiu-se que a amplitude do movimento é equivalente ao raio da trajetória.

A simulação de movimentos apenas no plano da linha justifica-se pelo fato, já analisado no capítulo anterior, de que, no caso de um movimento qualquer do ponto de amarração, a componente do movimento na direção perpendicular ao plano da linha não provoca alterações significativas na configuração geométrica da mesma. Neste caso, as tensões na linha também não sofrem alterações significativas, sejam elas avaliadas estática ou dinamicamente. Os efeitos dinâmicos importantes são causados apenas pelas componentes do movimento pertencentes ao plano da linha.

Para caracterizar a resposta dinâmica da linha ensaiada mediu-se, através de célula de carga, a tensão no ponto de amarração durante a aplicação do movimento. Estas medidas eram gravadas constituindo-se num histórico da variação da tensão ao longo do tempo, por um período correspondente ao tempo de duração do ensaio. Posteriormente, a partir

deste histórico, determinava-se as tensões máxima e mínima que ocorriam no ponto de amarração, caracterizando-se completamente a resposta dinâmica associada à configuração ensaiada e às características do movimento aplicado.

Os resultados de tensões máximas e mínimas registrados em cada ensaio foram por fim organizados em gráficos que, juntamente com as observações visuais efetuadas durante os ensaios e os registros dos históricos de variação da tensão, permitiram a análise do comportamento dinâmico das linhas, que está apresentada no capítulo 6.

5.3 - Descrição da Bancada de Ensaios

Os ensaios experimentais foram realizados no Tanque de Provas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, que tem as seguintes dimensões:

comprimento = 21,60 m

largura = 4,86 m

profundidade = 1,78 m

Para permitir a simulação das solicitações desejadas sobre os modelos de linha e o registro das respostas dinâmicas, implantou-se no tanque de provas uma bancada de ensaios constituída de três sistemas principais, a saber: um sistema para aplicação dos movimentos; um sistema para medida de força; e um sistema para aquisição e tratamento dos dados dos ensaios.

A foto apresentada na figura 5.1 a seguir mostra um panorama geral da bancada de ensaios instalada no Tanque de Provas, com os três sistemas acima citados.

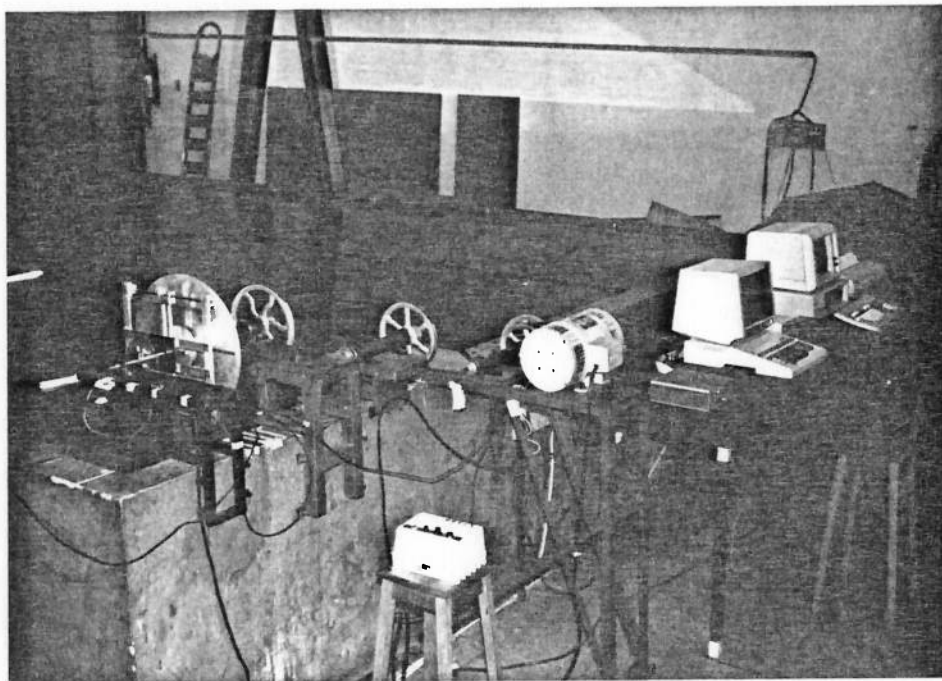


FIGURA 5.1 - PANORAMA GERAL DA BANCADA DE ENSAIOS

5.3.1 - O Sistema para Aplicação dos Movimentos

O sistema para aplicação dos movimentos é composto por um sub-sistema de acionamento e pelos dispositivos geradores das trajetórias.

O sub-sistema de acionamento é formado por um motor de corrente contínua com variador de velocidade, ligado a um conjunto de transmissão de rotação por correias e polias, sendo estas montadas sobre eixos de mancais de rolamento. Na figura 5.1 pode-se observar esta montagem.

Este sub-sistema aciona os dispositivos geradores de trajetórias que são, um disco de alumínio usinado, ligado ao eixo da última polia do conjunto de transmissão, e um mecanismo para conversão de movimento circular em linear. As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram estes dispositivos.

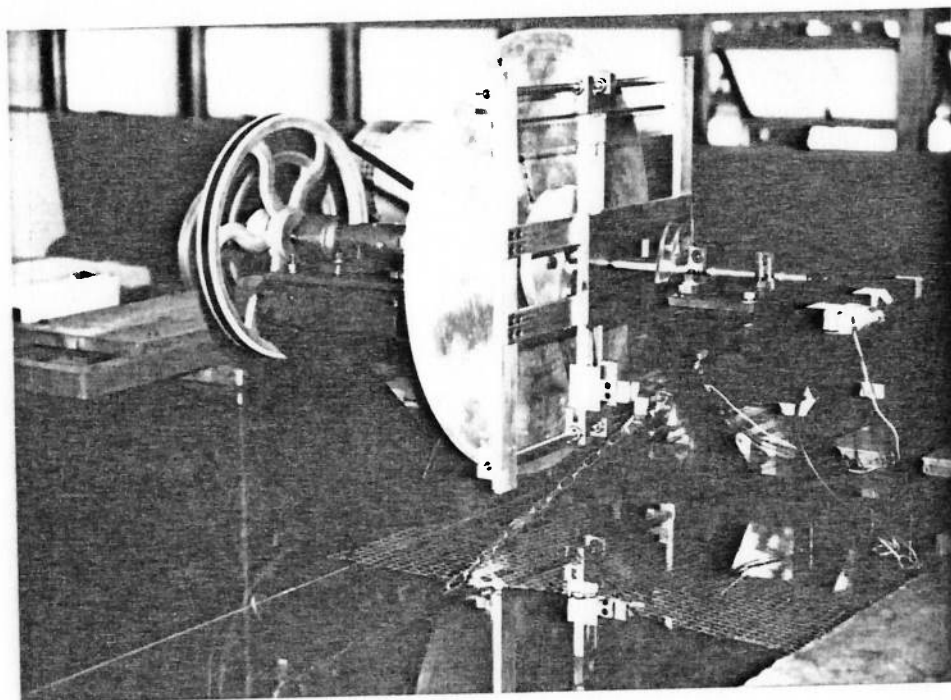


FIGURA 5.2 - DISPOSITIVOS GERADORES DE TRAJETÓRIAS

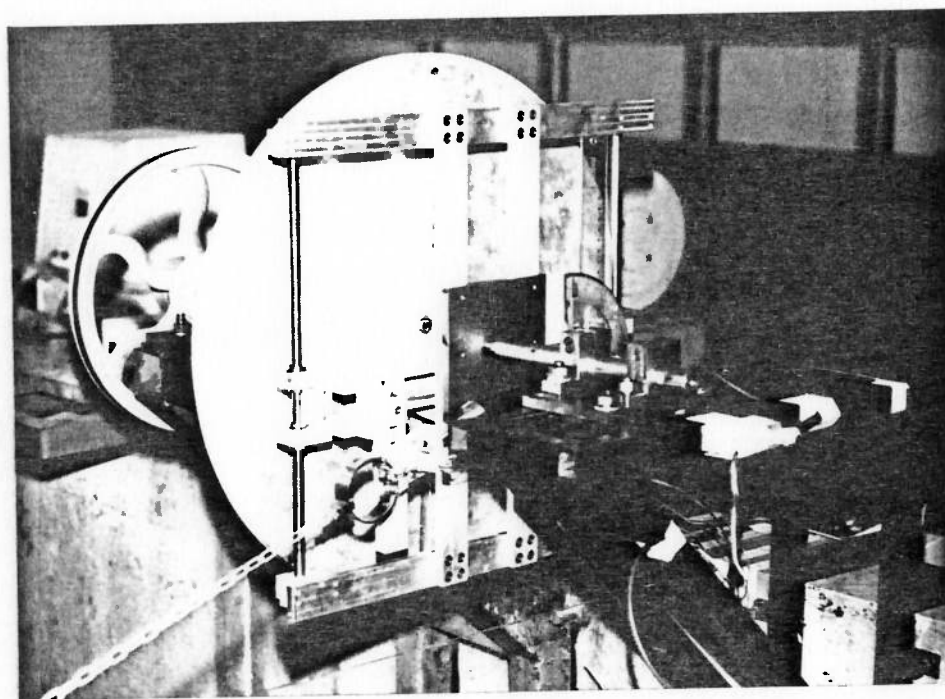


FIGURA 5.3 - DISPOSITIVOS GERADORES DE TRAJETÓRIAS

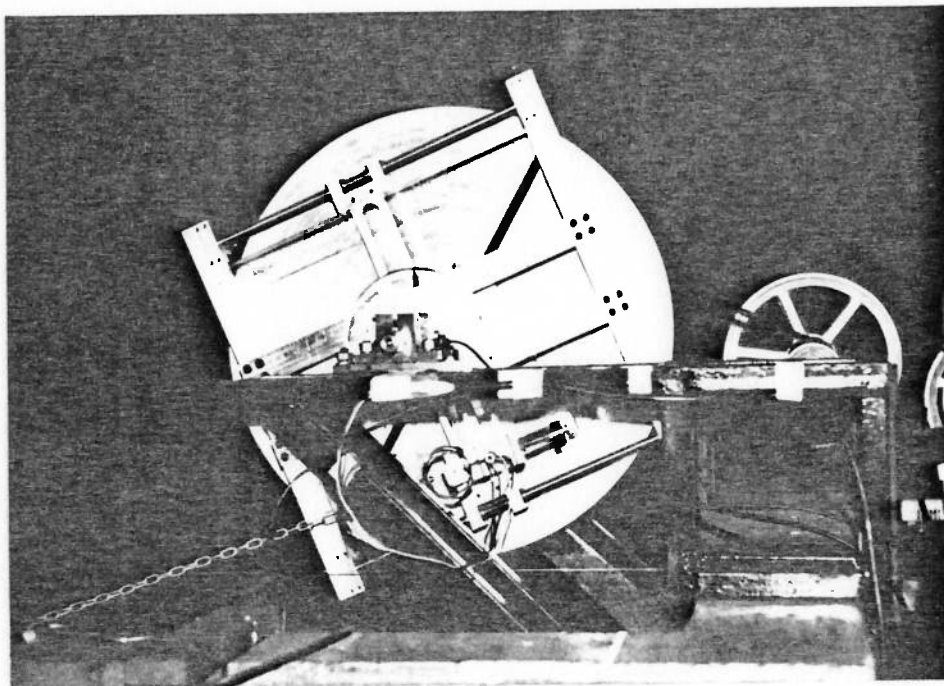


FIGURA 5.4 - DISPOSITIVOS GERADORES DE TRAJETÓRIAS

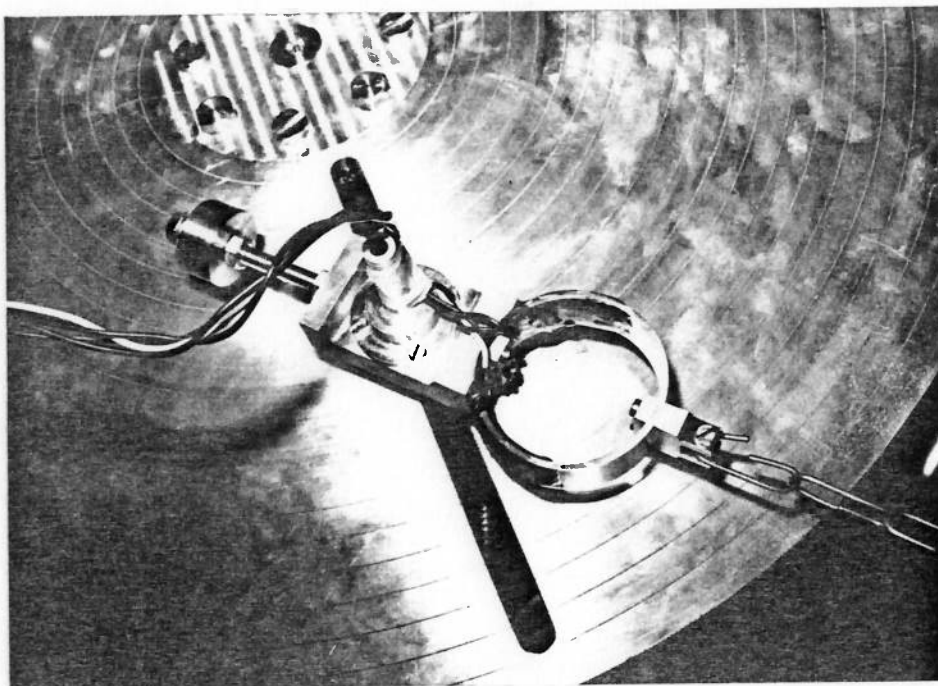


FIGURA 5.5 - CÉLULA DE CARGA

O acionamento dos dispositivos através do motor de corrente contínua de rotação variável permite que os movimentos sejam executados numa ampla faixa de frequências, suficiente para uma avaliação adequada do comportamento dinâmico das linhas.

As trajetórias circulares são geradas diretamente pelo disco de alumínio, que possui locais apropriados para fixação da célula de carga, como mostra a foto da figura 5.5. No caso destas trajetórias, a posição do ponto de amarração na configuração inicial de equilíbrio estático é o próprio centro do disco e a amplitude do movimento é determinada pela distância entre este centro e a posição de fixação da célula de carga.

As trajetórias lineares são geradas através de um mecanismo ligado ao disco de alumínio, que transforma um movimento circular em linear. Neste caso, a célula de carga é fixada sobre uma haste móvel do mecanismo que, quando acionada pelo disco, executa um movimento linear.

O mecanismo pode ser posicionado com qualquer ângulo em relação à superfície livre, permitindo a geração de trajetórias lineares no plano da linha, em qualquer direção em relação a esta superfície. As fotos das figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram o mecanismo linear posicionado para gerar movimentos nas direções horizontal, vertical e inclinada em relação à superfície livre.

No caso dos movimentos lineares, a posição do ponto de amarração na configuração inicial de equilíbrio estático é o ponto médio da trajetória e a amplitude do movimento é determinada pela distância entre o centro do disco e o cen-

tro do eixo fixado no disco para acionar a haste móvel do mecanismo.

5.3.2 - O Sistema para Medida de Força

O sistema para medida de força é constituído de uma célula de carga, mostrada nas fotos das figuras 5.5 e 5.6, e de um condicionador dinâmico de sinais.

A célula de carga é formada por um anel usinado de aço inoxidável fixado em um corpo de alumínio. Sobre este anel, numa posição diametralmente oposta ao ponto de fixação no corpo, encontra-se a peça, mostrada na figura 5.5, onde é fixada a extremidade superior do modelo de linha para transmissão da tensão à célula de carga.

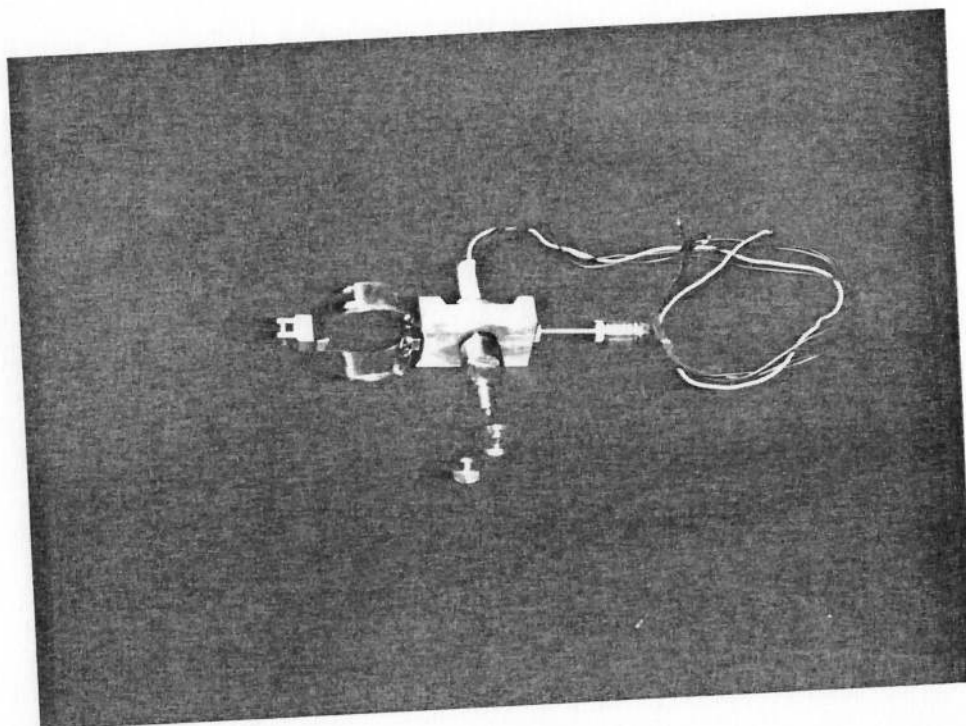


FIGURA 5.6 - CÉLULA DE CARGA

Nas faces interna e externa do anel, sobre a reta diametral perpendicular a reta que une os dois pontos de fixação acima mencionados, colou-se quatro extensômetros elétricos que foram ligados para formar uma ponte de Wheatstone completa. O condicionador de sinal alimentava esta ponte e media o sinal elétrico gerado pelo desbalanceamento da mesma, que era provocado pela tensão aplicada pela linha sobre o anel durante os ensaios.

A célula de carga foi projetada para medir a tensão no ponto de amarração da linha, durante a aplicação do movimento. Para efetuar corretamente esta medida era necessário garantir que, a reta definida pelos dois pontos de fixação acima mencionados coincidisse, em qualquer instante, com a tangente à linha no ponto de ligação com a célula de carga.

Para garantir estas condições, o corpo da célula foi montado sobre um rolamento que, por sua vez, era montado no eixo que promovia a ligação da célula com os dispositivos geradores de movimento. A foto da figura 5.6 mostra a célula de carga montada sobre este eixo.

Com este tipo de montagem a célula permanecia livre para rodar em torno do eixo e a força aplicada pela linha mantinha sempre o alinhamento desejado.

No entanto, como consequência desta montagem, a trajetória gerada pelos dispositivos era imposta à linha de centro do eixo de fixação da célula de carga, que se constituía, portanto, no ponto de amarração da linha ensaiada. Neste caso, o trecho da célula entre esta linha de centro e o ponto de fixação do modelo passa a ser parte integrante

da linha de amarração.

Assim, para o estudo experimental, os comprimentos efetivos das linhas ensaiadas eram determinados pela soma dos comprimentos dos modelos com o comprimento deste trecho da célula de carga. Por hipótese, para fins de análise e comparação de resultados, assumia-se que este trecho da célula de carga possuía propriedades físicas idênticas às do modelo ensaiado.

A célula de carga foi dimensionada para apresentar uma resposta linear aos esforços nela aplicados, pelo menos até um valor de força 50% maior do que os valores máximos esperados nos ensaios, estimados a partir dos trabalhos de Suhara já citados. As dimensões da célula também foram estabelecidas de forma que as deformações fossem suficientes para gerar um sinal adequado para leitura e de forma que as frequências naturais da célula se situassem bem acima das frequências impostas aos movimentos.

5.3.3 - O Sistema para Aquisição e Tratamento dos Dados

O sistema de aquisição e tratamento dos dados dos ensaios é constituído de um conversor analógico/digital de sinais, de microcomputadores e de um programa para tratamento dos dados. Os microcomputadores podem ser vistos na foto da figura 5.1.

O conversor analógico/digital é formado basicamente por uma placa eletrônica instalada em um microcomputador e por um comutador que a ligava ao condicionador dinâmico de sinais.

O programa para tratamento de dados dos ensaios é dividido em três módulos: um módulo para calcular a curva de calibração da célula de carga; um módulo para converter os sinais digitais no histórico da tensão no ponto de amarração; e um módulo para análise do histórico da tensão.

Através de um programa de gerenciamento acionava-se a placa do conversor durante o ensaio, que convertia os sinais analógicos, lidos no condicionador, em sinais digitais que eram armazenados na memória do microcomputador.

A conversão dos sinais digitais em histórico da tensão era feita a partir da curva de calibração da célula de carga, determinada durante os ensaios. Deste histórico, através do módulo de análise, determinava-se os valores máximo e mínimo da tensão no ponto de amarração e a frequência efetiva imposta aos movimentos.

Todos estes resultados dos ensaios eram posteriormente gravados em discos magnéticos para permitir a análise do comportamento dinâmico das linhas.

5.4 - O Planejamento dos Ensaio

Os objetivos do estudo experimental do comportamento dinâmico das linhas de amarração são: pesquisar quais os efeitos dos movimentos de 1^a ordem da plataforma sobre a tensão no ponto de amarração das linhas e quais os mecanismos e parâmetros que governam esta resposta dinâmica.

O estudo deste comportamento dinâmico através de ensaios experimentais, com as limitações estabelecidas nos itens 5.1 e 5.2, tem sua eficácia diretamente condicionada

aos critérios adotados para definir tanto as configurações e condições simuladas como as variáveis a serem medidas em cada ensaio.

Evidentemente que, além disto, a validade do estudo depende da qualidade dos resultados experimentais obtidos que, por sua vez, depende das características e limitações da bancada de ensaios disponível e dos procedimentos adotados para execução dos ensaios.

Tendo em vista estas considerações procurou-se estabelecer, através de uma análise prévia das variáveis envolvidas no estudo, critérios para definir as configurações e condições de solicitação de cada ensaio e as variáveis a serem medidas durante a execução de cada um. Orientou-se o estabelecimento destes critérios de forma a se favorecer uma avaliação a mais abrangente possível do comportamento dinâmico das linhas, sem que isto implicasse necessariamente em um número excessivo de ensaios, ou em um número excessivo de medidas.

Toda a análise realizada para estabelecer os critérios acima mencionados e os procedimentos para execução dos ensaios se constituiu no que se convencionou chamar de planejamento dos ensaios. Os detalhes deste planejamento estão descritos a seguir.

5.4.1 - O Critério para Definir as Condições dos Ensaios

O estudo experimental foi desenvolvido através de uma série de ensaios numerados sequencialmente, cada um representando uma condição operacional ou combinação distinta

dos parâmetros que podem influenciar a resposta dinâmica das linhas.

Em função dos objetivos e limitações estabelecidos para o estudo experimental estes parâmetros, que podem ser associados a três grupos distintos, são os seguintes:

Grupo 1) Propriedades físicas da linha

- peso e empuxo linear (p e ℓ)
- rigidez elástica axial (EA)
- coeficiente de arrasto (C_d)
- coeficiente de massa adicional (C_a)

Grupo 2) Configuração inicial de equilíbrio estático

- comprimento indeformado (l_1)
- profundidade (P)
- raio de ancoragem (αl)

Grupo 3) Características do movimento

- trajetória
- amplitude (A)
- frequência (f)

Um estudo experimental que procurasse contemplar variações individuais em todos estes parâmetros, mesmo que limitadas a uma certa faixa de valores, seria, em termos práticos, inviável de ser executado. Ainda que fôsse realizado, os resultados poderiam ser pouco proveitosos se não se atentasse para o significado da combinação de alguns destes parâmetros.

Uma análise destas combinações permite racionalizar

bastante o estudo experimental, auxiliando no estabelecimento de condições ou configurações de ensaio que favoreçam um entendimento mais fácil do comportamento dinâmico das linhas.

Inicialmente, pode-se verificar que os parâmetros do grupo 1, que representam as características físicas das linhas, não são em geral independentes uns dos outros. Há quase sempre uma relação de dependência entre as dimensões, o peso e a rigidez elástica, que é função do tipo de linha em questão (cabo ou corrente).

Da mesma forma, linhas do mesmo tipo apresentam em geral coeficientes de arrasto e de massa adicional bastante semelhantes.

Nestas condições não há muito sentido em se impor variações individualizadas aos parâmetros do grupo 1, uma vez que seus valores variam conjuntamente, em função da linha adotada. Assim, ao se empregar dois modelos para o estudo experimental procurou-se avaliar duas possíveis combinações dos parâmetros do grupo 1, uma representando uma linha mais robusta e outra uma linha mais leve.

As combinações dos dois primeiros parâmetros do grupo 1 com os parâmetros geométricos do grupo 2 representam, na realidade, combinações das duas principais propriedades estáticas da linha, quais sejam: a rigidez geométrica e a rigidez elástica. Estas são as propriedades fundamentais que determinam a rigidez e governam a resposta quase-estática da linha.

Assim, para uma dada linha, não se estabeleceu combinações dos parâmetros geométricos olhando-se apenas para

seus valores individuais, mas procurando caracterizar uma certa relação entre as rigezas geométrica e elástica, que são as propriedades que efetivamente podem desempenhar um papel importante no comportamento dinâmico das linhas.

Neste sentido, ao se limitar as configurações ensaiadas àquelas caracterizadas por valores do parâmetro D entre 0,3 e 0,5 fixou-se, na realidade, limites para a rigidez geométrica das linhas. Dentro destes limites, para cada valor adotado para o comprimento da linha estabelecia-se portanto uma relação distinta entre a rigidez geométrica e a rigidez elástica, o que possibilitava a avaliação da influência desta relação na resposta dinâmica das linhas.

Em termos práticos limitou-se a variação do parâmetro D a alguns poucos valores, criando-se condições para comparação das respostas dinâmicas associadas a um bom número de diferentes configurações, obtidas através de diversas combinações dos três parâmetros geométricos.

Como consequência deste procedimento indiretamente criou-se também condições para uma avaliação da influência individual de cada parâmetro geométrico na resposta dinâmica.

Em função desta análise definiu-se que as condições de ensaio com cada modelo de linha seriam estabelecidas individualmente para cada tipo de trajetória, adotando-se alguns valores fixos para a variação da profundidade e do comprimento da linha.

Assim, para uma dada profundidade (P) e um dado comprimento (l_1), variava-se o raio de ancoragem (al) de forma a se obter os valores de D pré-fixados. Com isto,

as respostas de linhas com mesma rigidez elástica e diferentes rigezas geométricas podiam ser comparadas.

Na mesma profundidade mas com um novo comprimento, novos raios de ancoragem levavam aos mesmos valores de D , permitindo então comparações das respostas de linhas com mesma rigidez geométrica mas diferentes rigezas elásticas.

Mudando-se agora a profundidade, mas repetindo-se os valores de comprimento e do parâmetro D , estabelecia-se condições para comparação das respostas de linhas com mesma rigidez geométrica e/ou mesma rigidez elástica, mas com configurações geométricas distintas.

Para cada par de valores de profundidade e comprimento, a determinação dos raios de ancoragem que estabeleciam as configurações caracterizadas pelos valores de D pré-fixados era feita com auxílio do programa CATENA. Uma vez determinado o raio de ancoragem correspondente a um certo valor de D estava fixada uma configuração inicial de ensaio. Para esta configuração obtinha-se também, dos resultados do programa, a tensão no ponto de amarração e a posição do ponto de toque.

Finalmente definiu-se que, para cada configuração ensaiada em cada trajetória, os movimentos seriam impostos com algumas amplitudes distintas e, em cada amplitude, com seis frequências diferentes, de forma a caracterizar uma gama bastante ampla de condições de solicitação.

Como resultado deste procedimento, as condições e a numeração de um ensaio somente estavam definidas após a fixação do modelo, da trajetória, da configuração estática inicial, da amplitude e das seis frequências do movimento.

A execução do ensaio significava portanto instalar a linha na configuração escolhida e aplicar, em seu ponto de amarração, o movimento nas seis frequências pré-estabelecidas.

O diagrama de blocos da figura 5.7 a seguir ilustra o procedimento empregado para definir as condições de cada ensaio do estudo experimental.

5.4.2 - As Variáveis Medidas nos Ensaios

Os resultados e eventos medidos e observados durante a execução dos ensaios formam a base de informações que permite o estudo experimental do comportamento dinâmico das linhas de amarração.

Com esta preocupação, e tendo em vista os objetivos do estudo e as limitações da bancada de ensaios, procurou-se estabelecer um conjunto básico de variáveis que seriam objeto de medida durante a execução dos ensaios, suficiente para permitir uma compreensão adequada do comportamento dinâmico das linhas. Estas variáveis são as seguintes:

- a) a tensão no ponto de amarração na configuração inicial de equilíbrio estático (T_0).
- b) a posição do ponto de toque na configuração inicial de equilíbrio estático (x_c).
- c) as tensões máxima e mínima no ponto de amarração quando a trajetória do movimento é percorrida de forma quase-estática (T_{Emx} e T_{Emi}).
- d) as tensões no ponto de amarração durante a execução do movimento, em cada frequência (T).

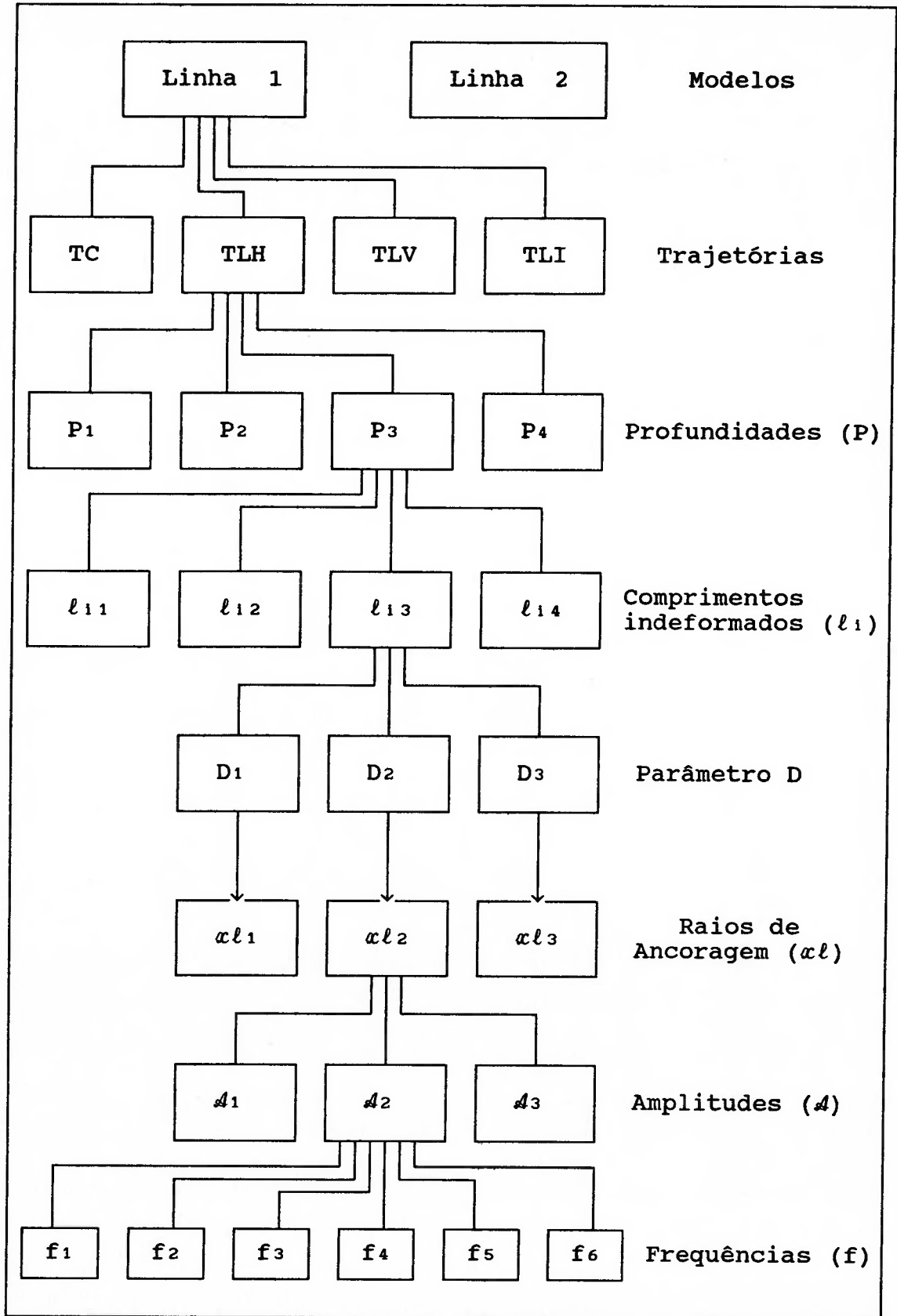


FIGURA 5.7 - DIAGRAMA PARA PLANEJAMENTO DAS CONDIÇÕES
DOS ENSAIOS

A medição das duas primeiras variáveis tem por objetivos caracterizar a configuração inicial de equilíbrio estático e permitir uma avaliação dos resultados experimentais através da comparação com os resultados do programa CATENA, obtidos durante o estabelecimento das configurações dos ensaios.

A determinação experimental das tensões quase-estáticas tem por objetivo caracterizar a resposta quase-estática da linha para uma posterior comparação com a resposta dinâmica ao mesmo movimento.

Finalmente, os registros das tensões durante a execução dos movimentos constituem as respostas dinâmicas associadas a cada condição ensaiada que, juntamente com os resultados anteriores, são empregados na análise e caracterização do comportamento dinâmico das linhas.

Além destas, a avaliação de algumas outras variáveis, como o ângulo de inclinação da linha no ponto de amarração ou o deslocamento de alguns pontos ao longo da linha durante o movimento, poderia ter contribuído para enriquecer a análise do comportamento dinâmico. No entanto, em virtude das limitações existentes na bancada de ensaios, não foi possível realizar medidas além daquelas já citadas. Nestas condições, algumas das características do comportamento das linhas só puderam ser avaliadas visualmente.

Apesar destas limitações, tomando por comparação os trabalhos experimentais de Suhara, considerou-se que o conjunto de variáveis a serem medidas durante os ensaios era suficiente para permitir uma análise confiável do comportamento dinâmico das linhas.

5.4.3 - O Procedimento de Execução dos Ensaios

Todos os ensaios do estudo experimental foram executados segundo um mesmo procedimento padrão, estabelecido com o objetivo de uniformizar o processo de medida, de forma a evitar efeitos distintos deste processo sobre os resultados experimentais.

Para garantir uma avaliação precisa das variáveis descritas no ítem anterior a execução de um ensaio foi dividida em cinco fases distintas, a saber:

Fase 1 - Calibração inicial da célula de carga

Fase 2 - Ensaio estático inicial

Fase 3 - Ensaio dinâmico

Fase 4 - Ensaio estático final

Fase 5 - Calibração final da célula de carga

Um ensaio era iniciado através da execução de uma primeira calibração da célula de carga, para a obtenção da curva de transformação dos sinais digitais em forças. Esta calibração era realizada submetendo-se a célula a ação estática de diversos pesos conhecidos.

Em seguida, já na fase 2, instalava-se a linha na configuração inicial de equilíbrio estático, pré-estabelecida para o ensaio, e realizava-se as medidas da tensão estática no ponto de amarração (T_0) e da posição do ponto de toque (αc). A figura 5.8 ilustra o modelo de linha instalado na configuração inicial, para o caso de um ensaio com trajetória circular.

Iniciava-se então a fase 3 ajustando-se os dispositivos geradores de trajetória para a amplitude especificada para o ensaio. Em seguida media-se as tensões quase-estáticas (T_{Emx} ; T_{Em1}) e as tensões dinâmicas (T), estas últimas nas seis frequências estabelecidas para o ensaio. Durante os ensaios as frequências eram ajustadas através de um tacômetro manual, mas seus valores efetivos eram obtidos posteriormente dos históricos de variação da tensão, através do módulo de análise do programa de tratamento de dados. A figura 5.9 a seguir ilustra a posição radial do ponto de amarração da linha, sobre o disco de alumínio, no caso de um ensaio com trajetória circular.

Na fase 4 reposicionava-se a linha na configuração inicial de equilíbrio estático e media-se novamente a tensão no ponto de amarração e a posição do ponto de toque. A constatação de diferenças significativas entre estes valores e os medidos na fase 2 indicava a ocorrência de alguma falha na bancada durante o ensaio. Neste caso, após os ajustes necessários, o ensaio era refeito. Caso contrário, para fins de resultados, os valores adotados para as variáveis eram os médios entre as medidas realizadas nas fases 2 e 4.

Finalmente, antes de se encerrar o ensaio, realizava-se uma nova calibração da célula de carga. Da mesma forma, constatando-se diferenças relevantes entre as curvas de calibração, repetia-se novamente o ensaio. Caso contrário, adotava-se a curva média como a curva de calibração da célula de carga, para posterior determinação dos resultados definitivos do ensaio.

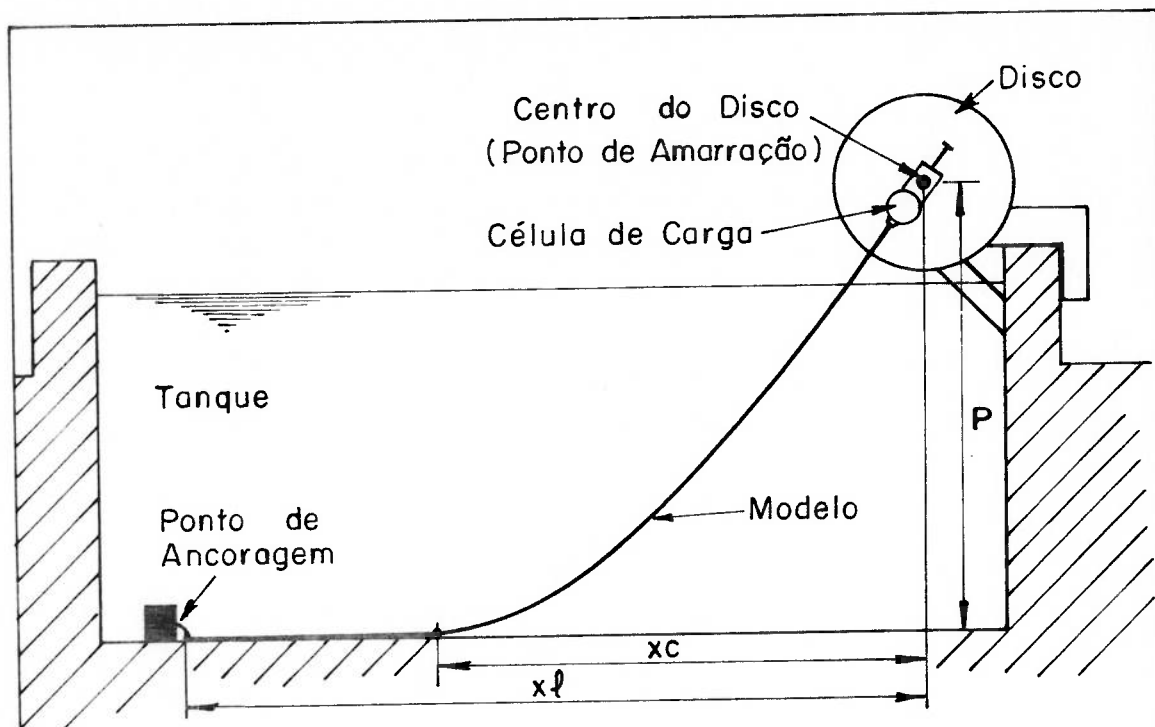


FIGURA 5.8 - MODELO NA CONFIGURAÇÃO INICIAL DE EQUILÍBRIO ESTÁTICO

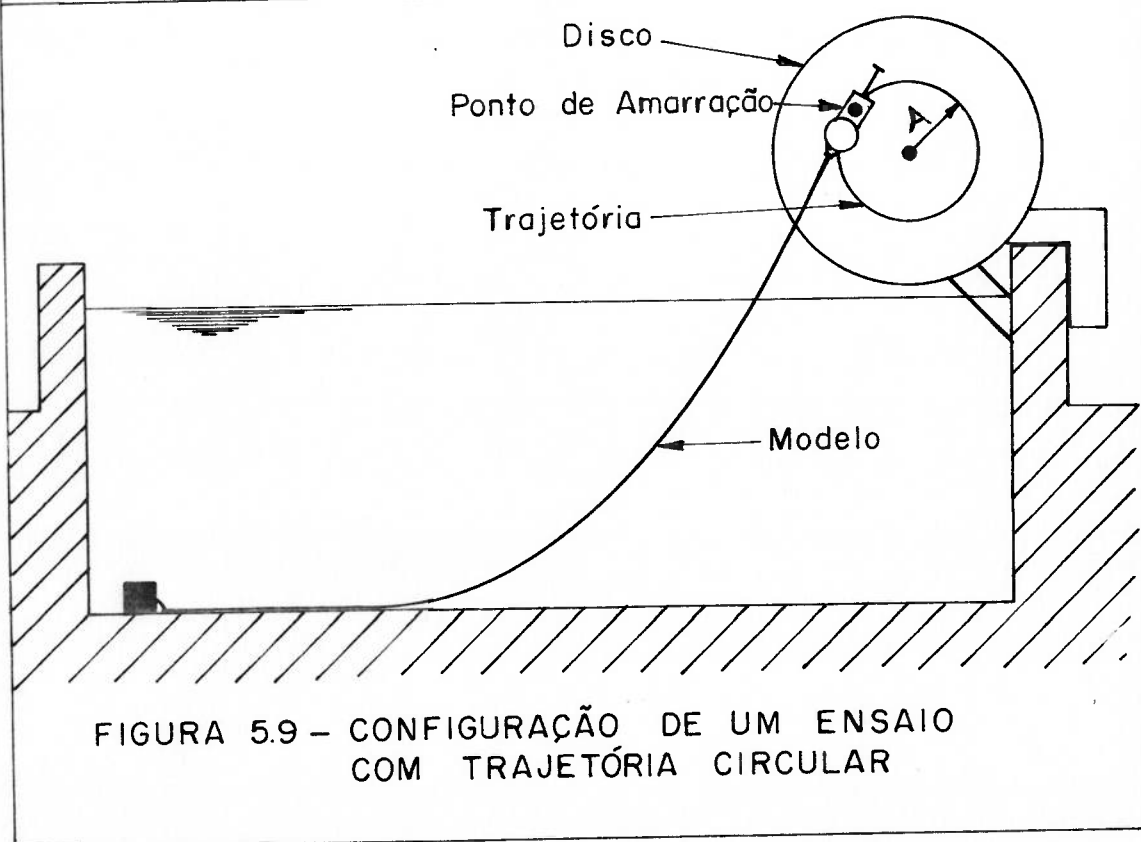


FIGURA 5.9 - CONFIGURAÇÃO DE UM ENSAIO COM TRAJETÓRIA CIRCULAR

5.5 - As Características Físicas dos Modelos de Linha

Empregou-se no estudo experimental dois modelos distintos de linha de amarração, denominados "Linha 1" e "Linha 2". Ambos os modelos eram correntes de uso doméstico formadas de elos abertos dobrados a partir de arames de aço, conforme pode-se observar nas fotos das figuras 5.10 e 5.11 a seguir.

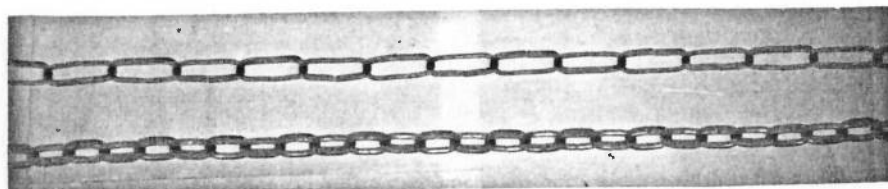


FIGURA 5.10 - MODELOS DE LINHA DE AMARRAÇÃO

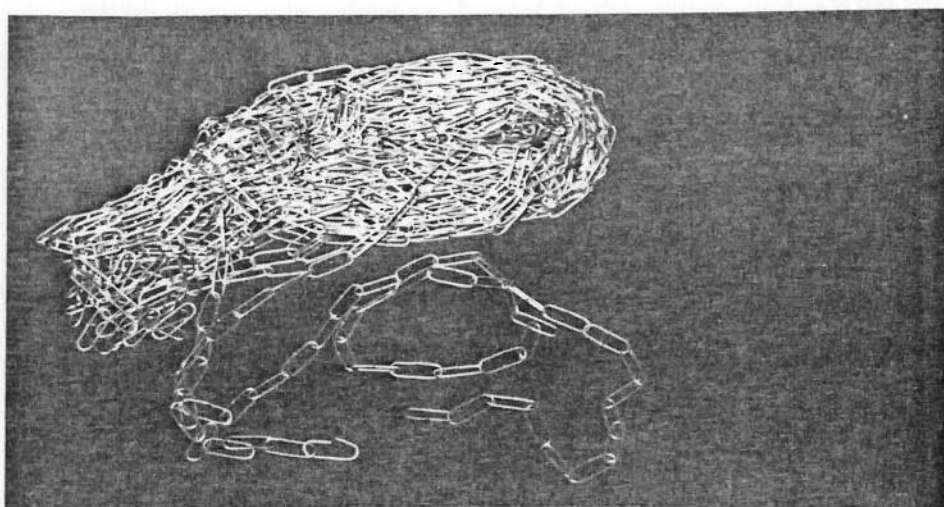


FIGURA 5.11 - LINHA 1

As principais características e propriedades físicas dos modelos, relevantes para o estudo do comportamento dinâmico das linhas, são as seguintes:

- geometria do modelo
- densidade do material (ρ)
- peso linear no ar (p)
- peso linear na água (q)
- massa linear (m)
- diâmetro equivalente (d_c)
- rigidez elástica axial (EA)
- coeficiente de arrasto transversal (C_d)
- coeficiente de massa adicional (C_a)

As dimensões e valores destas propriedades para cada um dos modelos estão detalhados a seguir.

5.5.1 - Características da Linha 1

a) Geometria do modelo

A figura 5.12 a seguir mostra as dimensões médias de um elo da corrente que constitui a Linha 1.

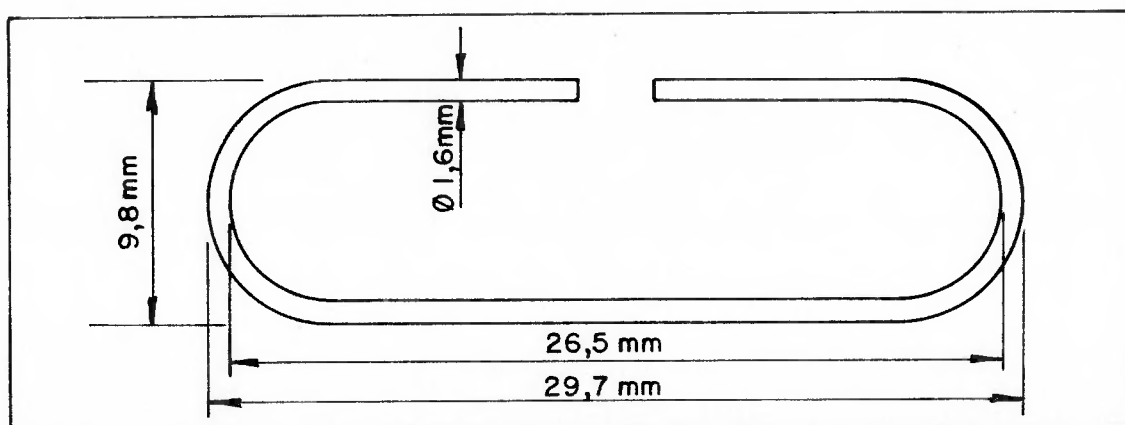


FIGURA 5.12 - DIMENSÕES DOS ELOS DA LINHA 1

b) Densidade do material

O material da corrente é o aço comum que possui a seguinte densidade média:

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

c) Peso linear no ar

O peso linear do modelo foi obtido através de pesagem em balança de precisão, obtendo-se o seguinte valor:

$$p = 0,413 \text{ N/m}$$

d) Peso linear na água

O peso linear na água foi obtido subtraindo-se o empuxo, estimado a partir da densidade do material, do valor do peso linear no ar.

$$q = 0,360 \text{ N/m}$$

e) Massa linear

A massa linear, ou massa por unidade de comprimento, foi obtida a partir do peso linear no ar, e tem o seguinte valor:

$$m = 0,042 \text{ Kg/m}$$

f) Diâmetro equivalente

Define-se o diâmetro equivalente como o diâmetro de um cabo maciço, de seção circular, com peso linear no ar e densidade iguais ao da corrente. Portanto, em termos matemáticos, o diâmetro equivalente é dado por:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot p}{\pi \cdot \rho \cdot g}} \quad (64)$$

onde: g = aceleração da gravidade = $9,81 \text{ m/s}^2$

Para a Linha 1 o diâmetro equivalente é:

$$d_c = 0,0026 \text{ m}$$

g) Rigidez elástica axial

A rigidez elástica axial dos modelos foi determinada através de ensaios de tração simples. O valor médio para a Linha 1 é:

$$EA = 4763 \text{ N}$$

h) Coeficiente de arrasto transversal

Os coeficientes de arrasto dos modelos foram determinados a partir de gráficos apresentados por Suhara [4], obtidos em ensaios experimentais com uma série de modelos de corrente submetidos a um escoamento oscilatório perpendicular a seus eixos. Para as condições dos ensaios do presente estudo o valor deste coeficiente para a Linha 1 é:

$$C_d = 1,6$$

i) Coeficiente de massa adicional

Os coeficientes de massa adicional para escoamentos perpendiculares aos eixos dos modelos também foram determinados a partir de gráficos apresentados por Suhara [4], obtidos da mesma série de ensaios com modelos de corrente. A massa adicional dos modelos é determinada através da seguinte equação:

$$m_a = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot \rho_a \cdot C_a \quad (65)$$

onde: m_a = massa adicional por unidade de comprimento

ρ_a = densidade da água

Substituindo a equação (64) na equação (65) obtém-se:

$$m_a = m \cdot \frac{\rho_a}{\rho} \cdot Ca \quad (66)$$

Para a Linha 1, o coeficiente de massa adicional transversal é:

$$Ca = 2,4$$

5.5.2 - Características da Linha 2

As características e propriedades físicas da Linha 2 são as seguintes:

a) Geometria do modelo

A figura 5.13 a seguir mostra as dimensões médias de um elo da corrente que constitui a Linha 2.

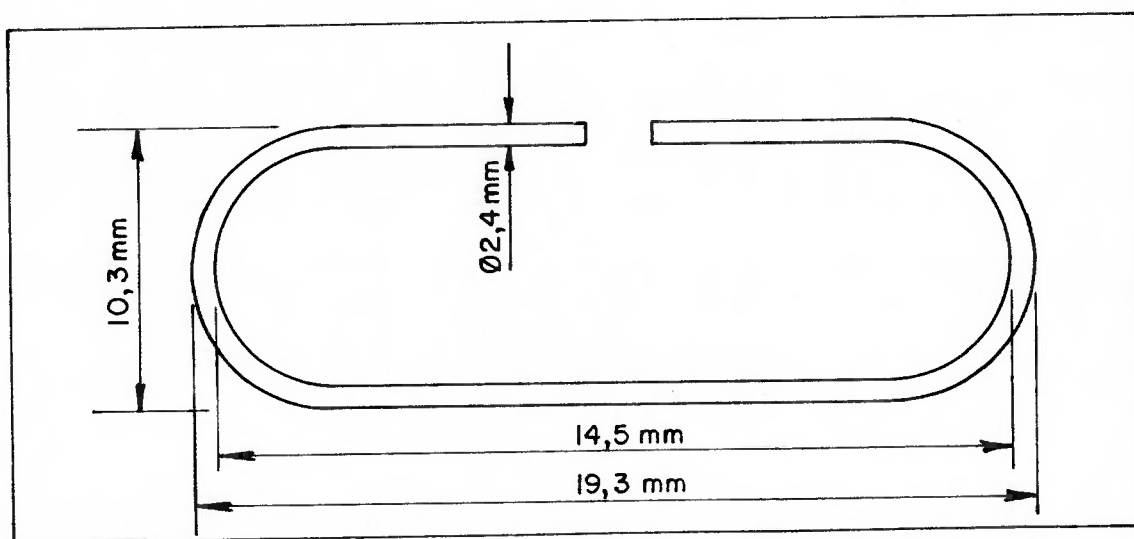


FIGURA 5.13 - DIMENSÕES DOS ELOS DA LINHA 2

b) Densidade do material

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

c) Peso linear no ar

$$p = 0,991 \text{ N/m}$$

d) Peso linear na água

$$q = 0,865 \text{ N/m}$$

e) Massa linear

$$m = 0,101 \text{ Kg/m}$$

f) Diâmetro equivalente

$$d_c = 0,0040 \text{ m}$$

g) Rigidez elástica axial

$$EA = 17664 \text{ N}$$

h) Coeficiente de arrasto transversal

$$C_d = 1,6$$

i) Coeficiente de massa adicional

$$C_a = 2,4$$

5.6 - Configurações e Condições Ensaçadas

Após o levantamento das características e propriedades dos modelos realizou-se o planejamento dos ensaios, conforme o procedimento estabelecido no item 5.4. Neste

planejamento determinou-se para cada ensaio as configurações estáticas iniciais, definidas através dos valores dos parâmetros P , l_1 , D e αl , e estabeleceu-se as condições de solicitação através da fixação dos valores dos parâmetros A e f . Os valores adotados para todos estes parâmetros foram semelhantes ou de mesma ordem de grandeza daqueles empregados por Suhara, conforme já discutido anteriormente.

Como resultado do planejamento, o estudo experimental se constituiu de um total de 71 ensaios, cujas configurações e condições de solicitação estão resumidas nas tabelas 5.1 a 5.10 a seguir.

Nestas tabelas, os valores indicados de comprimento indeformado (l_1) já incluem o acréscimo devido a presença da célula de carga, conforme discutido no item 5.3.2, e os valores das frequências dos movimentos já são aqueles obtidos dos históricos de tensão no ponto de amarração, registrados em cada ensaio, conforme discutido no item 5.4.3.

Em todos os ensaios realizados com aplicação de movimento circular o sentido de rotação imposto ao disco foi sempre o anti-horário, se observada como referência a configuração representada na figura 5.9.

No caso dos ensaios com aplicação do movimento linear inclinado, indicados nas tabelas 5.5 e 5.10, adotou-se uma única inclinação (θ_1) para a trajetória, fixada em 22° em relação ao eixo horizontal, conforme mostra a figura 5.14 a seguir. Este valor corresponde aproximadamente ao valor médio das inclinações das linhas, no ponto de amarração, na condição estática inicial de todos os demais ensaios.

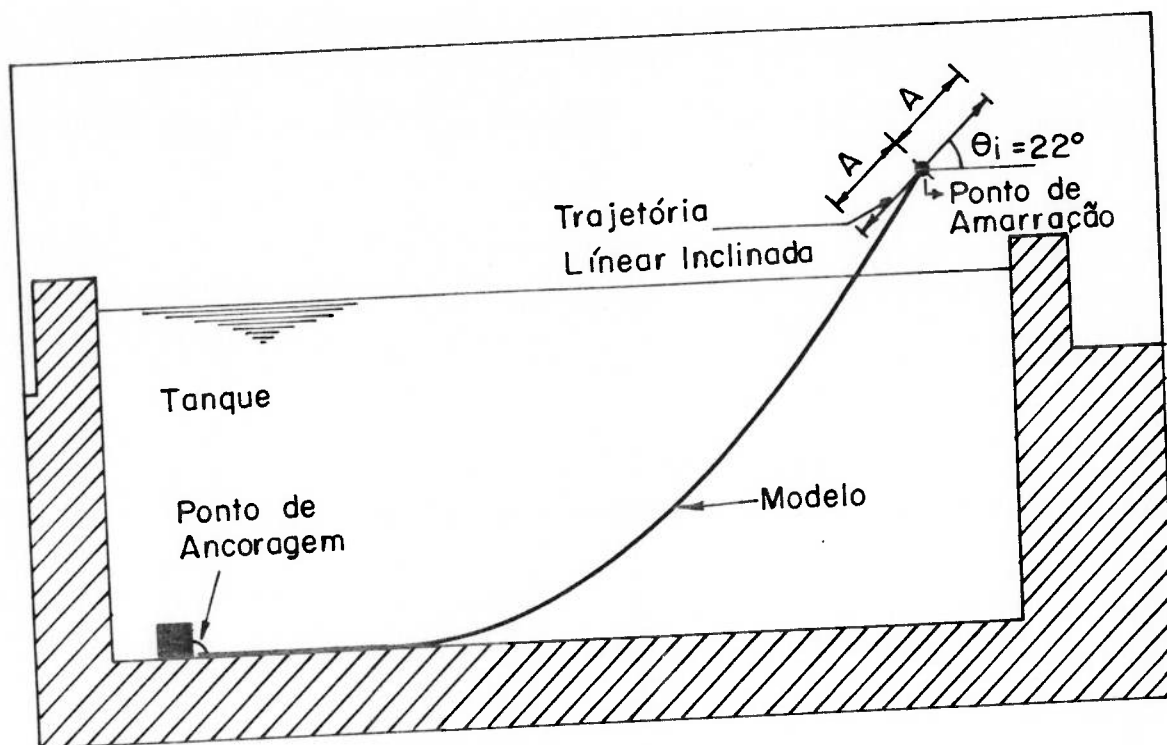


FIGURA 5.14 - TRAJETÓRIA DO MOVIMENTO LINEAR INCLINADO

Por fim, deve-se ressaltar que, em todos os ensaios, as linhas eram homogêneas e assumiam a forma de catenária completa, conforme estabelecido na definição da configuração básica adotada no presente trabalho.

Para facilitar a leitura das tabelas, indica-se a seguir o significado da simbologia empregada nas mesmas.

P = profundidade (m)

l_i = comprimento indeformado da linha (m)

α_l = raio de ancoragem (m)

D = parâmetro adimensional que caracteriza a configuração estática

A = amplitude do movimento (m)

f = frequência do movimento (Hz)

LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR												
N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	ϖl (m)	D	\mathcal{A} (m)	Frequências (Hz)						
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	
1	2,0205	20,298	20,135	0,329	0,040	0,161	0,331	0,513	0,664	0,802	1,011	
2	2,0205	20,298	20,135	0,329	0,081	0,165	0,332	0,497	0,670	0,845	1,019	
3	2,0205	20,298	20,135	0,329	0,118	0,167	0,332	0,489	0,680	0,862	1,015	
4	2,0205	20,298	20,079	0,388	0,041	0,167	0,348	0,519	0,670	0,866	1,012	
5	2,0205	20,298	20,079	0,388	0,084	0,174	0,342	0,500	0,679	0,832	1,004	
6	2,0205	20,298	20,079	0,388	0,124	0,170	0,334	0,502	0,674	0,836	1,001	
7	2,0205	20,298	19,974	0,520	0,047	0,172	0,337	0,500	0,671	0,827	0,997	
8	2,0205	20,298	19,974	0,520	0,095	0,168	0,333	0,504	0,670	0,839	1,005	
9	2,0205	20,298	19,974	0,520	0,135	0,167	0,333	0,502	0,668	0,847	0,993	
10	2,0205	18,279	18,111	0,328	0,039	0,160	0,341	0,502	0,680	0,844	1,020	
11	2,0205	18,279	18,111	0,328	0,080	0,166	0,333	0,500	0,662	0,825	1,001	
12	2,0205	18,279	18,111	0,328	0,115	0,167	0,332	0,505	0,669	0,836	1,006	
13	2,0205	16,257	16,028	0,391	0,039	0,171	0,331	0,511	0,669	0,823	1,018	
14	2,0205	16,257	16,028	0,391	0,080	0,169	0,331	0,503	0,667	0,840	1,019	

TABELA 5.1 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 1 PARA MOVIMENTO CIRCULAR

LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR												
N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	ω (m)	D	\mathcal{A} (m)	Frequências (Hz)						
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	
15	2,0205	16,257	16,028	0,391	0,119	0,169	0,333	0,508	0,673	0,846	1,027	
16	2,0205	14,237	13,909	0,516	0,045	0,157	0,333	0,502	0,661	0,846	0,998	
17	2,0205	14,237	13,909	0,516	0,090	0,170	0,338	0,506	0,672	0,840	1,011	
18	2,0205	14,237	13,909	0,516	0,127	0,172	0,341	0,498	0,671	0,851	1,009	
19	1,8235	14,268	14,105	0,329	0,035	0,661	0,834	0,997	1,167	1,336	1,509	
20	1,8235	14,268	14,105	0,329	0,073	0,165	0,334	0,496	0,666	0,833	0,993	
21	1,8235	14,268	14,059	0,389	0,037	0,662	0,833	0,991	1,163	1,328	1,493	
22	1,8235	14,268	14,059	0,389	0,076	0,165	0,325	0,495	0,658	0,829	0,998	
23	1,7835	14,268	14,062	0,391	0,024	0,671	0,832	0,992	1,161	1,341	1,497	
24	1,7835	14,268	14,062	0,391	0,037	0,674	0,829	0,998	1,164	1,343	1,495	

TABELA 5.2 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 1 PARA MOVIMENTO CIRCULAR (Continuação)

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL

N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	αl (m)	D	λ (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
25	1,8740	18,313	18,156	0,329	0,039	0,164	0,331	0,503	0,665	0,831	0,999
26	1,8740	18,313	18,156	0,329	0,081	0,165	0,334	0,503	0,667	0,829	1,001
27	1,8740	18,313	18,105	0,390	0,041	0,166	0,328	0,499	0,668	0,839	0,998
28	1,8740	18,313	18,105	0,390	0,085	0,169	0,332	0,496	0,674	0,832	1,003
29	1,8740	16,290	16,079	0,389	0,040	0,168	0,335	0,495	0,666	0,835	0,997
30	1,8740	16,290	16,079	0,389	0,085	0,167	0,333	0,498	0,669	0,838	1,001

TABELA 5.3 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 1 PARA MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR VERTICAL

Nº do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	αl (m)	D	\mathcal{A} (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
31	1,9840	18,313	18,147	0,329	0,065	0,665	0,837	1,004	1,178	1,335	1,499
32	1,9840	18,313	18,147	0,329	0,116	0,167	0,329	0,502	0,664	0,829	0,993
33	1,9840	18,313	18,093	0,390	0,060	0,667	0,835	1,001	1,164	1,337	1,502
34	1,9840	18,313	18,093	0,390	0,108	0,164	0,334	0,498	0,664	0,830	0,997

TABELA 5.4 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 1 PARA MOVIMENTO LINEAR VERTICAL

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO ($\theta_1 = 22^\circ$)

N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	αl (m)	D	A (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
35	1,8990	18,313	18,154	0,329	0,020	0,663	0,830	0,993	1,165	1,331	1,489
36	1,8990	18,313	18,154	0,329	0,037	0,246	0,412	0,585	0,746	0,907	1,081
37	1,8990	18,313	18,102	0,390	0,021	0,667	0,836	1,000	1,157	1,327	1,495
38	1,8990	18,313	18,102	0,390	0,038	0,164	0,333	0,497	0,664	0,830	0,995

TABELA 5.5 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 1 PARA MOVIMENTO LINEAR INCLINADO ($\theta_1 = 22^\circ$)

LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR

N° do Ensaio	P (m)	l_i (m)	αl (m)	D	\mathcal{A} (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
39	2,0205	20,296	20,112	0,329	0,030	0,253	0,419	0,591	0,756	0,931	1,084
40	2,0205	20,296	20,112	0,329	0,055	0,254	0,416	0,581	0,749	0,914	1,083
41	2,0205	20,296	20,112	0,329	0,094	0,252	0,420	0,588	0,751	0,922	1,084
42	2,0205	20,296	20,061	0,390	0,032	0,247	0,419	0,594	0,757	0,909	1,076
43	2,0205	20,296	20,061	0,390	0,058	0,258	0,418	0,585	0,751	0,920	1,071
44	2,0205	20,296	20,061	0,390	0,098	0,253	0,420	0,587	0,755	0,914	1,081
45	2,0205	20,296	19,964	0,520	0,038	0,248	0,420	0,588	0,754	0,922	1,076
46	2,0205	20,296	19,964	0,520	0,069	0,254	0,416	0,593	0,753	0,913	1,076
47	2,0205	20,296	19,964	0,520	0,117	0,253	0,420	0,586	0,750	0,920	1,079
48	2,0205	18,278	18,090	0,330	0,029	0,249	0,414	0,581	0,747	0,913	1,086
49	2,0205	16,260	16,020	0,390	0,055	0,253	0,416	0,584	0,752	0,921	1,088
50	2,0205	14,241	13,905	0,519	0,111	0,251	0,415	0,585	0,752	0,916	1,084
51	2,0205	20,296	20,079	0,368	0,041	0,251	0,421	0,586	0,753	0,918	1,081

TABELA 5.6 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 2 PARA MOVIMENTO CIRCULAR

LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR

N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	αl (m)	D	A (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
52	1,8235	14,241	14,065	0,329	0,027	0,660	0,829	1,000	1,169	1,333	1,507
53	1,8235	14,241	14,065	0,329	0,050	0,249	0,416	0,574	0,743	0,914	1,077
54	1,8235	14,241	14,022	0,390	0,030	0,641	0,833	0,989	1,155	1,333	1,496
55	1,8235	14,241	14,022	0,390	0,054	0,246	0,416	0,584	0,746	0,914	1,085
56	1,7835	14,241	14,027	0,390	0,030	0,664	0,827	0,992	1,159	1,328	1,495
57	1,7835	14,241	14,027	0,390	0,054	0,263	0,417	0,582	0,748	0,910	1,085

TABELA 5.7 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 2 PARA MOVIMENTO CIRCULAR (continuação)

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL											
Nº do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	αl (m)	D	A (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
58	1,8740	18,278	18,058	0,390	0,032	0,248	0,417	0,586	0,752	0,914	1,079
59	1,8740	18,278	18,058	0,390	0,058	0,256	0,417	0,582	0,742	0,917	1,085
60	1,8740	18,278	17,968	0,521	0,040	0,249	0,415	0,578	0,750	0,912	1,083
61	1,8740	18,278	17,968	0,521	0,071	0,257	0,416	0,588	0,747	0,914	1,088
62	1,8740	16,260	16,038	0,389	0,031	0,254	0,416	0,585	0,748	0,918	1,085
63	1,8740	16,260	16,038	0,389	0,057	0,251	0,414	0,588	0,751	0,916	1,063

TABELA 5.8 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 2 PARA MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR VERTICAL											
N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	ωl (m)	D	A (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
64	1,9840	18,278	18,045	0,390	0,089	0,249	0,415	0,580	0,748	0,913	1,071
65	1,9840	18,278	18,045	0,390	0,125	0,252	0,415	0,582	0,743	0,918	1,072
66	1,9840	18,278	17,950	0,520	0,084	0,248	0,416	0,579	0,749	0,910	1,075
67	1,9840	18,278	17,950	0,520	0,118	0,250	0,419	0,582	0,750	0,918	1,065

TABELA 5.9 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 2 PARA MOVIMENTO LINEAR VERTICAL

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO ($\theta_1 = 22^\circ$)

N° do Ensaio	P (m)	l_1 (m)	αl (m)	D	\mathcal{A} (m)	Frequências (Hz)					
						f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
68	1,8990	18,278	18,055	0,390	0,030	0,250	0,416	0,579	0,747	0,916	1,086
69	1,8990	18,278	18,055	0,390	0,042	0,252	0,417	0,587	0,749	0,913	1,081
70	1,8990	18,278	17,964	0,520	0,036	0,250	0,416	0,582	0,745	0,913	1,078
71	1,8990	18,278	17,964	0,520	0,050	0,254	0,411	0,582	0,750	0,909	1,079

TABELA 5.10 - CONDIÇÕES DE ENSAIOS COM A LINHA 2 PARA MOVIMENTO LINEAR INCLINADO ($\theta_1 = 22^\circ$)

5.7 - Resultados dos Ensaios

Os resultados dos ensaios são os valores medidos em todos o ensaios, correspondentes às variáveis indicadas no ítem 5.4.2. Estas variáveis são :

- a) a tensão no ponto de amarração na configuração estática inicial (T_0).
- b) a posição do ponto de toque na configuração estática inicial (α_c).
- c) as tensões quase-estáticas máxima e mínima no ponto de amarração (T_{Emx} e T_{Emi}).
- d) as tensões dinâmicas no ponto de amarração nas várias frequências de execução do movimento (T).

Os valores das duas primeiras variáveis (T_0 e α_c) formam um conjunto que se convencionou chamar de Resultados Estáticos, enquanto que, o conjunto dos valores das outras duas variáveis (T_E e T), são os Resultados Dinâmicos dos ensaios.

Estes resultados estão apresentados separadamente nos ítems seguintes e formam a base de informações para a análise do comportamento dinâmico das linhas, que será apresentada no próximo capítulo.

5.7.1 - Resultados Estáticos

Os resultados estáticos dos ensaios (T_0 e α_c) estão apresentados nas tabelas 5.11 a 5.18 a seguir. Nestas tabe-

las apresenta-se também os valores calculados analiticamente, através do programa CATENA, durante o planejamento dos ensaios, bem como a diferença percentual entre estes valores e os experimentais.

A comparação entre os valores analíticos e experimentais dos resultados estáticos tinha por objetivos certificar o bom funcionamento da bancada de ensaios e fornecer uma estimativa da ordem de grandeza dos erros presentes nos dados experimentais.

A simbologia empregada nas tabelas 5.11 a 5.18 tem o seguinte significado :

T_0 = tensão no ponto de amarração na configuração estática inicial.

x_c = distância horizontal do ponto de toque ao ponto de amarração na configuração estática inicial.

$\Delta\%$ = diferença percentual entre os valores experimentais e analíticos, tendo por base os valores analíticos.

LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To(N)	α_c (m)	To(N)	α_c (m)	Δ (To)	Δ (α_c)
1	14,74	12,410	14,04	12,183	5,0%	1,9%
2	14,57	12,633	14,04	12,183	3,8%	3,7%
3	15,00	12,861	14,04	12,183	6,8%	5,6%
4	10,70	10,593	10,25	10,277	4,4%	3,1%
5	11,00	10,751	10,25	10,277	7,3%	4,6%
6	9,89	10,260	10,25	10,277	-3,5%	-0,2%
7	6,24	7,480	5,99	7,603	4,2%	-1,6%
8	6,09	7,580	5,99	7,603	1,7%	-0,3%
9	6,51	7,837	5,99	7,603	8,7%	3,1%
10	14,88	12,711	14,10	12,209	5,5%	4,1%
11	14,47	12,408	14,10	12,209	2,6%	1,6%
12	14,69	12,395	14,10	12,209	4,2%	1,5%
13	10,81	10,482	10,13	10,216	6,7%	2,6%
14	10,12	10,224	10,13	10,216	-0,1%	0,1%
15	10,14	10,197	10,13	10,216	0,1%	-0,2%
16	6,45	8,028	6,07	7,661	6,3%	4,8%
17	6,37	7,826	6,07	7,661	4,9%	2,2%
18	6,52	7,809	6,07	7,661	7,4%	1,9%
19	12,51	10,828	12,63	10,972	-1,0%	-1,3%
20	12,85	10,976	12,63	10,972	1,7%	0,0%
21	9,55	9,397	9,22	9,262	3,6%	1,5%
22	9,29	9,275	9,22	9,262	0,8%	0,1%
23	8,69	8,746	8,93	9,007	-2,7%	-2,9%
24	8,84	8,746	8,93	9,007	-1,0%	-2,9%

TABELA 5.11 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N^{os} 1 a 24

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To(N)	α_c (m)	To(N)	α_c (m)	Δ (To)	Δ (α_c)
25	13,56	11,344	12,98	11,277	4,5%	0,6%
26	13,62	11,381	12,98	11,277	4,9%	0,9%
27	9,72	9,667	9,44	9,495	3,0%	1,8%
28	9,72	9,669	9,44	9,495	3,0%	1,8%
29	9,62	9,686	9,48	9,520	1,5%	1,7%
30	9,93	9,735	9,48	9,520	4,7%	2,3%

TABELA 5.12 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N°s 25 a 30

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR VERTICAL						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To(N)	α_c (m)	To(N)	α_c (m)	Δ (To)	Δ (α_c)
31	13,34	12,130	13,75	11,945	-3,0%	1,5%
32	14,30	12,184	13,75	11,945	4,0%	2,0%
33	10,23	10,041	10,00	10,058	2,3%	-0,2%
34	10,47	10,113	10,00	10,058	4,7%	0,5%

TABELA 5.13 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N°s 31 a 34

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To(N)	α_c (m)	To(N)	α_c (m)	Δ (To)	Δ (α_c)
35	13,39	11,433	13,16	11,430	1,7%	0,0%
36	13,60	11,393	13,16	11,430	3,3%	-0,3%
37	9,72	9,663	9,55	9,615	1,8%	0,5%
38	9,85	9,798	9,55	9,615	3,1%	1,9%

TABELA 5.14 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N°s 35 a 38

LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To(N)	αc (m)	To(N)	αc (m)	Δ (To)	Δ (αc)
39	35,04	12,394	33,60	12,155	4,3%	2,0%
40	34,66	12,362	33,60	12,155	3,2%	1,7%
41	32,41	12,368	33,60	12,155	-3,5%	1,8%
42	24,52	10,298	24,39	10,228	0,5%	0,7%
43	23,75	10,293	24,39	10,228	-2,6%	0,6%
44	23,67	10,307	24,39	10,228	-3,0%	0,8%
45	13,80	7,391	14,40	7,605	-4,2%	-2,8%
46	14,05	7,402	14,40	7,605	-2,4%	-2,7%
47	14,39	7,424	14,40	7,605	-0,1%	-2,4%
48	32,23	12,362	33,52	12,139	-3,8%	1,8%
49	23,36	10,302	24,42	10,235	-4,3%	0,7%
50	13,72	7,450	14,42	7,612	-4,9%	-2,1%
51	26,23	10,437	27,24	10,859	-3,7%	-3,9%
52	31,84	11,137	30,32	10,969	5,0%	1,5%
53	31,47	11,122	30,32	10,969	3,8%	1,4%
54	22,87	9,417	22,04	9,236	3,8%	2,0%
55	22,39	9,381	22,04	9,236	1,6%	1,6%
56	22,44	9,154	21,59	9,041	3,9%	1,2%
57	22,37	9,177	21,59	9,041	3,6%	1,5%

TABELA 5.15 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N^{os} 39 a 57

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To (N)	αc (m)	To (N)	αc (m)	Δ (To)	Δ (αc)
58	22,08	9,425	22,69	9,500	-2,7%	-0,8%
59	22,12	9,361	22,69	9,500	-2,5%	-1,5%
60	13,23	7,143	13,30	7,038	-0,5%	1,5%
61	13,30	7,055	13,30	7,038	0,0%	0,2%
62	22,69	9,455	22,75	9,514	-0,3%	-0,6%
63	22,21	9,450	22,75	9,514	-2,4%	-0,7%

TABELA 5.16 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N°s 58 a 63

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR VERTICAL						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To (N)	αc (m)	To (N)	αc (m)	Δ (To)	Δ (αc)
64	23,64	10,009	24,00	10,054	-1,5%	-0,4%
65	23,96	10,024	24,00	10,054	-0,2%	-0,3%
66	13,95	7,233	14,10	7,455	-1,1%	-3,0%
67	13,76	7,231	14,10	7,455	-2,4%	-3,0%

TABELA 5.17 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N°s 64 a 67

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO						
N° do Ensaio	RESULTADOS ESTÁTICOS					
	Experimental		Analítico		Diferença ($\Delta\%$)	
	To (N)	αc (m)	To (N)	αc (m)	Δ (To)	Δ (αc)
68	22,63	9,542	22,98	9,624	-1,5%	-0,9%
69	22,80	9,563	22,98	9,624	-0,8%	-0,6%
70	13,58	7,212	13,49	7,135	0,7%	1,1%
71	13,54	7,239	13,49	7,135	0,4%	1,5%

TABELA 5.18 - RESULTADOS ESTÁTICOS DOS ENSAIOS N°s 68 a 71

5.7.2 - Resultados Dinâmicos

Os resultados dinâmicos de um ensaio são constituídos pelos valores máximo e mínimo da tensão no ponto de amarração quando a trajetória do movimento é percorrida de modo quase-estático (T_{Emx} e T_{Emi}), e pelos registros do histórico da tensão dinâmica no ponto de amarração (T), durante o tempo de execução do movimento em cada frequência especificada para o ensaio.

Para fins de análise do comportamento dinâmico, os históricos de tensão podem fornecer, além de sua forma característica, os valores máximos e mínimos da tensão dinâmica no ponto de amarração, em cada frequência de execução do movimento.

A forma do histórico de tensão dinâmica, para uma certa frequência, pode ser observada construindo-se um gráfico que mostre a variação desta tensão em função do tempo de execução do ensaio. Entretanto, como será exposto no capítulo 6, verificou-se que os históricos de tensão registrados nos ensaios apresentam formas características bastante semelhantes, de ensaio para ensaio, em toda faixa de frequências avaliada. Assim, por questões de espaço, ao invés de se apresentar gráficos de todos os históricos de todos os ensaios, optou-se pela apresentação, no capítulo 6, de uma análise qualitativa geral das formas características observadas, empregando-se como exemplos os históricos de alguns poucos ensaios.

Assim, os resultados dinâmicos apresentados a seguir, nas tabelas 5.19 a 5.28, mostram os valores máximo e mínimo

da tensão quase-estática e os valores máximos e mínimos da tensão dinâmica para cada frequência do movimento, em cada ensaio. Para a análise do comportamento dinâmico estes valores permitem a construção de gráficos que proporcionam uma melhor visualização da resposta dinâmica das linhas, como será visto no capítulo 6.

A simbologia empregada nas tabelas 5.19 a 5.28 tem o seguinte significado:

T_{Emx} = tensão máxima no ponto de amarração, na execução quase-estática do movimento.

T_{Emi} = tensão mínima no ponto de amarração, na execução quase-estática do movimento.

T_{max} = tensão dinâmica máxima no ponto de amarração nas várias frequências de movimento.

T_{min} = tensão dinâmica mínima no ponto de amarração nas várias frequências de movimento.

f_1 a f_6 = indica as seis frequências impostas ao movimento, em cada ensaio, cujos valores se encontram nas tabelas 5.1 a 5.10.

LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR									
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração							
		<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>T_{max}(N)</td> </tr> <tr> <td>T_{min}(N)</td> </tr> </table>						T _{max} (N)	T _{min} (N)
		T _{max} (N)							
T _{min} (N)									
T _{Emx} (N)	Frequências								
T _{Emi} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6			
1	--	18,07	19,33	21,45	22,61	23,18	23,66		
	--	11,70	10,18	7,75	6,60	6,04	5,67		
2	--	24,27	27,80	30,63	32,47	34,15	34,67		
	--	7,71	2,01	0,41	0,56	-0,94	-0,80		
3	--	30,43	35,44	38,64	40,11	38,45	37,19		
	--	3,67	0,03	-0,13	0,25	1,02	2,23		
4	--	13,65	14,79	16,46	17,76	18,82	19,07		
	--	9,04	7,17	5,03	3,61	2,49	1,98		
5	--	18,78	22,21	25,47	28,44	30,05	30,00		
	--	5,70	1,12	0,30	0,80	-0,19	-0,19		
6	--	21,80	27,42	31,28	33,65	34,20	33,98		
	--	2,69	0,56	0,36	0,27	0,11	0,20		
7	--	8,00	8,70	10,05	11,56	12,76	14,11		
	--	4,81	3,97	2,77	1,63	1,05	0,70		
8	--	10,56	13,51	16,64	19,78	21,56	21,40		
	--	3,79	1,34	0,90	0,97	0,60	0,48		
9	--	14,67	19,93	24,61	27,32	28,52	28,28		
	--	2,07	0,71	0,54	-1,17	0,19	0,49		
10	--	18,51	19,41	21,17	22,77	23,43	23,72		
	--	12,17	9,86	7,66	5,98	5,17	4,90		
11	--	23,85	27,65	30,43	32,28	34,03	35,21		
	--	8,22	2,78	1,16	1,09	0,88	0,75		
12	--	30,22	36,56	40,46	43,89	45,44	46,29		
	--	4,76	1,40	1,22	-1,93	1,17	1,29		
13	--	13,19	14,19	16,37	17,74	18,88	20,00		
	--	8,64	7,23	4,62	2,82	1,67	1,45		
14	--	17,35	20,70	25,11	28,25	30,48	32,45		
	--	6,28	2,05	1,23	0,92	0,76	0,71		
15	--	22,35	29,05	34,70	38,10	39,50	39,04		
	--	2,76	0,80	0,55	0,60	0,33	0,53		

TABELA 5.19 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 1 a 15

LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR (Continuação)								
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração						
		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Tmax(N) Tmin(N) </div>						
		Frequências						
	T _{Emx} (N)	T _{Emi} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6
16	--		7,43	8,24	9,89	11,58	13,59	15,19
	--		5,00	3,98	2,11	0,73	0,15	0,21
17	--		10,98	14,35	18,24	22,52	26,13	25,68
	--		4,03	1,44	0,92	0,71	0,62	0,62
18	--		14,26	20,74	26,70	30,93	34,17	33,28
	--		2,52	0,88	0,74	0,48	0,50	0,74
19	16,46		21,30	22,42	23,15	23,52	24,16	24,48
	10,30		4,65	3,22	2,82	2,26	2,52	2,83
20	21,94		22,46	26,27	29,87	33,18	34,39	34,41
	8,16		7,68	2,27	1,08	1,19	1,59	1,50
21	12,31		16,82	18,23	19,14	19,99	20,86	21,30
	7,50		2,37	1,75	1,47	1,32	1,43	1,61
22	15,53		16,03	19,42	23,34	25,91	27,87	28,48
	5,70		5,63	1,90	0,93	1,00	1,13	1,35
23	10,40		12,92	14,13	15,20	15,85	16,45	16,98
	7,56		4,95	3,88	2,74	2,07	1,57	1,20
24	11,28		15,67	17,06	18,59	19,65	20,68	20,63
	6,87		1,98	1,09	0,73	0,59	0,64	0,80

TABELA 5.20 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 16 a 24

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL								
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração						
		<table border="1"> <tr> <td>Tmax(N)</td> </tr> <tr> <td>Tmin(N)</td> </tr> </table>						Tmax(N)
	Tmax(N)							
Tmin(N)								
T _{Emx} (N)	Frequências							
T _{E_{mi}} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6		
25	17,32	17,43	18,09	19,68	21,13	22,09	22,50	
	10,73	10,83	9,57	7,52	6,17	4,90	4,42	
26	22,32	22,65	25,87	28,62	30,61	31,83	32,78	
	8,19	8,22	3,16	0,82	0,37	0,73	0,78	
27	12,29	12,47	13,08	14,57	16,26	17,66	18,12	
	7,27	7,39	6,69	4,61	2,72	1,32	0,86	
28	16,26	16,38	19,03	21,87	24,34	25,74	26,71	
	6,10	5,62	2,02	0,79	0,15	0,09	0,21	
29	12,13	12,32	13,01	14,34	16,40	17,33	18,73	
	7,27	7,52	6,65	4,53	2,37	0,97	0,50	
30	17,39	17,71	20,87	24,29	26,95	28,68	29,64	
	6,47	6,25	2,45	1,33	0,76	0,82	0,70	

TABELA 5.21 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 25 a 30

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR VERTICAL							
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração		Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração			
				Tmax(N)	Tmin(N)		
	T _{Emx} (N)	Frequências					
T _{Emi} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6	
31	14,27	16,82	18,00	18,44	18,93	18,91	18,93
	12,41	9,45	9,02	8,59	8,53	8,65	8,09
32	15,82	15,97	17,69	19,94	21,60	22,61	22,82
	12,58	12,65	10,83	8,59	7,11	6,22	5,61
33	11,17	13,38	14,47	14,82	15,31	15,67	15,77
	9,73	7,29	6,75	5,84	5,43	5,37	5,31
34	11,83	12,09	13,50	15,31	17,00	18,30	19,00
	9,18	9,57	8,00	5,88	4,02	2,74	2,02

TABELA 5.22 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{OS} 31 a 34

LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO								
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração						
		<table border="1"> <tr> <td>Tmax(N)</td> </tr> <tr> <td>Tmin(N)</td> </tr> </table>						Tmax(N)
	Tmax(N)							
Tmin(N)								
T _{Emx} (N)	Frequências							
T _{Em1} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6		
35	14,80	16,71	17,37	17,94	18,13	18,25	18,54	
	11,38	9,53	8,65	8,34	7,96	7,87	7,69	
36	16,92	16,88	18,31	19,87	21,08	21,79	22,26	
	10,82	10,62	8,66	6,86	5,41	5,00	4,48	
37	11,26	12,71	13,44	14,23	14,66	15,06	15,15	
	8,36	6,78	5,91	5,36	4,98	4,68	4,50	
38	12,05	12,50	13,27	14,75	15,96	17,05	17,32	
	7,57	8,26	7,38	5,44	3,47	2,33	1,65	

TABELA 5.23 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 35 a 38

LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR							
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração					
		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Tmax(N) Tmin(N) </div>					
	T _{Emx} (N)	Frequências					
T _{Emi} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6	
39	42,65	42,63	44,81	48,70	55,25	59,45	62,57
	28,03	28,76	25,70	19,23	11,22	8,78	6,77
40	50,10	51,28	57,50	66,78	74,71	79,39	82,90
	24,35	23,96	13,11	5,30	2,43	2,00	1,68
41	62,21	68,35	82,07	95,18	104,43	108,75	106,83
	17,33	9,46	0,55	0,03	-0,56	-0,80	-0,80
42	30,03	29,85	31,71	34,82	39,63	44,29	48,14
	20,17	20,36	18,71	14,31	8,98	5,27	2,84
43	34,46	35,16	40,85	48,21	56,66	63,62	66,33
	16,66	16,14	8,87	2,75	0,92	0,56	0,36
44	45,14	50,51	63,03	77,30	86,26	90,59	94,81
	13,37	8,23	0,73	0,20	-0,09	-0,35	-0,68
45	17,17	17,43	17,48	19,88	22,73	26,46	30,96
	11,39	12,37	10,52	8,22	5,45	2,65	1,51
46	20,36	20,53	24,11	30,17	37,18	45,90	51,49
	10,32	10,01	6,33	2,22	1,06	-0,14	0,40
47	27,05	31,10	41,34	54,48	66,45	75,14	73,52
	8,50	5,72	1,47	0,66	0,59	0,25	0,27
48	39,65	39,23	41,23	44,81	51,31	56,08	60,20
	26,21	26,64	24,52	18,09	9,82	7,18	3,94
49	34,10	34,18	40,32	48,26	57,74	67,52	72,36
	17,10	16,22	9,28	2,82	0,76	0,08	0,13
50	26,67	30,52	42,59	57,06	74,90	86,25	93,38
	8,03	5,60	0,90	0,16	0,04	-0,30	-0,58
51	34,21	34,04	37,21	41,99	48,30	54,23	58,50
	20,09	20,40	15,87	9,25	3,97	1,36	0,42
52	40,09	47,83	54,03	59,99	63,21	66,45	67,92
	26,09	16,04	10,33	6,02	5,07	4,05	5,48
53	48,16	48,49	55,06	64,37	74,24	82,02	86,37
	21,82	22,35	12,56	4,85	2,07	2,73	3,48

TABELA 5.24 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 39 a 53

LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR (Continuação)							
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração		Tmax(N)			
				Tmin(N)			
	T _{Emx} (N)	Frequências					
T _{Emi} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6	
54	28,85	34,33	40,20	45,32	50,65	55,74	57,96
	18,55	11,86	6,44	4,27	3,21	3,92	3,96
55	34,76	34,51	40,31	48,03	56,78	65,84	71,71
	15,68	16,33	9,34	3,34	2,03	2,66	3,16
56	28,11	34,60	39,21	44,93	51,45	54,80	57,00
	18,22	10,68	6,11	2,54	1,18	0,00	0,42
57	34,34	34,45	40,26	47,67	56,88	65,78	72,43
	15,44	15,76	8,90	3,50	1,66	0,37	0,63

TABELA 5.25 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 54 a 57

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL									
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração		Tmax(N) Tmin(N)					
		T _{Emx} (N)	T _{Emi} (N)	Frequências					
				f1	f2	f3	f4	f5	f6
58	27,88	27,38	27,95	30,66	34,37	39,01	43,65		
	18,13	18,63	18,18	13,96	9,32	5,10	2,36		
59	33,27	32,49	36,99	42,57	49,71	57,15	61,79		
	15,27	15,95	9,58	3,08	1,43	0,76	0,29		
60	16,50	16,15	16,61	18,10	20,40	23,17	27,36		
	10,78	10,89	10,78	8,86	6,06	3,28	1,21		
61	20,18	19,72	22,05	26,68	31,61	38,14	44,78		
	9,69	9,93	7,09	2,69	1,61	0,82	0,36		
62	28,06	27,46	27,92	30,62	34,36	39,46	44,63		
	18,41	18,71	18,42	14,28	9,61	4,85	2,14		
63	33,27	32,71	37,00	43,00	50,98	59,37	63,10		
	15,33	16,14	9,98	2,79	1,04	0,27	0,33		

TABELA 5.26 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 58 a 63

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR VERTICAL							
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração		Tmax(N)			
				Tmin(N)			
	T _{Emx} (N)	Frequências					
T _{Emi} (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6	
64	26,50	26,43	28,43	31,84	36,92	42,88	47,73
	21,28	21,94	19,13	14,75	9,48	4,35	3,29
65	27,65	28,02	31,73	37,14	44,55	51,82	57,63
	20,44	20,38	15,19	8,09	2,78	2,04	2,33
66	15,40	14,91	16,22	18,28	20,92	24,61	29,63
	12,26	12,51	11,17	8,56	5,88	2,82	1,90
67	16,10	16,23	18,36	21,84	26,38	33,18	38,74
	11,61	12,19	9,18	4,79	2,06	1,22	1,81

TABELA 5.27 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{OS} 64 a 67

LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO							
N° do Ensaio	Tensão Quase-Estática	Tensão Dinâmica no Ponto de Amarração		Tmax(N) Tmin(N)			
		Frequências					
	TEmx (N) TEmi (N)	f1	f2	f3	f4	f5	f6
68	27,61	27,13	27,91	30,46	34,33	39,23	44,18
	18,67	19,33	18,39	14,71	10,09	5,20	1,51
69	30,12	28,98	31,45	35,83	42,03	48,18	53,54
	17,33	17,74	14,86	8,25	3,31	1,87	1,47
70	16,48	16,31	16,59	18,23	20,72	23,89	28,06
	11,28	11,73	11,13	8,80	5,93	3,45	0,91
71	17,90	17,30	18,98	22,17	26,09	31,01	37,75
	10,56	10,82	9,14	5,33	2,28	1,20	0,62

TABELA 5.28 - RESULTADOS DINÂMICOS DOS ENSAIOS N^{os} 68 a 71

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE LINHAS DE AMARRAÇÃO

6.1 - Objetivos da Análise

O objetivo da análise apresentada neste capítulo é mostrar de forma qualitativa quais são as principais características e os principais parâmetros determinantes do comportamento dinâmico das linhas de amarração, quando seus pontos de amarração são submetidos a movimentos equivalentes aos de 1ª ordem da plataforma.

A análise foi desenvolvida a partir dos resultados do estudo experimental apresentado no capítulo anterior e com base em análises sobre o comportamento dinâmico de linhas apresentadas em trabalhos de Triantafyllou [10], [13] e Suhara [4], [5], [6], [7], [8].

Os resultados experimentais e as observações visuais efetuadas nos ensaios foram empregados como meio de verificar fisicamente o comportamento dinâmico descrito pelos autores acima citados e, para avaliar a consistência destes trabalhos com os resultados obtidos experimentalmente.

Neste processo são elucidadas as características principais bem como os parâmetros determinantes do comportamento dinâmico das linhas.

6.2 - Introdução de Algumas Definições Auxiliares

Para tornar mais simples a descrição do comportamento

dinâmico das linhas e, conseqüentemente, melhorar a apresentação e o entendimento da análise desenvolvida neste capítulo é interessante primeiro introduzir três definições auxiliares, relativas aos seguintes tópicos: um sistema de coordenadas auxiliar; a amplitude dinâmica da tensão no ponto de amarração; o coeficiente principal de rigidez da linha.

Estas definições serão úteis também no desenvolvimento do método de cálculo proposto no próximo capítulo.

6.2.1 - Sistema de Coordenadas Auxiliar

No capítulo 3 definiu-se como referência para o desenvolvimento do trabalho um sistema de coordenadas ortogonal cuja origem foi arbitrada sobre a posição do ponto de toque da linha no solo. Esta posição da origem foi escolhida apenas com o intuito de facilitar o desenvolvimento do estudo da estática de uma linha de amarração, não tendo nenhuma implicação sobre os resultados e análises apresentados tanto naquele capítulo como nos subsequentes.

No entanto, para facilitar o desenvolvimento do trabalho deste capítulo 6 em diante, é conveniente definir um sistema de coordenadas auxiliar com eixos paralelos aos do sistema definido no capítulo 3 mas com origem situada sobre a posição do ponto de amarração da linha, quando esta se encontra na configuração inicial de equilíbrio estático.

A figura 6.1 ilustra este sistema de coordenadas auxiliar e define também a coordenada angular θ que permite caracterizar uma direção qualquer de deslocamento do ponto

de amarração, no plano da linha, em relação a este sistema de eixos. Esta coordenada angular tem sua origem sobre o eixo horizontal e cresce positivamente para uma rotação no sentido anti-horário.

Esta mudança na origem do sistema de coordenadas não provoca nenhuma alteração nos resultados e análises apresentados nos capítulos anteriores, em particular naqueles apresentados no capítulo 3, mas torna, no entanto, mais simples a apresentação dos resultados e análises deste e do próximo capítulo.

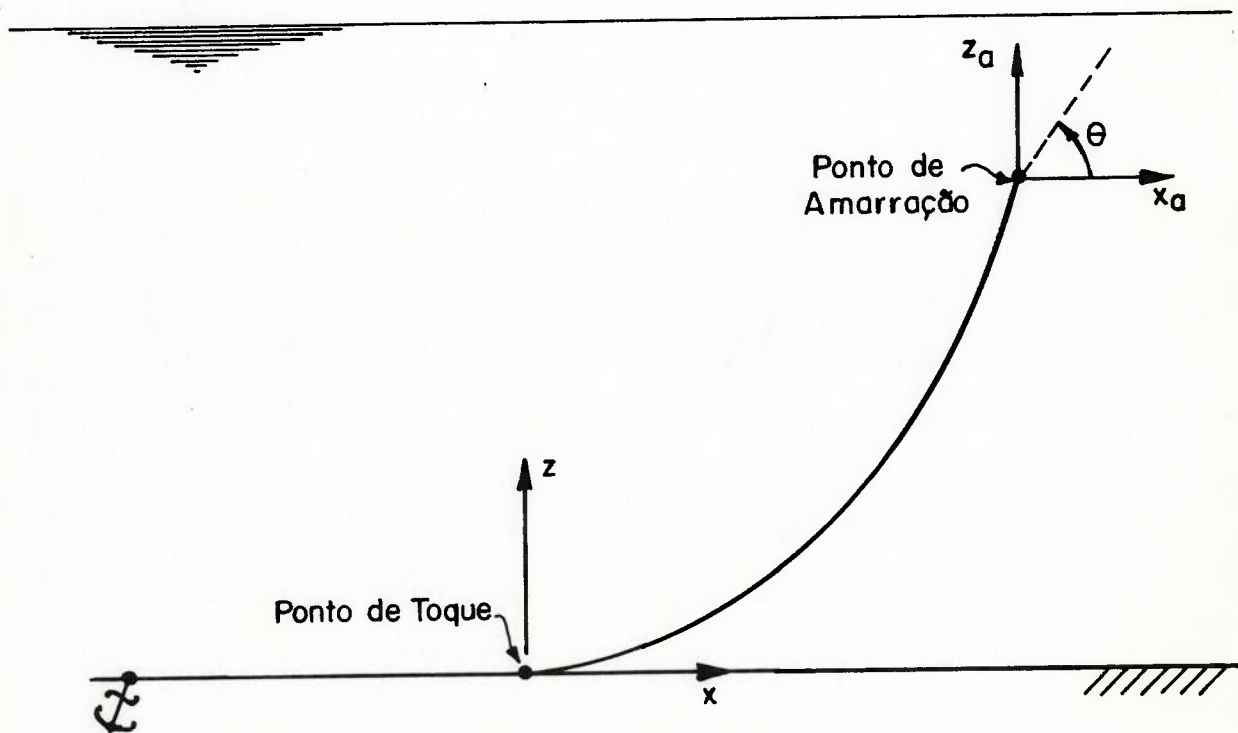


FIGURA 6.1 - SISTEMA DE COORDENADAS AUXILIAR

6.2.2 - A Amplitude Dinâmica da Tensão

A amplitude dinâmica da tensão no ponto de amarração é definida como a diferença entre a tensão (T) atuante neste ponto, durante um movimento oscilatório qualquer do mesmo, e a tensão no mesmo ponto quando a linha se encontra na configuração inicial de equilíbrio estático (T_0).

Tendo em vista o objetivo da análise do comportamento dinâmico das linhas é interessante definir esta amplitude dinâmica em termos das tensões máxima e mínima que ocorrem no ponto de amarração, durante a execução de um movimento numa dada frequência.

A amplitude dinâmica associada a tensão máxima é definida como:

$$\tau_s = T_{\max} - T_0 \quad (67)$$

onde : τ_s = amplitude dinâmica da tensão, calculada com base na tensão máxima.

A amplitude dinâmica associada a tensão mínima é definida como:

$$\tau_i = T_0 - T_{\min} \quad (68)$$

onde : τ_i = amplitude dinâmica da tensão, calculada com base na tensão mínima.

Pode-se ainda definir uma amplitude dinâmica média

(τ) dada por:

$$\tau = \frac{\tau_s + \tau_l}{2} \quad (69)$$

Para a resposta quase-estática pode-se determinar as amplitudes da tensão quase-estática, τ_{sq} e τ_{lq} e seu valor médio τ_q , substituindo-se, nas equações (67) e (68), os valores de T_{max} e T_{min} por T_{Emx} e T_{Eml} , respectivamente.

É evidente que, se o comportamento das linhas fosse perfeitamente linear, os valores de τ_s , τ_l , e τ , em cada frequência, seriam iguais. No entanto isto não é o que se verifica na realidade, como será visto mais adiante neste capítulo.

6.2.3 - O Coeficiente Principal de Rigidez

No capítulo 3 definiu-se, no item 3.8.1, os coeficientes de rigidez da linha, em termos da tensão no ponto de amarração, para deslocamentos deste ponto na direção dos dois eixos de coordenadas "x" e "z". Estes coeficientes foram denominados K_x e K_z , respectivamente, e são determinados a partir das equações (42), (43), (44), (45) e (31).

Uma vez conhecidos os coeficientes K_x e K_z pode-se então calcular o coeficiente de rigidez (K_θ), relativo à tensão T , para uma direção θ qualquer de deslocamento do ponto de amarração, empregando-se a seguinte equação :

$$K_\theta = K_x \cdot \cos(\theta) + K_z \cdot \sin(\theta) \quad (70)$$

A partir da equação (70) e de sua derivada em relação a θ é imediato determinar o máximo valor que a rigidez K_θ pode atingir, para a linha de amarração em questão, e a direção de deslocamento em que ele ocorre.

Este valor máximo da rigidez calculada em termos da tensão T é simbolizado neste trabalho por K_L e é definido aqui como coeficiente principal de rigidez da linha de amarração. A direção de deslocamento para a qual a rigidez é máxima é simbolizada por θ_L .

Os valores de K_L e θ_L para uma linha de amarração, determinados a partir de equação (70), são dados por :

$$K_L = \sqrt{K_X^2 + K_Z^2} \quad (71)$$

$$\theta_L = \text{arctg} \left(\frac{K_Z}{K_X} \right) \quad (72)$$

Mostra-se na referência [27] que, para as configurações usuais de uma linha de amarração, a direção θ_L coincide aproximadamente com a direção determinada pela reta que une os pontos de toque e de amarração.

Também é simples verificar através da equação (70) que para uma direção perpendicular à direção θ_L o coeficiente de rigidez é nulo. Neste caso, uma vez conhecidos os valores de K_L e θ_L , é bastante fácil determinar a variação da tensão T no ponto de amarração para um deslocamento quase-estático deste ponto numa direção qualquer no plano da linha. Basta para isto projetar o deslocamento na direção θ_L e multiplicar o valor obtido pelo coeficiente K_L .

Com o procedimento descrito acima é imediato determinar a resposta quase-estática de uma linha a um deslocamento do ponto de amarração, sobre uma trajetória qualquer, desde que se admita um comportamento linear para a tensão neste ponto.

Em função destas características, o coeficiente K_L representa na realidade a rigidez da linha de amarração e a ele estão associados um coeficiente de rigidez geométrica K_{GL} e um coeficiente de rigidez elástica K_{EL} , compatíveis com o modelo de duas molas em série estabelecido no capítulo 3.

6.3 - A Resposta Dinâmica no Domínio da Frequência

Os resultados dinâmicos dos ensaios, apresentados nas tabelas 5.19 a 5.28 do capítulo anterior, foram dispostos em gráficos - um para cada ensaio - representativos da resposta dinâmica no domínio da frequência. Estes gráficos encontram-se no Apêndice A do trabalho e apresentam conjuntamente os resultados experimentais e os resultados do método de cálculo proposto no próximo capítulo.

Como exemplo, apresenta-se nas figuras 6.2 e 6.3 os gráficos referentes aos ensaios n^o 20 e n^o 49.

Cada gráfico indica, em forma adimensional, as tensões máxima e mínima medidas em cada frequência imposta no ensaio. Estas tensões estão adimensionalizados pela tensão no ponto de amarração na condição de equilíbrio estático inicial (T_0), de cada ensaio, cujos valores encontram-se nas tabelas 5.11 a 5.18 do capítulo anterior.

ENSAIO 20
 LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 $D=0,329$; $l_i=14,268m$; $A=0,073m$

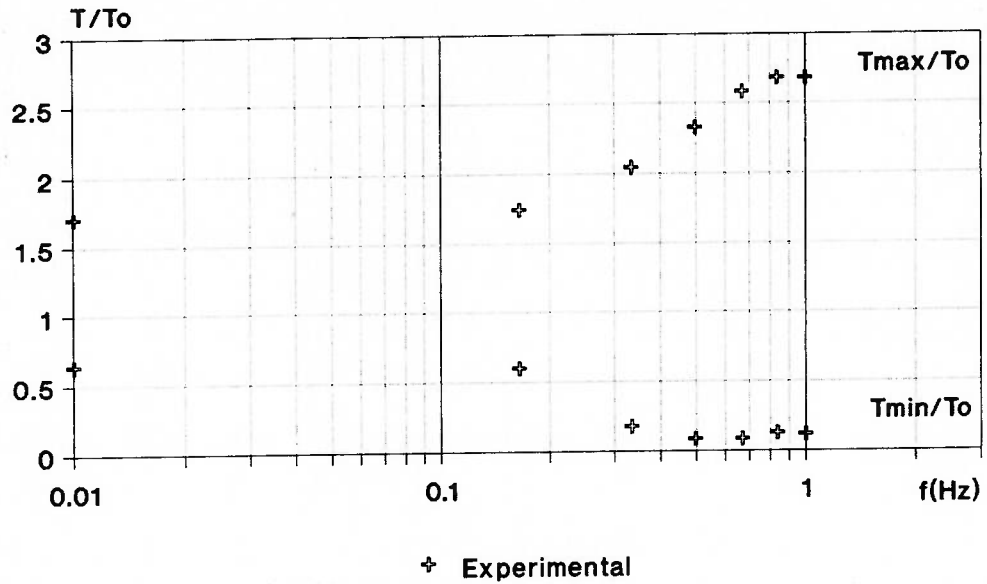


FIGURA 6.2 - RESPOSTA DINÂMICA DO ENSAIO 20

ENSAIO 49
 LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 $D=0,390$; $l_i=16,260m$; $A=0,055m$

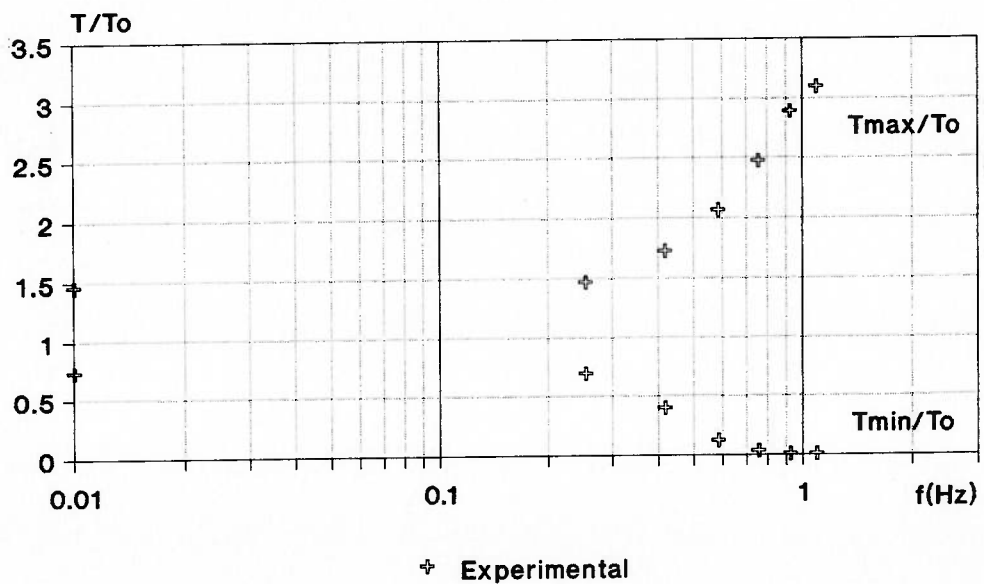


FIGURA 6.3 - RESPOSTA DINÂMICA DO ENSAIO 49

Os pontos nos gráficos que se encontram sobre o eixo das ordenadas indicam as tensões quase-estáticas medidas em cada ensaio (T_{Emx}/T_0 e T_{Em1}/T_0).

As frequências do movimento estão indicadas no eixo das abcissas, que está em escala logarítmica para facilitar a visualização do comportamento dinâmico.

Em uma primeira análise dos gráficos é imediato constatar que a resposta dinâmica no domínio da frequência apresenta um mesmo comportamento típico em todos os ensaios, que pode ser observado nas figuras 6.2 e 6.3.

Avaliando-se inicialmente o comportamento da tensão máxima verifica-se que, a partir da resposta quase-estática e enquanto as frequências são relativamente baixas, os valores desta tensão se mantêm aproximadamente constantes e iguais ao valor quase-estático.

A partir de uma certa frequência, no entanto, os valores de tensão máxima começam a crescer, caracterizando o início dos efeitos dinâmicos sobre a resposta da linha ou, em outras palavras, o surgimento da amplificação dinâmica na resposta. Nesta fase a amplitude dinâmica da tensão τ_s cresce com o aumento da frequência e, na maioria dos ensaios, verifica-se que esta amplificação dinâmica pode ser bastante acentuada.

Em alguns ensaios, após sucessivos aumentos da frequência, observa-se que o crescimento da amplitude dinâmica τ_s vai-se tornando mais lento até que, numa certa frequência, a tensão máxima atinge um valor máximo, que não é posteriormente ultrapassado. A partir desta frequência a tensão máxima permanece aproximadamente constante ou, em

alguns casos, começa a diminuir. Esta característica pode ser observada, por exemplo, nos gráficos dos ensaios 3, 5, 6, 8, 9, 15, 17, 18, 20, 31, 41 e 47.

O comportamento descrito acima sugere que a resposta dinâmica das linhas no domínio da frequência, em termos de tensão máxima, pode ser dividida em três fases distintas. Uma fase inicial, associada a baixas frequências, onde a resposta pode ser considerada como quase-estática. Uma segunda fase, caracterizada pela ocorrência de amplificação dinâmica, que sucede a fase quase-estática e se estende até a frequência em que o valor máximo da tensão máxima é atingido. E, finalmente, uma terceira fase onde a tensão máxima permanece estável com o aumento da frequência ou, eventualmente, começa a decrescer.

Um comportamento semelhante ou, mais apropriadamente, simétrico, se verifica para as tensões mínimas.

A partir da resposta quase-estática, e enquanto a frequência se mantém relativamente baixa, os valores da tensão mínima permanecem aproximadamente constantes e iguais ao valor quase-estático.

Quando se verifica o início dos efeitos dinâmicos a tensão mínima começa a diminuir e, conseqüentemente, a amplitude τ_1 começa a aumentar. A medida em que cresce a frequência esta tensão continua diminuindo, caracterizando a fase de amplificação dinâmica da resposta.

No entanto, após sucessivos aumentos da frequência, dois comportamentos distintos podem ocorrer com a tensão mínima.

O primeiro deles, a exemplo do que ocorre com a

tensão máxima, é a tensão mínima atingir um valor mínimo, não nulo, que não é posteriormente reduzido com novos aumentos da frequência. A partir da frequência em que este valor mínimo ocorre a tensão mínima tende a permanecer constante ou, eventualmente começa a crescer, como se pode observar nos resultados dos ensaios 19, 21, 31, 33 e 35.

O que se pode inferir também, a partir dos resultados destes ensaios, é que os valores máximo e mínimo das tensões máxima e mínima, respectivamente, são atingidos na mesma frequência, o que caracteriza, portanto, a condição em que ocorre a maior amplificação dinâmica da resposta da linha e, conseqüentemente, onde se verifica os maiores valores de τ_s e τ_l .

O segundo comportamento observado após o início da amplificação dinâmica ocorre quando a tensão mínima se reduz de tal forma que em determinada frequência acaba se tornando nula. Desta frequência em diante a tendência, pelo que se observou acima, seria a tensão mínima se tornar negativa. No entanto, como as linhas de amarração são incapazes de suportar esforços de compressão, a tensão mínima permanece nula, como se pode verificar nas respostas dos ensaios 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 28, 30, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 55, 56, 57, 59, 61, 63, 65, 67, 69 e 71.

Em alguns casos se observa também que, após sucessivos aumentos da frequência, a tensão mínima, que vinha se mantendo nula, começa a crescer, acompanhando o primeiro tipo de comportamento descrito acima. Este é o caso, por exemplo, do ensaio 3.

É fácil verificar matematicamente, através da equação (68), que os valores nulos da tensão mínima ocorrem quando a amplitude dinâmica τ_1 se iguala a tensão estática inicial (T_0).

Este tipo de comportamento se deve a incapacidade das linhas de amarração, formadas por correntes ou cabos, de resistir a esforços axiais de compressão.

Fisicamente esta incapacidade se traduz, no caso das correntes, na ocorrência de um afrouxamento, ou encavalamento, entre elos consecutivos, que provoca uma descontinuidade na geometria da catenária. No caso de linhas constituídas por cabos de aço ocorre uma instabilidade, ou flambagem da linha, que causa também o aparecimento de uma descontinuidade em sua geometria de catenária.

Nos ensaios - que foram realizados apenas com correntes - onde observou-se o comportamento acima, este afrouxamento ocorria de forma bastante visível e, de um modo geral, seu início se dava nas vizinhanças da posição do ponto de toque. Com o aumento posterior da frequência o afrouxamento se propagava ao longo do comprimento suspenso da linha, em direção ao ponto de amarração.

A ocorrência deste afrouxamento em linhas cujos pontos de amarração estão submetidos a movimentos cíclicos provoca o aparecimento de um fenômeno conhecido como "chicoteamento" da linha. Este chicoteamento nada mais é do que o retesamento da porção afrouxada da linha, devido à mudança na geometria provocada pelo movimento do ponto de amarração, quando este está se processando no sentido de esticar a linha. Este retesamento pode provocar cargas de

impacto bastante elevadas entre os elos que se encontram afrouxados, representando evidentemente uma condição a ser evitada no projeto das linhas.

Da mesma forma que para a tensão máxima, o comportamento da tensão mínima pode ser dividido nas mesmas três fases já descritas acima. Deve-se, no entanto, incluir uma alternativa para a terceira fase da resposta, no caso das tensões mínimas, que represente as situações em que ocorre o afrouxamento da linha, quando este fenômeno estiver presente na resposta.

As características da resposta dinâmica descritas acima são bastante gerais, podendo ser observadas em todos os ensaios do estudo experimental, independentemente do tipo de linha, da configuração geométrica, do tipo de trajetória e da amplitude do movimento.

Características idênticas podem ser observadas nos resultados apresentados por Suhara nas referências [4], [5], [6], [7] e [8] e por Triantafyllou na referência [10].

Para confirmar esta afirmação apresenta-se nas figuras 6.4 e 6.5 a seguir gráficos de resultados destes autores, reproduzidos das referências [5] e [10], respectivamente.

O gráfico apresentado na figura 6.4 mostra resultados experimentais obtidos por Suhara em dois ensaios com um mesmo modelo de corrente posicionado em duas configurações de equilíbrio inicial distintas, cujo ponto de amarração foi submetido a um movimento vertical oscilatório.

Os resultados de Suhara estão apresentados em termos dos valores máximos e mínimos da componente horizontal da

tensão no ponto de amarração, medidos em cada frequência ensaiada. Os valores das tensões estão adimensionalizados pelo valor da componente horizontal na configuração estática inicial.

**RESULTADOS DE SUHARA
MOVIMENTO LINEAR VERTICAL
 $l_i=9,100\text{m}; A=0,053\text{m}$**

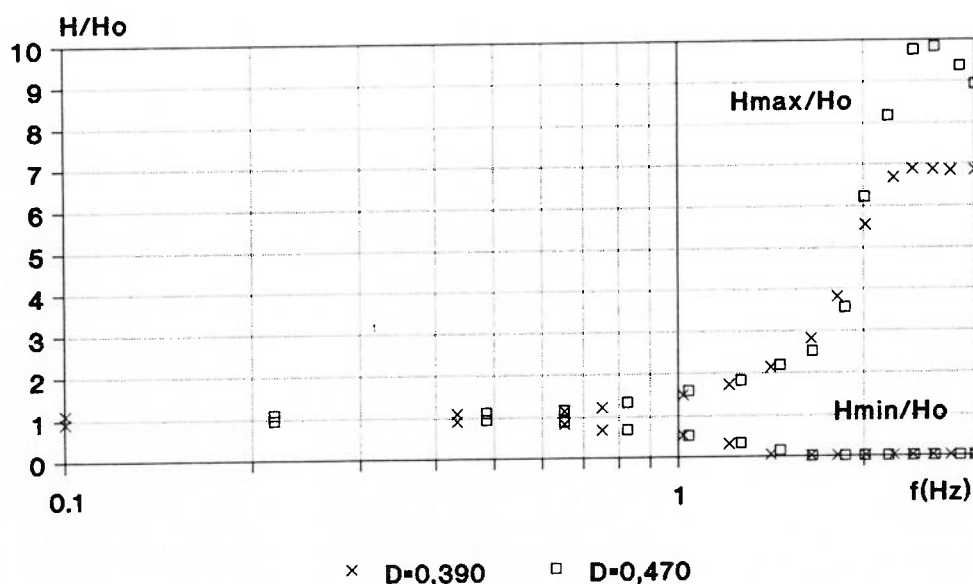


FIGURA 6.4 - RESULTADOS DE SUHARA NA REFERÊNCIA [5]

O gráfico da figura 6.5 mostra resultados obtidos por Triantafyllou através de uma simulação numérica, no domínio da frequência, da resposta de um cabo de amarração de uma plataforma semi-submersível submetido a um movimento hori-

zontal oscilatório, com amplitude igual a 10 vezes o diâmetro do cabo. As três curvas mostradas no gráfico representam, respectivamente, a resposta de um mesmo cabo, posicionado inicialmente em iguais configurações de equilíbrio estático, mas caracterizado com três valores distintos de rigidez elástica axial (EA).

Os resultados de Triantafyllou, na figura 6.5, estão apresentados na forma de RAO (Response Amplitude Operators), uma vez que a análise no domínio da frequência é linear. Mais especificamente, os resultados de tensão estão mostrados em termos do quociente entre a amplitude da tensão e a amplitude do movimento (τ/A).

RESULTADOS DE TRIANTAFYLLOU MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL

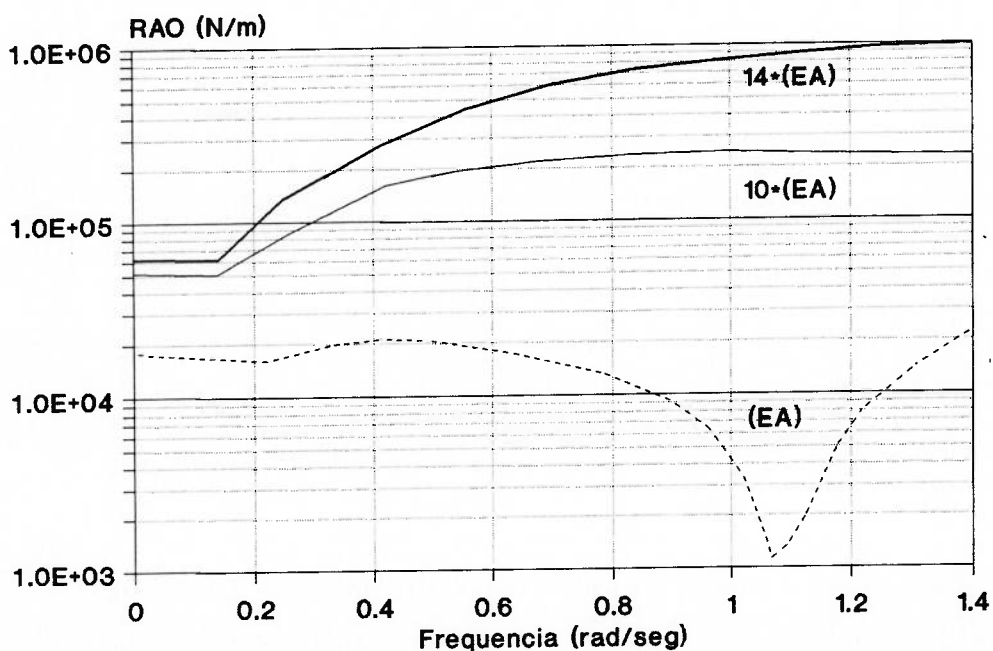


FIGURA 6.5 - RESULTADOS DE TRIANTAFYLLOU NA REFERÊNCIA [10]

É imediato observar nas figuras 6.4 e 6.5 que as respostas no domínio da frequência mostram um comportamento idêntico ao que foi descrito anteriormente, confirmando a afirmação feita acima.

Portanto, é possível concluir que a resposta dinâmica de linhas de amarração a movimentos de 1ª ordem segue um mesmo padrão típico, independente da configuração da linha, cujas características são aquelas descritas neste ítem.

Para reforçar esta conclusão é interessante discutir o comportamento da resposta no domínio do tempo registrada em cada ensaio. Uma análise deste comportamento está apresentada no próximo ítem.

6.4 - A Resposta Dinâmica no Domínio do Tempo

A resposta dinâmica no domínio do tempo, em cada ensaio, é representada pelo conjunto dos históricos de variação da tensão, referentes a cada frequência imposta ao movimento especificado para o ensaio.

Durante o estudo experimental foram registrados, através do sistema de aquisição de dados, todos os históricos de cada ensaio realizado, para formar a base de dados para a análise do comportamento dinâmico das linhas.

Entretanto, por questões de espaço, não é viável apresentar neste trabalho todos os históricos registrados no estudo experimental. Para a análise desenvolvida a seguir é suficiente mostrar alguns históricos típicos que caracterizam a resposta dinâmica das linhas, no domínio do tempo.

Assim, como exemplo, apresenta-se nas figuras 6.6,

6.7 e 6.8 históricos registrados em três ensaios distintos, que caracterizam a resposta no domínio do tempo em três condições distintas de solicitação.

Na figura 6.6 apresenta-se um histórico de tensão registrado no ensaio 27, para uma frequência de 0,328 Hz, que se situa na fase quase-estática da resposta no domínio da frequência deste ensaio.

A figura 6.7 mostra um histórico de tensão registrado no ensaio 68, para uma frequência de 0,916 Hz, situada na fase de amplificação dinâmica da resposta deste ensaio, e para a qual não se verificava a ocorrência de afrouxamento da linha.

A figura 6.8 mostra o histórico de tensão registrado no ensaio 22, para uma frequência de 0,658 Hz, também situada na fase de amplificação dinâmica da resposta, mas para a qual se verificava a ocorrência de afrouxamento na linha.

A análise dos históricos registrados no estudo experimental mostra que as respostas no domínio do tempo em todos os ensaios apresentam as mesmas características, independentemente do tipo de linha, da configuração geométrica e da trajetória e amplitude do movimento, conforme, aliás, o que já havia sido antecipado no item 5.7.2 do capítulo 5.

As únicas variações importantes que ocorrem nos históricos podem ser observadas dentro de um mesmo ensaio, e estão diretamente relacionadas com a variação da frequência e com a fase típica da resposta em que ela se encontra. As características gerais, no entanto, são preservadas de ensaio para ensaio e podem ser observadas nos históricos das figuras 6.6, 6.7 e 6.8.

ENSAIO 27
LINHA 1 - MOVIMENTO LINEAR HORIZONTAL
 $f = 0,328 \text{ Hz}$

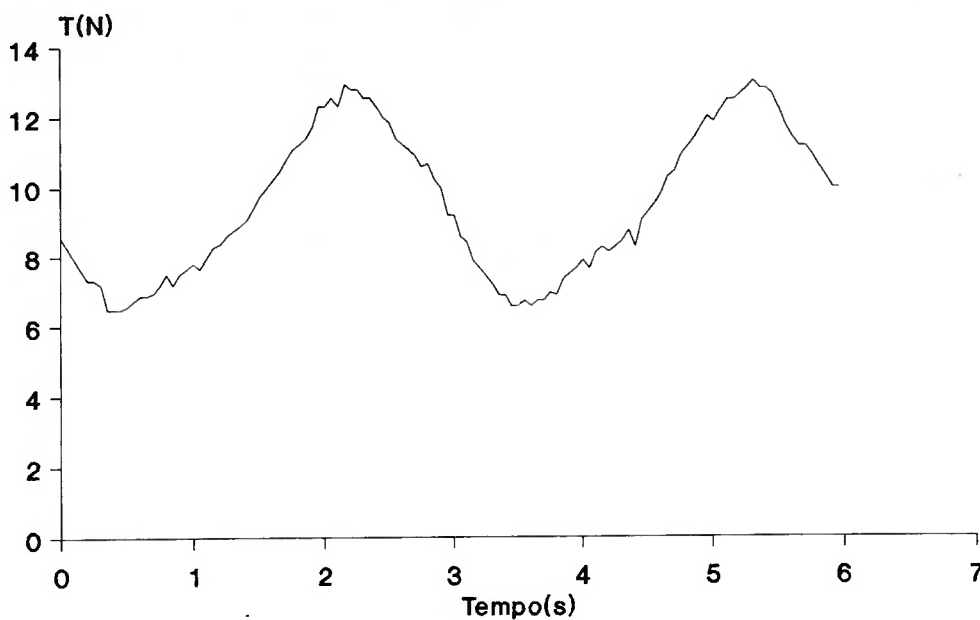


FIGURA 6.6 - RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO NO ENSAIO 27

ENSAIO 68
LINHA 2 - MOVIMENTO LINEAR INCLINADO
 $f = 0,916 \text{ Hz}$

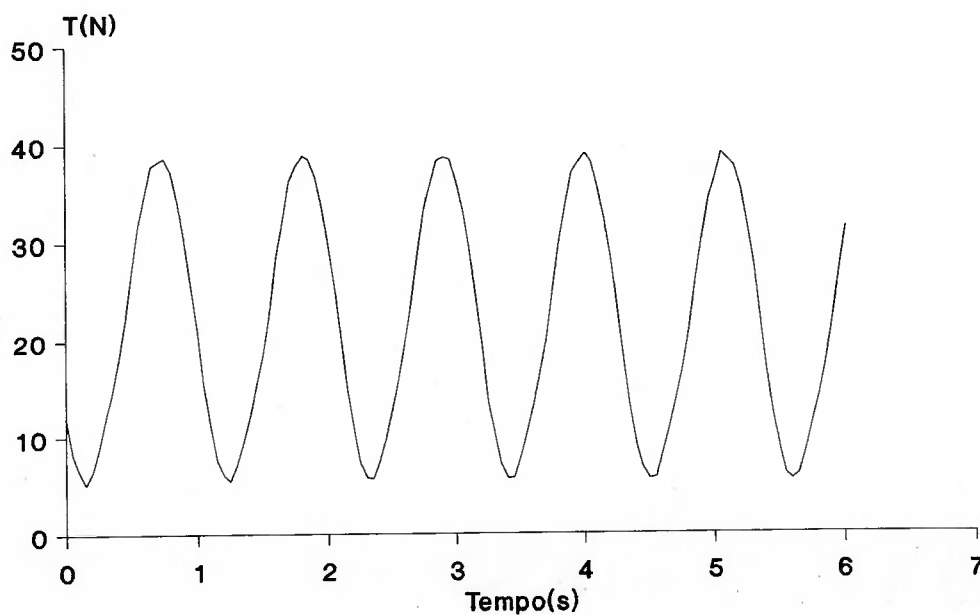


FIGURA 6.7 - RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO NO ENSAIO 68

ENSAIO 22
LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 $f = 0,658 \text{ Hz}$

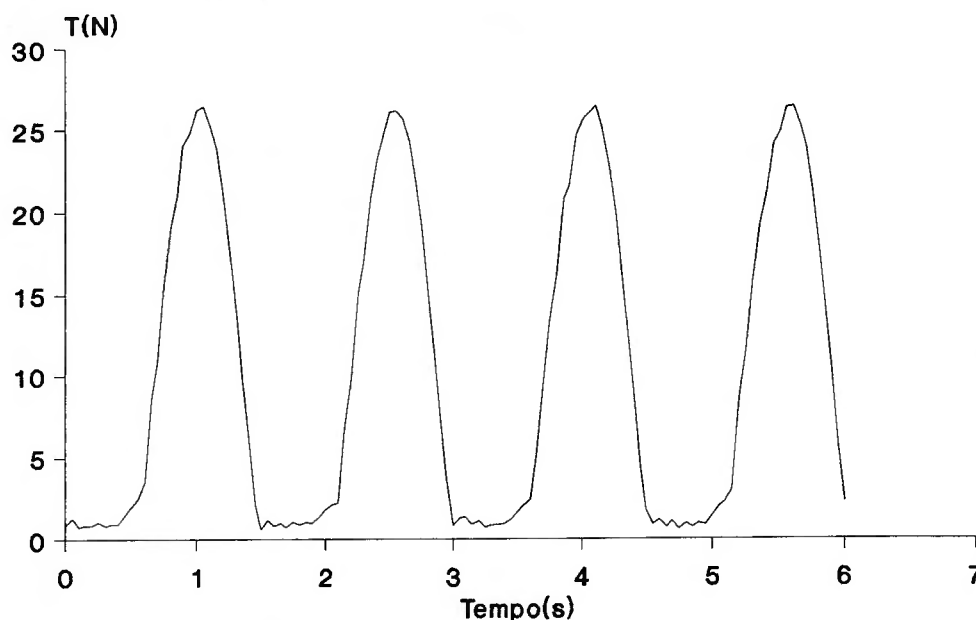


FIGURA 6.8 - RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO NO ENSAIO 22

Os históricos das figuras 6.6 e 6.7 indicam uma resposta no domínio do tempo com características quase-harmônicas, acompanhando as características da solicitação e sugerindo, portanto, um comportamento quase-linear.

O mesmo comportamento pode ser observado em todos os históricos dos demais ensaios, referentes a frequências em que não se observava afrouxamento da linha, indicando que este comportamento no domínio do tempo pode ser considerado geral para as linhas de amarração.

Por outro lado, o histórico da figura 6.8 mostra que as características da resposta no domínio do tempo são bastante alteradas quando ocorre o afrouxamento da linha. Nes-

te caso a resposta é caracterizada por uma forte não-linearidade, devida à incapacidade das linhas em suportar esforços de compressão, e perde a característica quase-harmônica observada nas situações isentas de afrouxamento.

No entanto, mesmo com estas condições, verifica-se que a forma dos históricos referentes a todas as frequências onde ocorre o afrouxamento, nos demais ensaios, é similar à do histórico apresentado na figura 6.8.

Esta constatação permite que se separe genericamente o comportamento dos históricos referentes à situação de afrouxamento em duas fases distintas durante um ciclo do movimento. Uma primeira fase durante a qual a linha se mantém afrouxada e a tensão permanece nula, caracterizada no histórico por um intervalo de tempo onde os pontos do registro permanecem numa faixa limitada de tensão muito próxima de zero, e uma segunda fase onde a tensão não é nula e a forma do histórico volta a apresentar um comportamento do tipo quase-harmônico.

É interessante observar que o comportamento da resposta nesta segunda fase mostra que o afrouxamento não provoca uma mudança radical na resposta da linha, pelo menos em termos da tensão máxima no ponto de amarração. Isto pode ser confirmado quando se verifica, nas respostas no domínio da frequência, que o comportamento da tensão máxima não sofre alterações significativas quando a solicitação sobre a linha passa para uma faixa de frequência em que ocorre afrouxamento.

A análise apresentada acima indica, portanto, que as características da resposta no domínio do tempo são as

mesmas em todos os ensaios, reforçando assim a idéia de que a resposta dinâmica das linhas aos movimentos de 1ª ordem segue um mesmo padrão típico, independente das características físicas e geométricas das mesmas e do tipo de trajetória imposta ao ponto de amarração.

Para finalizar a caracterização deste padrão de resposta apresenta-se no próximo item uma análise das principais características não-lineares observadas na resposta das linhas ensaiadas.

6.5 - Características Não-Lineares da Resposta das Linhas

De acordo com a análise apresentada no item 4.6 do capítulo 4 o problema dinâmico das linhas de amarração apresenta características não-lineares que podem provocar efeitos importantes na resposta aos movimentos de 1ª ordem.

Dentre estas características duas são consideradas as mais relevantes: a não-linearidade geométrica e a não-linearidade das forças de amortecimento viscoso.

Os efeitos destas duas características não-lineares mais importantes foram observados nos resultados do estudo experimental e podem ser evidenciados quando se analisa as respostas no domínio da frequência de todos os ensaios.

6.5.1 - Os Efeitos da Não-Linearidade Geométrica

A não-linearidade geométrica está associada a uma característica intrínseca das linhas de amarração em forma de catenária, que é responder a um deslocamento em seu ponto

de amarração através de uma mudança acentuada em sua geometria. Como consequência desta característica os esforços no ponto de amarração variam de forma não-linear com este deslocamento, conforme o que foi visto anteriormente no item 3.7 do capítulo 3. A este comportamento não-linear dos esforços dá-se o nome de não-linearidade geométrica.

A presença deste tipo de não-linearidade foi observada em todos os ensaios do estudo experimental e pode ser verificada quando se analisa as respostas quase-estáticas das linhas, nos gráficos de resposta no domínio da frequência apresentados no Apêndice A.

Nestes gráficos, a posição dos pontos que representam a resposta no domínio da frequência, em relação ao valor unitário de T/T_0 , pode ser avaliada matematicamente através de um rearranjo das equações 67 e 68 que definem as amplitudes dinâmicas da tensão. Estas equações podem ser expressas da seguinte forma:

$$\frac{\tau_s}{T_0} = \left(\frac{T_{\max}}{T_0} - 1 \right) \quad (73)$$

$$\frac{\tau_i}{T_0} = \left(1 - \frac{T_{\min}}{T_0} \right) \quad (74)$$

Os termos a direita nestas equações indicam a posição, em relação ao valor unitário de T/T_0 , dos pontos que, numa dada frequência, representam a resposta da linha no domínio da frequência. É imediato verificar que estas posições estão diretamente relacionadas com as amplitudes τ_s e τ_i . Em particular, no caso da resposta quase-estática,

a posição dos pontos que a representam estão associadas às amplitudes τ_{sq} e τ_{iq} .

Se o comportamento das linhas fôsse perfeitamente linear os valores das tensões máxima e mínima quase-estáticas seriam dados por:

$$T_{Emx} = T_0 + K_L \cdot \delta_L \quad (75)$$

$$T_{Emi} = T_0 - K_L \cdot \delta_L \quad (76)$$

onde : δ_L = amplitude do deslocamento projetado na direção θ_L .

Neste caso, os valores de τ_{sq} e τ_{iq} seriam os mesmos e iguais ao seu valor médio τ_q . Consequentemente os termos à direita nas equações (73) e (74) seriam também iguais e os pontos sobre o eixo das ordenadas, em todos os gráficos do apêndice A, estariam situados simetricamente em relação ao valor unitário da relação T/T_0 .

No entanto, é imediato verificar nos gráficos que os pontos situados sobre o eixo das ordenadas, representando a resposta quase-estática, não se encontram simetricamente posicionados em relação ao valor unitário da relação T/T_0 . Em outras palavras, as amplitudes de tensão quase-estática τ_{sq} e τ_{iq} não são iguais, indicando um comportamento não-linear das tensões quase-estáticas no ponto de amarração. Isto pode ser claramente observado, por exemplo, nas figuras 6.2 e 6.3 que reproduzem os resultados dos ensaios 20 e 49, respectivamente.

Este efeito, constatado nas respostas obtidas nos ensaios, representa a não-linearidade geométrica das linhas de amarração em catenária.

O efeito da não-linearidade geométrica pode ser avaliado numericamente definindo-se o parâmetro $\Delta\tau$ que representa a diferença percentual entre a amplitude média τ e as amplitudes τ_s e τ_i . Em termos matemáticos este parâmetro pode ser escrito como:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_s - \tau}{\tau} \cdot 100\% \quad (77)$$

O valor de $\Delta\tau$ indica a intensidade da não-linearidade geométrica. Quanto maior a diferença entre os valores de τ_s , τ_i e τ maior será o valor de $\Delta\tau$, indicando um efeito mais intenso da não-linearidade geométrica. Se os valores de τ_s , τ_i e τ fossem iguais, o valor de $\Delta\tau$ seria nulo, indicando uma resposta de natureza linear.

Para cada ensaio, o efeito da não-linearidade geométrica pode ser avaliado determinando-se os valores de τ_s , τ_i , τ e $\Delta\tau$ em cada frequência imposta ao movimento. Como exemplo apresenta-se nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 os valores destes parâmetros para os ensaios 42, 43 e 44, respectivamente.

Nestas tabelas, os valores dos parâmetros para a resposta quase-estática estão discriminados nas colunas representando a frequência f_0 . Apresenta-se também, em cada frequência, o valor do parâmetro τ/Δ (RAO), que representa o quociente entre a amplitude média da tensão e a amplitude do movimento imposto, e o valor do parâmetro τ_s/Δ .

ENSAIO 42: LINHA 2 - MOV. CIRCULAR ($\lambda = 0.032\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	4.35	4.16	5.81	10.21	15.54	19.25	21.68
τ_s	5.51	5.33	7.19	10.30	15.11	19.77	23.62
τ	4.93	4.75	6.50	10.26	15.33	19.51	22.65
$\Delta\tau\%$	11.80	12.30	10.60	0.40	1.40	1.30	4.30
τ_s/λ	172.20	166.60	224.70	321.90	472.20	617.80	738.10
τ/λ	154.10	148.30	203.10	320.50	478.90	609.70	707.80

Tabela 6.1

ENSAIO 43: LINHA 2 - MOV. CIRCULAR ($\lambda = 0.058\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	7.09	7.61	14.88	21.00	22.83	23.19	23.39
τ_s	10.71	11.41	17.10	24.46	32.91	39.87	42.58
τ	8.90	9.51	15.99	22.73	27.87	31.53	32.99
$\Delta\tau\%$	20.30	20.00	6.90	7.60	18.10	26.50	29.10
τ_s/λ	184.70	196.70	294.80	421.70	567.40	687.40	734.10
τ/λ	153.40	164.00	275.70	391.90	480.50	543.60	568.70

Tabela 6.2.

ENSAIO 44: LINHA 2 - MOV. CIRCULAR ($\lambda = 0.098\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	10.30	15.44	22.94	23.47	23.76	24.02	24.35
τ_s	21.47	26.84	39.36	53.63	62.59	66.92	71.14
τ	15.89	21.14	31.15	38.55	43.18	45.47	47.75
$\Delta\tau\%$	35.20	27.00	26.40	39.10	45.00	47.20	49.00
τ_s/λ	219.10	273.90	401.60	547.20	638.70	682.90	725.90
τ/λ	162.10	215.70	317.90	393.40	440.60	464.00	487.20

Tabela 6.3.

As configurações e condições dos ensaios 42, 43 e 44 são idênticas exceto pelo valor da amplitude do movimento. Estas amplitudes para estes ensaios são, respectivamente, 0,032m, 0,058m e 0,098m.

Os valores das tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 mostram alguns resultados interessantes. Inicialmente, é imediato verificar que os valores das amplitudes τ_s , τ_1 e τ são sempre distintos, tanto para a resposta quase-estática como nas demais frequências, o que resulta sempre em valores não nulos do parâmetro $\Delta\tau$. Este resultado confirma a presença da não-linearidade geométrica na resposta destes ensaios. Além disto, verifica-se também que os valores de τ_s são sempre maiores do que os valores de τ_1 , o que é coerente com o comportamento das tensões no ponto de amarração descrito no capítulo 3.

Muito embora as tabelas mostrem apenas resultados de três ensaios, os fatos acima foram constatados em todos os ensaios do estudo experimental, confirmando a presença da não-linearidade geométrica na resposta das linhas, seja de forma mais ou menos intensa.

Observa-se também nas tabelas que os valores de $\Delta\tau$, para a resposta quase-estática, crescem do ensaio 42 até o ensaio 44, acompanhando o crescimento da amplitude do movimento. Esta característica, como era de se esperar, mostra que o efeito não-linear aumenta com o crescimento da amplitude do movimento.

As tabelas também mostram que os valores do parâmetro τ/A não variam significativamente entre os três ensaios, no caso da resposta quase-estática. No entanto, nas outras

frequências, os valores de τ/A apresentam diferenças significativas, que se acentuam com o aumento da amplificação dinâmica. Este resultado sugere a presença de outro tipo de efeito não-linear, que, como será visto mais adiante, está relacionado com as forças viscosas que atuam nas linhas.

O comportamento acima pôde também ser verificado em outros conjuntos de ensaios nos quais apenas a amplitude do movimento variava entre as condições de cada ensaio do conjunto.

Outro fato que se observa nas tabelas acima é a tendência de diminuição dos valores de $\Delta\tau$ a medida em que cresce a frequência do movimento, até o ponto em que se inicia o afrouxamento. Isto pode ser claramente constatado no ensaio 42 onde o parâmetro $\Delta\tau$ assume valores próximos de 12% em baixas frequências, e se reduz a valores em torno de 1% na frequência f_s , quando então volta a crescer devido ao efeito fortemente não-linear provocado pelo afrouxamento da linha.

Este fato pode também ser observado na tabela do ensaio 43 e, de forma menos intensa, nos resultados do ensaio 44, onde o afrouxamento ocorre mais rapidamente, ainda em baixas frequências.

Este comportamento foi observado em todos os demais ensaios, indicando que com o aumento da frequência há uma diminuição do efeito da não-linearidade geométrica. Nos resultados dos ensaios isto é verificado através da diminuição dos valores de $\Delta\tau$ e da aproximação entre os valores de τ_s , τ_1 e τ e entre os valores de τ/A e τ_s/A , na medida em que cresce a frequência do movimento.

A explicação para este fato ficará clara quando mais adiante se analisar o comportamento físico das linhas observado durante a execução dos ensaios.

Outra característica interessante da não-linearidade geométrica pode ser constatada quando se compara, por exemplo, as respostas dos ensaios 27 e 29, ou 28 e 30, ou então 39 e 48.

Em cada um destes pares de ensaio as linhas estavam instaladas em configurações geométricas caracterizadas pelo mesmo valor do parâmetro D e foram submetidas ao mesmo tipo de movimento com amplitudes aproximadamente iguais, ou seja, à solicitações praticamente idênticas. A única diferença entre as configurações dos ensaios de cada par é o comprimento total da linha, ou seja, num ensaio a linha era mais comprida do que no outro.

Estas condições representam uma situação em que as linhas nos ensaios de cada par acima citado possuem uma rigidez geométrica idêntica (mesmo D) mas rigidez elásticas distintas (diferentes l_1), e estão submetidas à mesma solicitação.

Para se comparar as respostas dos pares de ensaios 27 e 29, 28 e 30 e 39 e 48 construiu-se as tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 que apresentam os valores dos parâmetros τ_s , τ_1 , τ e $\Delta\tau$ obtidos das respostas dos ensaios de cada um destes pares.

Em cada uma destas tabelas verifica-se que, para a resposta quase-estática, os valores de $\Delta\tau$ são sempre maiores nos ensaios onde o comprimento total é menor, ou seja, nos ensaios onde a linha apresenta uma maior rigidez elástica.

ENSAIO 27: LINHA 1 - MOV. LINEAR HORIZONTAL ($\lambda = 0.041\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	2.45	2.33	3.03	5.11	7.00	8.40	8.86
τ_s	2.57	2.75	3.36	4.85	6.54	7.94	8.40
τ	2.51	2.54	3.20	4.98	6.77	8.17	8.63
$\Delta\tau\%$	2.40	8.30	5.2	2.60	3.40	2.80	2.70
τ_s/λ	62.70	67.10	82.00	118.30	159.50	193.70	204.90
τ/λ	61.20	62.00	77.90	121.50	165.10	199.30	210.50

ENSAIO 29: LINHA 1 - MOV. LINEAR HORIZONTAL ($\lambda = 0.040\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	2.35	2.10	2.97	5.09	7.25	8.65	9.12
τ_s	2.51	2.70	3.39	4.72	6.78	7.71	9.11
τ	2.43	2.40	3.18	4.91	7.02	8.18	9.12
$\Delta\tau\%$	3.30	12.50	6.60	3.80	3.30	5.70	0.10
τ_s/λ	62.80	67.50	84.80	118.00	169.50	192.80	227.80
τ/λ	60.80	60.00	79.50	122.60	175.40	204.50	227.90

Tabela 6.4.

ENSAIO 28: LINHA 1 - MOV. LINEAR HORIZONTAL ($\lambda = 0.085\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	3.62	4.10	7.70	8.93	9.57	9.63	9.51
τ_s	6.54	6.66	9.31	12.15	14.62	16.02	16.99
τ	5.08	5.38	8.51	10.54	12.10	12.83	13.25
$\Delta\tau\%$	28.70	23.8	9.50	15.30	20.90	24.90	28.20
τ_s/λ	76.90	78.40	109.50	142.90	172.00	188.50	199.90
τ/λ	59.80	63.30	100.10	124.00	142.30	150.90	155.90

ENSAIO 30: LINHA 1 - MOV. LINEAR HORIZONTAL ($\lambda = 0.085\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	3.46	3.68	7.48	8.60	9.17	9.11	9.23
τ_s	7.46	7.78	10.94	14.36	17.02	18.75	19.71
τ	5.46	5.73	9.21	11.48	13.10	13.93	14.47
$\Delta\tau\%$	36.60	35.80	18.80	25.10	30.00	34.60	36.20
τ_s/λ	87.80	91.50	128.70	168.90	200.20	220.60	231.90
τ/λ	64.20	67.40	108.40	135.10	154.10	163.90	170.20

Tabela 6.5.

ENSAIO 39: LINHA 2 - MOV. CIRCULAR ($\lambda = 0.030\text{m}$)							
	FREQUÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	7.01	6.28	9.34	15.81	23.82	26.26	28.27
τ_g	7.61	7.59	9.77	13.66	20.21	24.41	27.53
τ	7.31	6.94	9.56	14.74	22.02	25.34	27.90
$\Delta\tau\%$	4.10	9.40	2.30	7.30	8.20	3.70	1.30
τ_g/λ	253.70	253.00	325.70	455.30	673.70	813.70	917.70
τ/λ	243.70	231.20	318.50	491.20	733.80	844.50	930.00

ENSAIO 48: LINHA 2 - MOV. CIRCULAR ($\lambda = 0.029\text{m}$)							
	FREQUÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	6.02	5.59	7.71	14.14	22.41	25.05	28.29
τ_g	7.42	7.00	9.00	12.58	19.08	23.85	27.97
τ	6.72	6.30	8.36	13.36	20.75	24.45	28.13
$\Delta\tau\%$	10.40	11.20	7.70	5.80	8.00	2.50	0.60
τ_g/λ	255.90	241.40	310.30	433.80	657.90	822.40	964.50
τ/λ	231.70	217.10	288.10	460.70	715.30	843.10	970.00

Tabela 6.6.

Este comportamento indica que o efeito da não-linearidade geométrica se acentua quando cresce o quociente entre a rigidez elástica e a rigidez geométrica da linha.

Este resultado é coerente com o modelo de duas molas em série proposto para representar o comportamento quase-estático de uma linha de amarração, uma vez que se admita, como é usual, que o comportamento elástico dos materiais das linhas seja linear.

Usando este modelo e a equação (31), a rigidez da linha na direção principal θ_L pode ser escrita como:

$$K_L = K_{GL} \cdot \frac{1}{1 + 1/(K_{EL}/K_{GL})} \quad (78)$$

Através da equação (78) pode-se verificar que, para uma dada rigidez geométrica, quanto maior for a rigidez elástica - e portanto a relação K_{el}/K_{gl} - mais próximo do valor da rigidez geométrica será a rigidez da linha. Nesta situação, mais próximo de um comportamento puro de catenária inelástica será o comportamento da linha, o que acentua o efeito da não-linearidade geométrica sobre a resposta quase-estática da linha.

Inversamente, quanto menor a relação entre a rigidez elástica e a rigidez geométrica - que é o caso de linhas mais esticadas - maior será a absorção do deslocamento através de deformação elástica, reduzindo o efeito da não-linearidade geométrica na resposta quase-estática da linha.

6.5.2 - Os Efeitos Não-Lineares das Forças Viscosas

O movimento oscilatório da linha dentro da água provoca o aparecimento de forças de inércia e arrasto viscoso, causadas pela interação entre ela e o fluido, que atuam em todos os pontos ao longo da mesma.

Como de um modo geral os deslocamentos destes pontos são de ordem de grandeza bem maior do que o diâmetro característico da linha as forças fluidas podem ser modeladas através da equação de Morison.

Isto significa que a força de arrasto viscoso pode ser considerada proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre o fluido e um ponto qualquer ao longo da linha, sendo portanto uma força de caráter não-linear.

Apenas para raciocínio, a componente desta força de arrasto, atuando num ponto qualquer ao longo da linha, numa certa direção, pode ser representada matematicamente da seguinte forma:

$$\mathcal{F}_v = \frac{1}{2} \rho_a \cdot C \cdot d_c \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial t} \right| \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (79)$$

onde: \mathcal{F}_v = componente da força de arrasto, por unidade de comprimento da linha, numa direção especificada

C = coeficiente de arrasto da linha

u = deslocamento de um ponto qualquer da linha na direção especificada

Supondo que para um movimento harmônico do ponto de amarração a resposta, em termos de deslocamentos, seja também harmônica, a equação 79 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathcal{F}_v = \frac{1}{2} \rho_a \cdot C \cdot d_c \cdot \omega \cdot V \cdot |\cos(\omega t + \varphi)| \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (80)$$

onde: V = amplitude do movimento de um ponto ao longo da linha, na direção especificada

ω = frequência do movimento

Comparando-se este resultado com um amortecimento linear do tipo $(c \cdot \partial u / \partial t)$, onde "c" é o coeficiente de amortecimento, verifica-se através da equação 80 que, no caso não-linear, o coeficiente de amortecimento viscoso depende da amplitude V do movimento.

Para um sistema massa/mola/amortecedor com um grau de liberdade, onde o amortecimento é linear, sabe-se que a curva de resposta a uma excitação harmônica (função de transferência) é única e independe da amplitude do movimento. No entanto, quando o amortecimento é não-linear e do tipo daquele representado pela equação 79, sabe-se (ver referência [31]) que a resposta dinâmica passa a ser representada por diversas funções de transferência, uma para cada valor de amplitude estática associada ao módulo da força de excitação sobre o sistema de um grau de liberdade.

Através de uma analogia com o sistema de um grau de liberdade é possível constatar o efeito da não-linearidade das forças de arrasto na resposta das linhas quando se compara a resposta dinâmica em ensaios com condições idênticas exceto pela diferença na amplitude do movimento imposto.

Desconsiderando para efeito de análise a não-linearidade geométrica, se o amortecimento viscoso sobre as linhas fôsse linear em ensaios com as condições acima, o início da amplificação dinâmica na resposta deveria ocorrer exatamente na mesma frequência, em todos os ensaios considerados. A não ocorrência desta condição significa que as curvas de resposta (função de transferência) são distintas para diferentes amplitudes do movimento, caracterizando neste caso a existência de um amortecimento viscoso

não-linear, por analogia com o que se observa no sistema de um grau de liberdade.

Para se constatar a presença desta não-linearidade, considere-se por exemplo os pares de ensaio 62 e 63, 68 e 69 e 70 e 71, onde apenas a amplitude do movimento é alterada de um ensaio para outro em cada par.

Observando-se os gráficos de resposta destes ensaios pode-se verificar que no caso dos ensaios 62, 68 e 70, a terceira medida experimental a partir da resposta quase-estática apresenta valores de T_{max}/T_0 e T_{min}/T_0 aproximadamente iguais aos respectivos valores quase-estáticos.

Já no caso dos ensaios 63, 69 e 71, os valores desta terceira medida são diferentes dos quase-estáticos, indicando a existência de amplificação dinâmica na resposta. Como as frequências correspondentes a esta terceira medida são praticamente iguais nos ensaios de cada par, é evidente então que as curvas de resposta dinâmica nestes ensaios são distintas e a diferença entre elas está associada a diferença entre as amplitudes do movimento imposto, caracterizando portanto um efeito de caráter não-linear.

Com base na analogia proposta acima pode-se então concluir que os efeitos descritos acima são consequência do caráter não-linear das forças amortecimento viscoso que agem ao longo da linha durante sua oscilação.

Este resultado pode também ser verificado através das tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, que mostram os valores dos parâmetros τ_1 , τ_s , τ , $\Delta\tau$ e $\tau/4$ para os pares de ensaio acima referidos.

ENSAIO 62: LINHA 2 - MOV. LINEAR HORIZONTAL ($\lambda = 0.031\text{m}$)							
	FREQUÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	4.28	3.98	4.27	8.41	13.08	17.84	20.55
τ_s	5.37	4.77	5.23	7.93	11.67	16.77	21.94
τ	4.83	4.38	4.75	8.17	12.38	17.31	21.25
$\Delta\tau\%$	11.30	9.00	10.10	2.90	5.70	3.10	3.30
τ_s/λ	173.20	153.90	168.70	255.80	376.50	541.00	707.70
τ/λ	155.60	141.10	153.20	263.50	399.20	558.20	685.30

ENSAIO 63: LINHA 2 - MOV. LINEAR HORIZONTAL ($\lambda = 0.057\text{m}$)							
	FREQUÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	6.88	6.07	12.23	19.42	21.17	21.94	21.88
τ_s	11.06	10.50	14.79	20.79	28.77	37.16	40.89
τ	8.97	8.29	13.51	20.11	24.97	29.55	31.39
$\Delta\tau\%$	23.30	26.70	9.50	3.40	15.2	25.80	30.30
τ_s/λ	194.00	184.20	259.50	364.70	504.70	651.90	717.40
τ/λ	157.40	145.40	237.00	352.70	438.10	518.40	550.60

Tabela 6.7.

ENSAIO 68: LINHA 2 - MOV. LINEAR INCLINADO ($\lambda = 0.030\text{m}$)							
	FREQUÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	3.96	3.30	4.24	7.92	12.54	17.43	21.12
τ_s	4.98	4.50	5.28	7.83	11.70	16.60	21.55
τ	4.47	3.90	4.76	7.88	12.12	17.02	21.335
$\Delta\tau\%$	11.40	15.40	10.90	0.60	3.50	2.40	1.00
τ_s/λ	166.00	150.00	176.00	261.00	390.00	553.30	718.30
τ/λ	149.00	130.00	158.70	262.50	404.00	567.20	711.20

ENSAIO 69: LINHA 2 - MOV. LINEAR INCLINADO ($\lambda = 0.042\text{m}$)							
	FREQUÊNCIAS						
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
τ_i	5.47	5.06	7.14	14.55	19.49	20.93	21.33
τ_s	7.32	6.18	8.65	13.03	19.23	25.38	30.74
τ	6.40	5.62	8.30	13.79	19.36	23.16	26.04
$\Delta\tau\%$	14.50	10.00	4.30	5.50	0.70	9.60	18.10
τ_s/λ	174.30	147.10	206.00	310.20	457.90	604.30	731.90
τ/λ	152.30	133.80	197.50	328.30	461.00	551.30	619.90

Tabela 6.8.

ENSAIO 70: LINHA 2 - MOV. LINEAR INCLINADO ($\lambda = 0.036\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	2.30	1.85	2.45	4.78	7.65	10.13	12.67
τ_s	2.90	2.73	3.01	4.65	7.14	10.31	14.48
τ	2.60	2.29	2.73	4.72	7.40	10.22	13.58
$\Delta\tau\%$	11.50	19.20	10.30	1.40	3.40	0.90	6.70
τ_s/λ	80.60	75.80	83.60	129.20	198.30	186.40	402.20
τ/λ	72.20	63.60	75.80	131.00	205.4	283.90	377.10

ENSAIO 71: LINHA 2 - MOV. LINEAR INCLINADO ($\lambda = 0.050\text{m}$)							
	FREQÜÊNCIAS						
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
τ_i	2.98	2.72	4.40	8.21	11.26	12.34	12.92
τ_s	4.36	3.76	5.44	8.63	12.55	17.47	24.21
τ	3.67	3.24	4.92	8.42	11.91	14.91	18.57
$\Delta\tau\%$	18.80	16.00	10.20	2.50	5.4	17.20	30.40
τ_s/λ	87.20	75.20	108.80	172.60	251.00	349.40	484.20
τ/λ	73.40	64.80	98.40	168.40	238.10	298.10	371.30

Tabela 6.9.

Nestas tabelas observa-se que, para os dois ensaios de cada par, os valores de τ/λ nas frequências f_0 e f_1 são aproximadamente iguais. No entanto, a partir da frequência f_2 , os valores de τ/λ passam a apresentar uma diferença significativa, sendo maiores os valores nos ensaios onde a amplitude do movimento é maior.

Nesta frequência f_2 os valores de τ/λ nos ensaios 62, 68 e 70 são aproximadamente iguais aos valores quase-estáticos, mostrando que a resposta dinâmica ainda é de natureza quase-estática. Já nos ensaios 63, 69 e 71, os valores de τ/λ na frequência f_2 são bem maiores do que o valor quase-estático, indicando a existência de amplificação dinâmica na resposta.

Esta diferença entre os valores de τ/λ a partir de

uma certa frequência mostra que as funções de transferência dos dois ensaios de cada par são distintas, muito embora a única diferença entre as condições destes ensaios ocorra no valor da amplitude do movimento.

Este resultado, que já havia sido observado no item anterior, confirma a existência de um efeito não-linear na resposta das linhas que, por suas características, está associado ao caráter não-linear das forças de arrasto hidrodinâmicas.

6.6 - O Comportamento Físico das Linhas Ensaçadas

O comportamento dinâmico das linhas de amarração pode ser mais facilmente compreendido, através de um estudo experimental, quando se analisa os resultados numéricos à luz do comportamento físico das mesmas, observado durante os ensaios.

Entende-se aqui por comportamento físico das linhas as características dos movimentos de todos os pontos ao longo da linha como consequência dos deslocamentos impostos ao ponto de amarração, em cada frequência ensaiada.

Muito embora não tenha sido possível registrar, durante o estudo experimental, os movimentos dos pontos situados ao longo das linhas ensaiadas, a descrição das observações visuais efetuadas, juntamente com alguns resultados apresentados por Suhara nas referências [4], [5], [6], [7] e [8], permite que se mostre adequadamente as principais características do comportamento físico das linhas, quando submetidas aos movimentos de 1ª ordem.

Verificou-se no capítulo 3 que, em termos quase-estáticos, o deslocamento do ponto de amarração, a partir de uma determinada configuração estática inicial, faz com que todos os demais pontos ao longo de uma linha se desloquem de modo a ajustar a curva da catenária, ou a configuração geométrica, à nova posição do ponto de amarração.

Durante o estudo experimental este comportamento pôde ser perfeitamente constatado quando se procedia a determinação da resposta quase-estática em cada ensaio. Nesta fase, ao se obrigar o ponto de amarração a descrever de modo quase-estático a trajetória especificada para o ensaio, podia-se observar que cada ponto ao longo da linha descrevia uma trajetória própria, centrada em sua posição de equilíbrio inicial, fazendo com que a configuração geométrica da linha fôsse sendo ajustada para cada nova posição do ponto de amarração.

Exceto pelos pontos muito próximos do ponto de amarração podia-se verificar que as trajetórias percorridas pelos demais pontos ao longo da linha, durante estas simulações quase-estáticas, eram ou aproximadamente retas ou elipses muito fechadas, em função do ponto de amarração estar descrevendo uma trajetória linear ou circular.

A característica mais marcante observada nestes deslocamentos quase-estáticos dos pontos ao longo da linha - exceto para aqueles muito próximos do ponto de amarração - era que os mesmos ocorriam preponderantemente na direção vertical, ou seja, as trajetórias percorridas, fôsem elas retas ou elipses, mostravam que os deslocamen-

tos verticais eram de ordem de grandeza muito maior que os deslocamentos na direção horizontal.

Esta característica foi observada em todos os ensaios do estudo experimental e confirma os resultados obtidos no item 3.8 do capítulo 3. Neste item mostrou-se que, em linhas com configuração geométrica caracterizada por valor do parâmetro D entre 0,3 e 0,5, o deslocamento médio dos pontos situados sobre a porção suspensa ocorre preponderantemente na direção vertical, quando se desloca o ponto de amarração numa direção qualquer no plano da linha.

A partir da resposta quase-estática, ao se iniciar o processo de aumento da frequência, verificou-se que o comportamento descrito acima se mantinha enquanto as frequências eram relativamente baixas, ou seja, enquanto a resposta dinâmica permanecia na fase de natureza quase-estática.

No entanto, com o aumento posterior da frequência observava-se, em todos os ensaios, uma redução na amplitude dos deslocamentos dos pontos ao longo da linha, quando comparadas com as amplitudes dos deslocamentos observadas na simulação quase-estática.

A figura 6.9 a seguir ilustra este efeito observado sobre os deslocamentos dos pontos ao longo da linha para o caso de um movimento linear vertical do ponto de amarração. Nesta figura representa-se esquematicamente as configurações geométricas limites, relativas às posições extremas do ponto de amarração, observadas numa situação de resposta quase-estática e numa situação onde os efeitos dinâmicos são relevantes na resposta da linha.

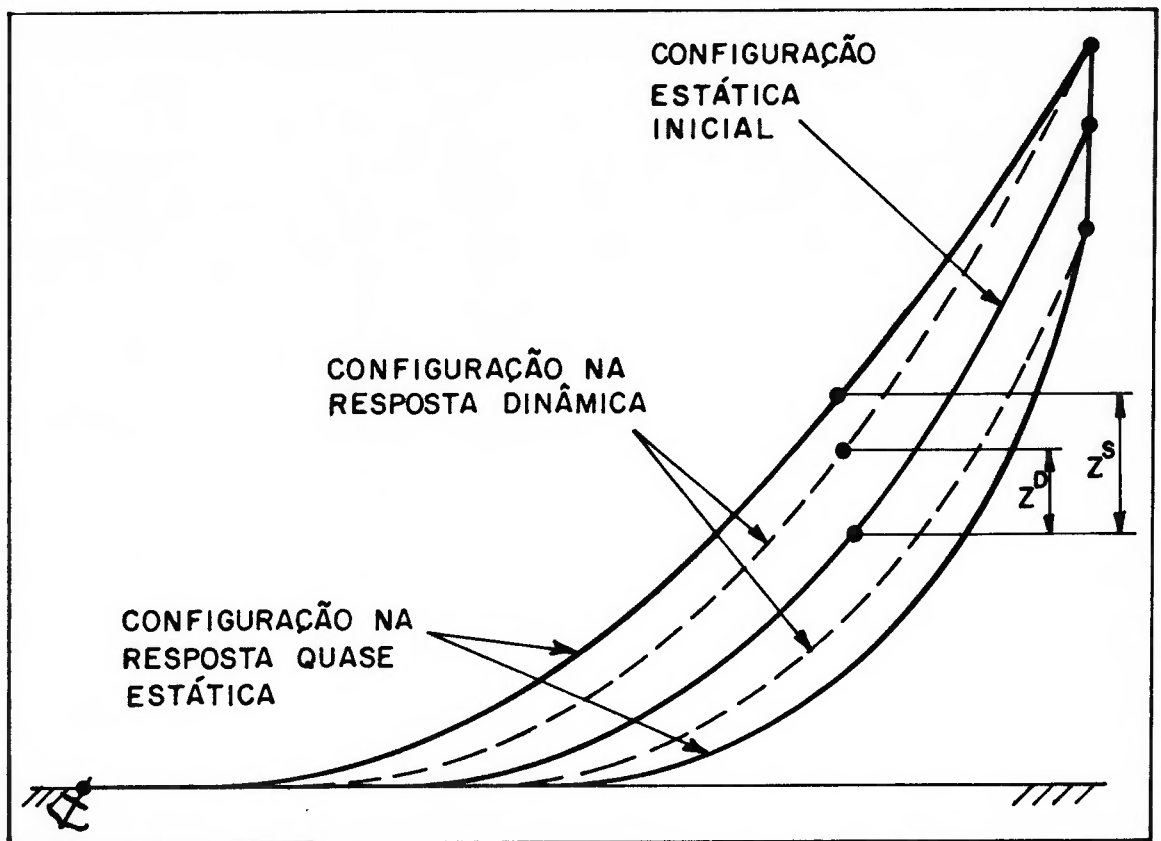


FIGURA 6.9 - OS EFEITOS DINÂMICOS SOBRE OS DESLOCAMENTOS DA LINHA

Esta redução na amplitude dos deslocamentos se acentuava na medida em que se aumentava a frequência do movimento. Em alguns ensaios, nas frequências mais altas, a redução nos deslocamentos era tão acentuada que a linha praticamente não oscilava transversalmente, de tal forma que os pontos ao longo da linha se movimentavam apenas na direção axial da mesma, com uma amplitude bastante reduzida.

Estas observações podem ser confirmadas através de alguns resultados experimentais publicados por Suhara na referência [5], que estão reproduzidos no gráfico apresentado na figura 6.10 a seguir.

RESULTADOS DE SUHARA MOVIMENTO LINEAR VERTICAL

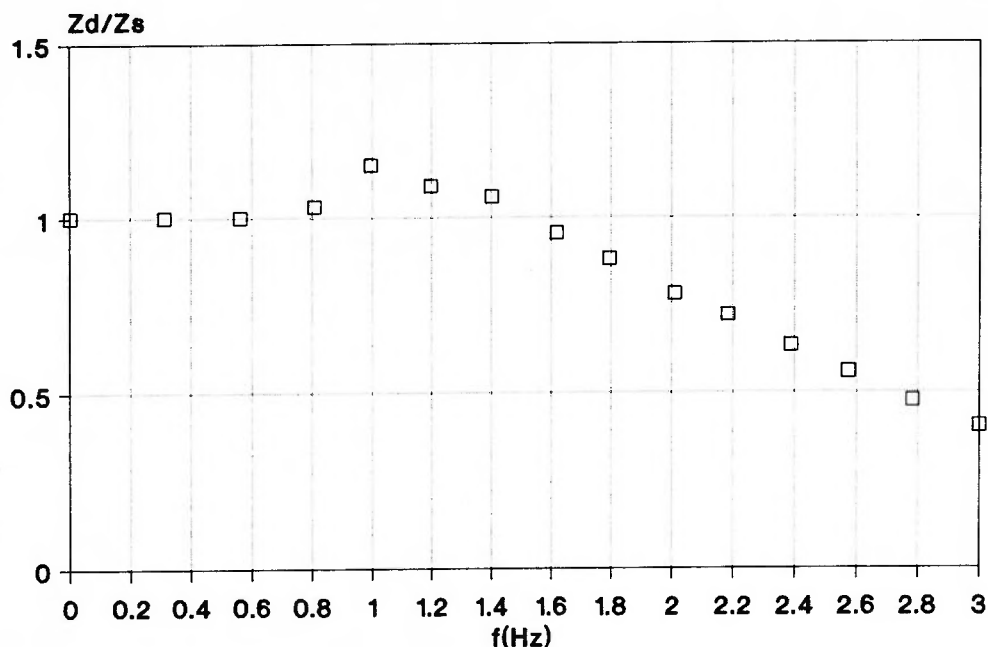


FIGURA 6.10 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO MÉDIO DE UMA LINHA ENSAIADA POR SUHARA

O gráfico da figura 6.10 mostra a variação da amplitude Z^D do movimento vertical do ponto médio do trecho suspenso da linha com a frequência do movimento imposto ao ponto de amarração. No gráfico esta amplitude está adimensionalizada pelo seu valor Z^S medido na resposta quase-estática. Para mais fácil entendimento, o significado dos parâmetros Z^D e Z^S está ilustrado na figura 6.9.

Os resultados experimentais de Suhara apresentados na figura 6.10 foram obtidos através de filmagem de uma corrente ensaiada em tanque de provas, cujo ponto de amarração foi submetido a um movimento harmônico com trajetória li-

near vertical.

Verifica-se na figura 6.10 que, a partir da resposta quase-estática, a amplitude do movimento do ponto médio cresce ligeiramente em baixas frequências mas, logo em seguida, a partir de uma determinada frequência, apresenta uma redução significativa em relação à amplitude quase-estática. É importante observar que a amplificação da amplitude em baixas frequências é bastante ligeira e é rapidamente amortecida com o crescimento posterior da frequência.

Este mesmo tipo de resultado é apresentado por Suhara nas referências [4], [6], [7] e [8], e confirma portanto as observações efetuadas durante o estudo experimental.

Esta redução bastante significativa nas amplitudes de oscilação da linha com o aumento da frequência sugere que o amortecimento viscoso nas linhas de amarração é bastante acentuado e desempenha um papel importante na resposta dinâmica das mesmas.

É possível avaliar a intensidade deste amortecimento nas linhas partindo-se de um argumento baseado em escalas e fazendo-se uma analogia com um oscilador harmônico de um grau de liberdade com amortecimento linear.

Admitindo-se que a resposta da linha em termos de movimentos seja harmônica quando seu ponto de amarração está submetido a uma solicitação harmônica, os termos da equação de Morison que representam as forças de inércia e amortecimento, por unidade de comprimento, agindo sobre um elemento da linha numa dada direção, podem ser representados através das seguintes equações:

$$\mathcal{F}_v = \frac{1}{2} \rho_a \cdot C \cdot d_c \cdot \omega^2 \cdot v^2 \cdot |\cos(\omega t + \varphi)| \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (81)$$

$$\mathcal{F}_i = -(m + m_a) \cdot \omega^2 \cdot v \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (82)$$

onde: \mathcal{F}_v = força de amortecimento

\mathcal{F}_i = força de inércia

A relação entre as amplitudes, ou valores máximos, destas forças pode ser obtida com o auxílio das equações 64 e 66 e resulta em:

$$\frac{\mathcal{F}_v}{\mathcal{F}_i} = \frac{2 \cdot C}{\pi \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_a} + Ca \right)} \cdot \frac{v}{d_c} \quad (83)$$

Para um oscilador harmônico simples de um grau de liberdade, com amortecimento linear do tipo " $c \cdot dv/dt$ ", pode-se mostrar que o grau de amortecimento presente no problema dinâmico é diretamente proporcional à relação entre as forças de amortecimento e as forças viscosas.

Para este tipo de oscilador define-se normalmente (ver referência [32]) o fator de amortecimento viscoso ξ (*viscous damping factor*) como:

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_n} \quad (84)$$

onde: c = coeficiente de amortecimento

m = massa do oscilador

ω_n = frequência natural do oscilador

O fator de amortecimento é utilizado como uma medida da intensidade do amortecimento a que está submetido o oscilador. Quando $\xi = 1$ diz-se que o amortecimento é crítico. Se este valor for maior do que 1 diz-se que o amortecimento é supercrítico e, se for menor do que 1, diz-se que o amortecimento é subcrítico.

Um resultado importante ocorre quando o valor de ξ é aproximadamente igual a 0,7. Nesta situação mostra-se [32] que a resposta dinâmica do oscilador não apresenta nenhuma amplificação e a amplitude máxima do movimento é aquela correspondente à resposta quase-estática. Isto indica que para valores de ξ ao redor ou maiores do que 0,7, os movimentos são rapidamente amortecidos com o aumento da frequência de excitação.

Para este oscilador simples é imediato mostrar que a relação entre as forças viscosas e as forças de amortecimento é dada por:

$$\frac{\mathcal{F}_v}{\mathcal{F}_1} = \frac{c}{m \cdot \omega} \quad (85)$$

onde: ω = frequência da força de excitação

Substituindo a equação 84 na equação 85 e rearranjando-se os termos obtem-se:

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_n} \cdot \frac{\mathcal{F}_v}{\mathcal{F}_1} \quad (86)$$

A equação 86 mostra que o fator de amortecimento característico do sistema é diretamente proporcional à razão entre as forças de amortecimento e as forças de inércia.

Admitindo que esta interpretação física da equação 86, válida para um oscilador simples, possa, por analogia, ser considerada válida para as linhas, pode-se, através das equações 83 e 86, obter uma estimativa da ordem de grandeza do fator de amortecimento característico do problema dinâmico das linhas. Combinando-se então estas duas equações obtém-se para as linhas o seguinte:

$$\xi_L \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_n} \cdot \frac{2 \cdot C}{\pi \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_a} + Ca \right)} \frac{v}{d_c} \quad (87)$$

onde: ξ_L = fator de amortecimento para as linhas de amarração

Valores típicos dos parâmetros físicos das linhas que aparecem na equação 87 podem ser obtidos na referência [2] e são:

$$C \cong 1,2$$

$$Ca \cong 1,0$$

$$0,1 < d_c < 0,2$$

$$\rho \cong 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_a \cong 1025 \text{ Kg/m}^3$$

Na referência [10] Triantafyllou apresenta uma série de gráficos e tabelas que permitem determinar as frequências naturais de linhas de amarração homogêneas. Verifica-se nesta referência que a primeira frequência natural de linhas na forma de catenária completa, instaladas com configurações geométricas usualmente encontradas em sistemas de ancoragem, pode ser obtida com bastante precisão através da seguinte equação:

$$\omega_n = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(1-\rho_a/\rho)}{(1 + Ca \cdot \rho_a/\rho)}} \cdot \left[\frac{D^2 + (\cosh D - 1)^2}{D^2 \cdot (\cosh D + 1)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{\frac{g}{P}} \quad (88)$$

onde: g = aceleração da gravidade

P = profundidade

Combinando-se então as equações 87 e 88 e verificando-se que, para valores do parâmetro D entre 0,3 e 0,5, o termo entre colchetes na equação 88 permanece praticamente constante e igual a 0,7, obtem-se o seguinte resultado:

$$0,0183 \cdot \omega \cdot V \cdot \sqrt{P} \leq \xi_L \leq 0,0365 \cdot \omega \cdot V \cdot \sqrt{P} \quad (89)$$

Considerando que atualmente têm-se procurado viabilizar o emprego de plataformas flutuantes de produção em

lâminas d'água em geral entre 500 e 1000 metros de profundidade e sabendo-se que os períodos típicos das ondas do mar situam-se em torno de 10 segundos, os limites que caracterizam a equação 89 ficam aproximadamente com os seguintes valores:

$$0,26 \cdot V \leq \xi_L \leq 0,73 \cdot V \quad (90)$$

A equação 90 mostra que os valores típicos do fatores de amortecimento presentes no problema dinâmico das linhas de amarração variam com a amplitude do deslocamento dos pontos situados ao longo da linha.

No ítem 3.9 do capítulo 3 verificou-se através das equações 56 e 57 que, para valores do parâmetro D entre 0,3 e 0,5, a amplitude média dos deslocamentos verticais dos pontos ao longo da linha é sempre superior a amplitude do deslocamento do ponto de amarração.

Em condições ambientais extremas típicas da Bacia de Campos, na costa brasileira, valores médios típicos da amplitude do movimento dos pontos de amarração de plataformas semi-submersíveis situam-se em torno de 1,5 metros.

Utilizando como referência este valor na equação 90, obtem-se aproximadamente os seguintes limites para caracterizar valores típicos do fator de amortecimento em linhas de amarração:

$$0,4 \leq \xi_L \leq 1,1$$

Fatores de amortecimento desta ordem de grandeza são considerados bastante elevados quando se toma por base o comportamento de um oscilador harmônico simples. Para estes valores de amortecimento um oscilador simples praticamente não apresenta amplificação dinâmica em sua resposta e os movimentos são amortecidos rapidamente com o aumento da frequência.

Estes valores mostram que nas linhas de amarração o amortecimento viscoso é bastante acentuado e indicam que em muitos casos a natureza do mesmo é crítica ou supercrítica.

É importante ressaltar que o resultado obtido através da analogia acima desenvolvida é bastante coerente com as observações realizadas no estudo experimental e com os resultados experimentais apresentados por Suhara nas referências já citadas, dos quais apresentou-se um exemplo típico na figura 6.10.

Para os ensaios do estudo experimental a mesma analogia pode ser empregada para se obter uma estimativa dos fatores de amortecimento presentes na resposta dinâmica dos modelos.

Utilizando-se os dados do capítulo 5 é fácil verificar através da equação 88 que a primeira frequência natural das linhas ensaiadas situou-se sempre entre 1,25 Hz e 1,35 Hz. Adotando-se para efeito de avaliação o valor médio de 1,3 Hz, a equação 87 fornece:

$$\xi_L = 0,038 \cdot f \cdot \frac{V}{d_c} \quad (91)$$

onde: f = frequência do movimento

Para as linhas 1 e 2 usadas nos ensaios a relação entre a amplitude média dos deslocamentos verticais dos pontos do trecho suspenso e os respectivos diâmetros equivalentes variou entre os seguintes limites:

$$\text{Linha 1 :} \quad 17 \leq \frac{v}{d_c} \leq 97$$

$$\text{Linha 2 :} \quad 16 \leq \frac{v}{d_c} \leq 55$$

Substituindo estes valores na equação 91 obtém-se:

$$\text{Linha 1 :} \quad 0,65 \cdot f \leq \xi_L \leq 3,69 \cdot f \quad (92)$$

$$\text{Linha 2 :} \quad 0,61 \cdot f \leq \xi_L \leq 2,09 \cdot f \quad (93)$$

No estudo experimental as frequências variaram entre 0 Hz e aproximadamente 1,5 Hz e, conseqüentemente os fatores de amortecimento sofreram variações proporcionais como indicam as equações 92 e 93.

Apenas para avaliar a ordem de grandeza do amortecimento indicado pelas equações 92 e 93, considere-se por exemplo a situação em que a frequência do movimento é igual a 30% da frequência natural das linhas. Esta frequência corresponde a aproximadamente 0,39 Hz para os ensaios do estudo experimental. Para esta frequência os valores mínimo e máximo do fator de amortecimento obtidos das equações acima são 0,24 e 1,44 , respectivamente.

Valores de fator de amortecimento nesta faixa de

variação já são bastante elevados quando se toma por base o exemplo de um oscilador simples.

Para este oscilador, quando a frequência de excitação é igual a 30% da frequência natural, a amplitude dinâmica do movimento não-amortecido é sómente 10% maior do que a amplitude quase-estática. Considerando a presença de amortecimento caracterizado por fatores dentro da faixa acima esta amplitude dinâmica passa a ter valores variando entre 8,5% maior e 20% menor do que o valor quase-estático, implicando portanto em reduções já significativas na amplitude do movimento dinâmico.

Estas considerações mostram que também no caso do estudo experimental o amortecimento viscoso presente era bastante acentuado, confirmando e elucidando portanto as observações relatadas quanto ao comportamento físico das linhas.

Outra característica interessante a ser relatada é que, muito embora durante a oscilação as amplitudes dos movimentos dos pontos ao longo de todas as linhas sofressem alterações significativas com o aumento da frequência, a configuração geométrica das linhas ensaiadas não sofria alterações acentuadas em relação à sua forma.

Em outras palavras, verificava-se que durante a oscilação as linhas mantinham aproximadamente a forma geral de uma catenária em todas as frequências, pelo menos enquanto não ocorria afrouxamento entre elos consecutivos.

Este fato era marcante principalmente em altas frequências, quando as linhas praticamente já não oscilavam transversalmente e observava-se que a configuração

geométrica era bastante semelhante àquela da posição estática inicial da linha. Nas frequências mais baixas a impressão que se tinha era que as linhas estavam assumindo configurações ou se comportando como se o movimento estivesse sendo aplicado de forma quase-estática.

Por outro lado, na referência [10] Triantafyllou mostra que, nas configurações usuais e na ausência de amortecimento, o 1^o modo natural de vibrar das linhas, no sentido transversal, tem uma forma geométrica que lembra uma senóide.

Comparando então a forma característica do 1^o modo de vibrar das linhas com as configurações geométricas observadas nos ensaios, pode-se concluir que a presença do amortecimento viscoso impede que a linha oscile na sua forma natural, alterando significativamente o movimento dos pontos ao longo da mesma de forma que a geometria se mantém semelhante àquela que se verificaria num movimento quase-estático.

Este fatos confirmam novamente o elevado grau do amortecimento que atua sobre as linhas e o papel fundamental que este amortecimento desempenha no comportamento dinâmico das mesmas.

6.7 - O Mecanismo e os Parâmetros que Governam o Comportamento Dinâmico das Linhas

A análise sobre o comportamento dinâmico apresentada nos itens anteriores, juntamente com as características do comportamento quase-estático estudadas no capítulo 3, quan-

do visualizadas em conjunto, fornecem subsídios que permitem elucidar o mecanismo através do qual as linhas respondem dinamicamente a um movimento oscilatório imposto ao ponto de amarração.

Verificou-se no capítulo 3 que a linha responde a um deslocamento quase-estático do ponto de amarração através de dois mecanismos físicos distintos que atuam simultaneamente e de forma interativa: a mudança de configuração geométrica; e a deformação elástica axial.

Em outras palavras, quando o ponto de amarração é submetido a um deslocamento quase-estático, uma parcela deste é absorvida através de uma mudança na configuração geométrica da linha e outra parcela é absorvida através da deformação elástica axial da mesma.

A ordem de magnitude destas parcelas depende da relação entre a rigidez geométrica e a rigidez elástica da linha. Nas configurações usuais das linhas de amarração a rigidez elástica é em geral bem maior do que a rigidez geométrica, o que faz com que a maior parcela do deslocamento seja normalmente absorvida através da mudança geométrica.

Em função destas características verificou-se que, em termos de comportamento quase-estático, a linha podia ser representada adequadamente por um modelo simples de duas molas em série. Uma destas molas simulando a rigidez geométrica da linha e a outra simulando a rigidez elástica axial.

Admitindo que para pequenos deslocamentos o comportamento geométrico seja aproximadamente linear pode-se, com base neste modelo, calcular a variação da tensão no ponto

de amarração quando o mesmo é deslocado quase-estaticamente a partir de uma posição de equilíbrio inicial. Utilizando o conceito de rigidez principal definido no início deste capítulo e supondo, por simplicidade, um deslocamento δ sendo imposto na direção principal θ_L , a variação quase-estática τ_q da tensão pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\tau_q = K_L \cdot \delta \quad (94)$$

Explicitando a rigidez principal em termos de suas componentes geométrica e elástica, a equação 94 fica:

$$\tau_q = \delta \cdot \frac{K_{gL} \cdot K_{eL}}{K_{gL} + K_{eL}} = \delta \cdot K_{eL} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_{eL}}{K_{gL}}} \quad (95)$$

O produto $(\delta \cdot K_{eL})$ que aparece na equação acima representa a variação que ocorreria na tensão se todo o deslocamento δ fôsse absorvido unicamente através de deformação elástica da linha. Portanto, a equação 95 mostra que a variação quase-estática da tensão no ponto de amarração é proporcional à variação elástica equivalente da tensão, sendo que o coeficiente de proporcionalidade é função da razão entre a rigidez elástica e a rigidez geométrica da linha.

Tendo em vista este resultado é interessante então

definir as seguintes variáveis:

$$\tau_e = K_{eL} \cdot \delta \quad (96)$$

$$\Lambda = \frac{K_{eL}}{K_{gL}} \quad (97)$$

onde: τ_e = variação elástica equivalente da tensão,
associada a um deslocamento δ

Λ = parâmetro que representa o quociente entre
a rigidez elástica e a rigidez geométrica
da linha

Empregando-se estas definições a equação 95 fica:

$$\tau_q = \tau_e \cdot \frac{1}{1 + \Lambda} \quad (98)$$

É imediato verificar que a relação definida pelo parâmetro Λ pode variar entre um valor nulo e um valor infinito, em função da linha possuir uma rigidez geométrica, respectivamente, muito superior ou muito inferior à rigidez elástica.

Para valores de Λ variando entre estes limites pode-se verificar que a expressão $[1/(1 + \Lambda)]$ que aparece na equação 98 só pode assumir valores entre 0 e 1.

Este resultado quando aplicado na equação 98 mostra que a variação quase-estática da tensão será sempre menor

ou igual à variação elástica equivalente τ_e , que pode então ser encarada como um valor limite de referência para a resposta quase-estática das linhas.

Rearranjando a equação 98 para exprimir esta resposta como uma fração deste valor de referência obtem-se:

$$\frac{\tau_q}{\tau_e} = \frac{1}{1 + \Lambda} \quad (99)$$

Utilizando os resultados acima e a equação 99 pode-se concluir então que a relação entre a resposta quase-estática das linhas e a tensão elástica de referência τ_e varia sempre entre os seguintes limites:

$$0 \leq \frac{\tau_q}{\tau_e} \leq 1 \quad (100)$$

Por outro lado, os resultados do estudo experimental mostraram que, a partir da resposta quase-estática, as tensões no ponto de amarração ficam sujeitas à amplificação dinâmica com o aumento da frequência do movimento oscilatório. Observou-se que esta amplificação dinâmica cresce com o aumento da frequência até atingir um valor máximo a partir do qual a resposta tende a permanecer aproximadamente estável.

No entanto, simultaneamente verificou-se também que com o aumento da frequência do movimento ocorre uma redução nas amplitudes dos deslocamentos dos pontos ao longo da linha, devido a ação das forças de amortecimento viscoso.

Além disto observou-se que, mesmo com estas modificações acentuadas nos deslocamentos destes pontos, a configuração geométrica das linhas permanece aproximadamente com a forma de catenária durante a oscilação.

Tendo em vista estas características e o mecanismo típico de mudança geométrica associado ao deslocamento do ponto de amarração é possível interpretar a ação destas forças de amortecimento como uma restrição a alteração da configuração geométrica da linha. Devido à presença desta restrição, a linha não consegue completar totalmente a mudança geométrica que, em termos quase-estáticos, estaria associada à posição do ponto de amarração sobre sua trajetória, em cada instante de tempo durante um ciclo do movimento.

Esta situação foi ilustrada esquematicamente na figura 6.9, para uma certa posição do ponto de amarração ao longo de sua trajetória.

Em outras palavras, devido à ação do amortecimento, durante a resposta dinâmica a linha passa a absorver por mudança geométrica uma parcela do deslocamento total do ponto de amarração inferior àquela que absorveria caso o movimento fosse imposto quase-estaticamente. Como consequência é inevitável então que uma parcela maior deste deslocamento passe a ser absorvida através da deformação elástica da linha, já que este é o outro único mecanismo físico que resta para acomodar a mudança de posição deste ponto.

Observado sob a ótica do modelo de duas molas em série pode-se dizer que o amortecimento viscoso provoca um

aumento fictício na rigidez geométrica da linha - e portanto da mola que a representa - o que implica, evidentemente, numa absorção maior do deslocamento do ponto de amarração através da mola que representa a deformação elástica axial.

Em termos quase-estáticos é fácil verificar através da equação 99 que qualquer aumento na rigidez geométrica faz com que seja necessária a aplicação de um esforço maior para se deslocar o ponto de amarração de uma mesma distância e torna a resposta da linha mais próxima de uma resposta puramente elástica.

Fazendo uma analogia com este comportamento quase-estático pode-se concluir então que o mecanismo através do qual as linhas respondem dinamicamente a um movimento imposto ao ponto de amarração está associado a um processo de transição entre as duas possíveis formas pelas quais elas respondem a um deslocamento deste ponto.

Em baixas frequências, enquanto são pouco relevantes os efeitos associados ao amortecimento viscoso, as linhas respondem ao movimento basicamente através de uma mudança em sua configuração geométrica, equivalente à que se verifica em suas respostas quase-estáticas. Nestas condições, as tensões máximas no ponto de amarração se mantêm aproximadamente iguais ao valor quase-estático.

No entanto, a partir da frequência em que passa a ser significativa a restrição à mudança geométrica provocada pelo amortecimento, inicia-se um processo de "enrígimento" geométrico da linha que faz com que uma parcela maior do deslocamento do ponto de amarração comece a ser absorvida através de deformação elástica.

Como consequência começa a crescer, a partir desta frequência, o esforço necessário para obrigar o ponto de amarração a percorrer a mesma trajetória, iniciando-se então a fase de amplificação dinâmica da resposta.

De acôrdo com as observações apresentadas sobre o comportamento físico das linhas, este processo de "enrhecimento" geométrico se acentua com o aumento da frequência, de forma que cada vez mais a linha passa a responder elásticamente ao movimento imposto, tornando, portanto, cada vez maior o esforço necessário para impor o movimento ao ponto de amarração. Este aumento das tensões com a frequência está claramente evidenciado nos gráficos das respostas no domínio da frequência dos ensaios, e caracteriza a fase de amplificação dinâmica da resposta.

Uma evidência muito boa da ocorrência deste processo foi obtida quando se analisou os efeitos da não-linearidade geométrica na resposta das linhas.

Verificou-se no item 6.5.1 que a intensidade da não-linearidade geométrica, medida através do parâmetro $\Delta\tau$, se reduz com o aumento da frequência do movimento de modo que, em altas frequências, desde que não esteja ocorrendo afrouxamento dos elos, praticamente não se observa diferenças significativas entre os valores das amplitudes τ_s , τ_i e τ .

Em função das características dos mecanismos de resposta das linhas é evidente que uma redução nos efeitos da não-linearidade geométrica está diretamente associada a uma redução nas alterações geométricas provocadas pelo deslocamento do ponto de amarração.

Portanto, como a resposta elástica das linhas é de um modo geral essencialmente linear, a constatação de uma redução gradual do efeito da não-linearidade geométrica é uma indicação bastante clara da ocorrência de um processo de transição entre uma resposta geométrica e uma resposta elástica, o que é coerente com o mecanismo de resposta dinâmica descrito acima.

Entretanto, conforme se observou na análise do comportamento físico das linhas, o processo de redução nas amplitudes dos deslocamentos dos pontos ao longo da linha prossegue até que, nas frequências mais altas, a linha praticamente já não oscila transversalmente, permanecendo quase como que "congelada" numa configuração bastante semelhante àquela da condição estática inicial.

Nestas condições, portanto, praticamente já não ocorrem mudanças na geometria da linha, e ela só pode acomodar o deslocamento do ponto de amarração exclusivamente através de deformação elástica. Em outras palavras, nestas condições, a rigidez geométrica da linha se torna infinita e a resposta ao movimento do ponto de amarração passa a ser de natureza puramente elástica.

Como consequência pode-se concluir que, na frequência em que não se observam mais alterações na configuração geométrica da linha, a amplitude da tensão dinâmica τ que atua no ponto de amarração deve ser igual a amplitude da tensão elástica equivalente τ_e , que caracteriza uma resposta puramente elástica ao deslocamento deste ponto.

Como a partir desta situação não existe mais nenhuma possibilidade de alteração da configuração geométrica da

linha, para qualquer aumento posterior da frequência a resposta tende a permanecer inalterada e equivalente a esta resposta puramente elástica.

Este resultado explica perfeitamente a estabilização da amplificação dinâmica observada em altas frequências nos gráficos da resposta dinâmica dos ensaios, conforme comentado na análise apresentada no item 6.3.

Entretanto, verificou-se também neste item que, em alguns ensaios, após ter sido atingido o patamar referente a esta estabilização, o aumento da frequência provocava uma queda na tensão máxima e um crescimento na tensão mínima que ocorriam num ciclo do movimento. Este resultado significa que, ao invés de se manter estável, a amplificação dinâmica diminuía com o aumento da frequência, contrariando a conclusão exposta acima.

Para explicar este resultado, deve-se observar que o processo de enrijecimento geométrico provocado pelo amortecimento faz com que a resposta dinâmica das linhas evolua de uma resposta de natureza essencialmente geométrica, caracterizada quase que somente por mudança na configuração das linhas, para uma resposta de natureza essencialmente elástica, na qual as linhas se comportam como se fôssem uma barra elástica engastada numa de suas extremidades e submetida a um movimento oscilatório axial na extremidade livre.

Empregando-se esta analogia compreende-se então que, na medida em que se aumenta a frequência do movimento do ponto de amarração e esta se aproxima da 1^a frequência natural elástica axial da linha, ocorre um processo de modulação entre as forças de inércia e as forças elásticas na

direção axial, em função desta aproximação com a frequência natural. Como consequência, simultaneamente vai diminuindo o esforço necessário para impor elásticamente o mesmo movimento ao ponto de amarração.

Desta forma, pode-se concluir que se a 1ª frequência natural elástica da linha for suficientemente próxima das frequências de excitação, a amplitude máxima da tensão dinâmica τ terá um valor sempre inferior à tensão elástica equivalente τ_e . Além disto, após ter atingido este valor máximo, esta amplitude irá se reduzindo com o aumento da frequência até que, numa frequência igual à frequência natural elástica, seu valor se torna nulo e as tensões ao longo da linha passam a ser iguais às tensões que atuam na configuração estática inicial.

Esta análise fornece claramente a explicação para o comportamento da resposta dinâmica observada em alguns ensaios, e também para um dos resultados de Triantafyllou apresentado através da curva tracejada mostrada na figura 6.5.

Por outro lado, nas configurações usuais, as linhas de amarração apresentam de um modo geral uma 1ª frequência natural elástica bem superior às frequências de excitação. Desta forma, para efeito de projeto, é perfeitamente razoável admitir que o valor máximo da amplitude dinâmica da tensão seja sempre igual à tensão elástica equivalente.

Sendo assim, os resultados acima mostram que é possível se estabelecer a priori os limites entre os quais deve variar a resposta dinâmica de uma linha de amarração, independentemente das condições de solicitação e das carc-

terísticas físicas e geométricas da linha. Estes limites são claramente a tensão máxima quase-estática e a tensão que atuaria na linha se todo o deslocamento fôsse absorvido elásticamente.

Desconsiderando os efeitos da não-linearidade geométrica, pode-se expressar estes limites da resposta dinâmica em termos da amplitude τ de variação da tensão no ponto de amarração. Empregando este procedimento, e de acôrdo com as conclusões acima, a resposta dinâmica das linhas varia entre os seguintes limites:

$$\tau_q \leq \tau \leq \tau_e \quad (101)$$

Adotando a tensão elástica τ_e como tensão de referência e utilizando o resultado da equação 99, os limites de variação da resposta dinâmica podem ser expressos também da seguinte forma:

$$\frac{1}{1 + \Lambda} \leq \frac{\tau}{\tau_e} \leq 1 \quad (102)$$

Em função da análise anterior é evidente que a transição entre um limite e outro da resposta é determinado fundamentalmente pela intensidade do amortecimento viscoso que atua sobre a linha. Quanto mais intenso fôr este amortecimento, mais rapidamente se processará o enrijecimento geométrico da linha, fazendo com que o processo de amplifi-

cação dinâmica se inicie em frequências cada vez menores, reduzindo com isto a faixa de frequências em que a resposta permanece de natureza quase-estática.

É interessante observar que estes resultados permitem também que se verifique previamente a possibilidade de ocorrência de afrouxamento ou chicoteamento da linha.

Verificou-se no ítem 6.3 que o afrouxamento ocorre a partir do instante em que a amplitude dinâmica da tensão se iguala à tensão estática inicial num determinado ponto ao longo da linha. Nos ensaios experimentais observou-se que o afrouxamento se iniciava normalmente nas vizinhanças do ponto de toque que, na configuração estática inicial, é a posição onde ocorre o menor valor da tensão para linhas na forma de catenária completa. Nestas condições, a tensão estática inicial neste ponto é igual à componente horizontal H_0 .

Por outro lado, as conclusões apresentadas acima mostram que a amplitude dinâmica máxima da tensão não ultrapassa a amplitude elástica equivalente τ_e . Admitindo que nas condições de uma resposta puramente elástica a amplitude dinâmica da variação da tensão em todos os pontos ao longo da linha seja igual a amplitude elástica equivalente é imediato concluir que, para que não ocorra afrouxamento, basta que o valor da componente horizontal H_0 na configuração estática inicial seja maior do que a amplitude elástica equivalente τ_e .

Desta forma, uma vez conhecidas as condições de equilíbrio estático inicial e as amplitudes do movimento a que está sujeito o ponto de amarração pode-se avaliar a possi-

bilidade de ocorrência de afrouxamento da linha, sem necessidade de um cálculo prévio da resposta dinâmica. Em termos matemáticos, a condição para que não ocorra afrouxamento pode ser expressa da seguinte forma:

$$H_0 > \tau_e \quad (103)$$

Finalizando esta análise, é importante ressaltar que o estudo experimental evidenciou claramente as principais características do comportamento dinâmico das linhas de amarração. Através da análise dos resultados dos ensaios foi possível determinar o mecanismo através do qual as linhas respondem dinamicamente a um movimento imposto ao ponto de amarração e quais são as variáveis importantes que influenciam este mecanismo de resposta.

Os resultados e conclusões obtidos se mostraram bastante coerentes com aqueles apresentados nos trabalhos de Suhara e Triantafyllou, já citados.

É com base nestes resultados e conclusões que se propõem então, no próximo capítulo, um método aproximado para se calcular a resposta dinâmica das linhas no domínio da frequência.

CAPÍTULO 7 - MÉTODO APROXIMADO PARA CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

7.1 - Considerações Gerais

Conforme já discutido em capítulos anteriores o projeto do sistema de ancoragem de uma plataforma flutuante é governado basicamente pelo cálculo das trações máximas atuantes nas linhas mais solicitadas do sistema. Este cálculo envolve necessariamente a determinação da resposta das linhas aos movimentos de 1ª ordem da plataforma, provocados pela ação das ondas.

Para o caso de sistemas de ancoragem de plataformas de produção de caráter permanente as normas recomendam explicitamente que a resposta das linhas a tais movimentos seja avaliada através de uma análise dinâmica, de modo a se obter resultados mais precisos no cálculo das trações máximas atuantes.

Devido à complexidade do problema, esta análise dinâmica é normalmente realizada empregando-se programas de computador desenvolvidos com base no método dos elementos finitos. Em função da presença de diversas características não-lineares, a solução das equações matriciais de equilíbrio dinâmico é geralmente efetuada no domínio do tempo, com o intuito de se obter resultados mais precisos.

É sabido no entanto que métodos numéricos desta natureza requerem tempos de processamento elevados para permitir a obtenção de respostas estatisticamente confiáveis e

são, além disto, sujeitos a diversos problemas de convergência e estabilidade numérica.

Em função destas características, o emprego de programas deste tipo nos ciclos iniciais do projeto de um sistema de ancoragem torna o processo de projeto bastante trabalhoso, moroso e caro, inibindo a busca de configurações mais otimizadas para o sistema de ancoragem.

A disponibilidade de métodos aproximados, de aplicação mais simples, para o cálculo desta resposta dinâmica, permite acelerar o processo de projeto em seus ciclos iniciais e torna mais fácil a escolha e a introdução de correções nas configurações analisadas, estimulando a busca de diferentes soluções com o intuito de otimizar a configuração do sistema.

Uma vez desenvolvido o projeto com um método aproximado de cálculo emprega-se, num ciclo final, os programas mais sofisticados, apenas com o intuito de se verificar os resultados obtidos e garantir a satisfação dos critérios de projeto.

É com base nesta filosofia de projeto que se propõe, neste capítulo, um método aproximado para o cálculo da resposta dinâmica de linhas de amarração sujeitas a um movimento harmônico em seu ponto de amarração, em torno de uma posição inicial de equilíbrio estático.

Este método foi desenvolvido com base nos resultados do estudo experimental e segue uma idéia originalmente proposta por Suhara na referência [4].

Na forma como está proposto, o método pode ser empregado para análise da resposta de linhas homogêneas instala-

das na forma de catenária completa, e cuja configuração inicial de equilíbrio seja caracterizada por valores do parâmetro D situados entre 0,3 e 0,5.

7.2 - A Idealização do Problema

A idéia básica sobre a qual está calcado o método aproximado para o cálculo da resposta dinâmica das linhas foi desenvolvida a partir das análises sobre o comportamento dinâmico observado nos ensaios e com base no modelo de duas molas em série proposto para idealizar o comportamento quase-estático das linhas.

Conforme a análise apresentada no capítulo anterior a resposta dinâmica das linhas a deslocamentos impostos ao ponto de amarração evolui, com o crescimento da frequência, de uma resposta de natureza quase-estática para uma resposta essencialmente elástica.

Este processo ocorre porque, com o aumento da frequência, o amortecimento viscoso impede que a configuração geométrica da linha seja modificada e se adapte às diversas posições do ponto de amarração a medida em que o mesmo percorre a trajetória prescrita. Fisicamente esta restrição se manifesta através de uma redução nas amplitudes dos deslocamentos dos pontos situados ao longo da linha, conforme representado na figura 6.9.

Uma vez que a linha não consegue se adaptar geométricamente à configuração estática correspondente a cada posição do ponto de amarração ao longo da trajetória, uma parcela maior do deslocamento representado pela

distância entre a posição instantânea do ponto de amarração e a sua posição de equilíbrio inicial, tem que ser absorvida através de deformação elástica da linha.

Utilizando o modelo de duas molas em série, este comportamento pode ser compreendido quando se impõe uma restrição ao deslocamento da extremidade da mola representativa da rigidez geométrica. Neste caso, para que seja atingido o mesmo valor de deslocamento total, deve-se ter um aumento no deslocamento relativo entre as extremidades da mola representativa da rigidez elástica, significando que uma parcela maior do deslocamento do ponto de amarração está sendo absorvida através de deformação elástica.

É com base nesta avaliação do comportamento dinâmico que se desenvolve a idéia sobre a qual se fundamenta o método de cálculo proposto neste capítulo.

Para apresentar esta idéia considere-se, por exemplo, uma linha submetida à um movimento harmônico com trajetória linear vertical, imposto numa frequência tal que os efeitos dinâmicos, devidos às forças de inércia e amortecimento, estejam presentes na resposta da linha.

Uma representação esquemática de uma linha submetida a esta solicitação está apresentada na figura 7.1. Nesta figura chama-se de δ a distância entre a posição do ponto de amarração, num instante qualquer, e a sua posição na configuração de equilíbrio inicial.

Nestas condições, para uma posição qualquer do ponto de amarração ao longo da trajetória, a geometria da linha será diferente daquela que seria assumida se a mesma estivesse estáticamente instalada com seu ponto de amarração

naquela posição, em função dos efeitos do amortecimento viscoso acima comentados. Esta situação está representada na figura 7.1 onde a geometria (I) representa a configuração estática correspondente à posição em que se encontra o ponto de amarração, e a geometria (II) representa a configuração dinâmica assumida pela linha quando o ponto de amarração passa por aquela posição durante o movimento.

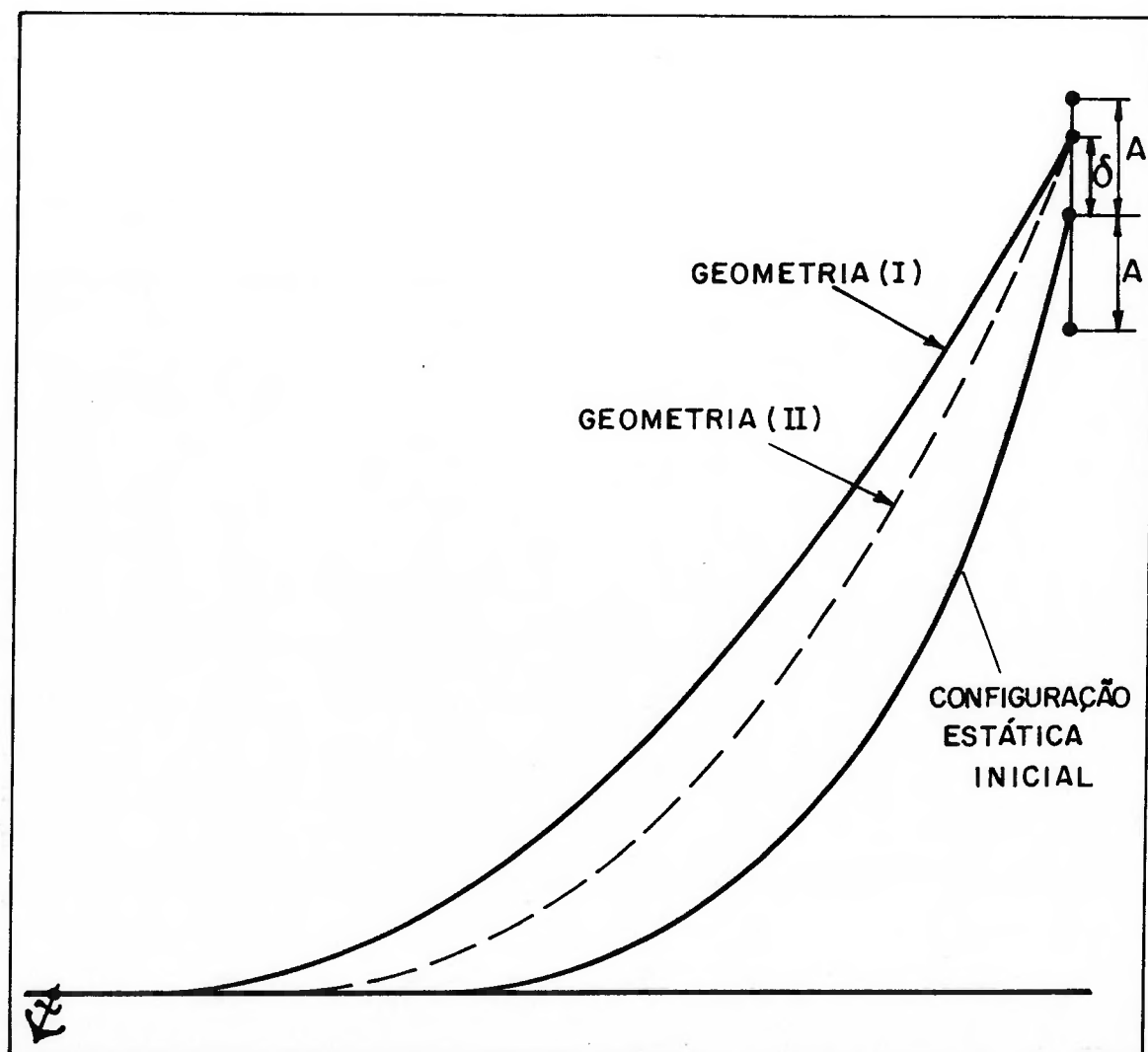


FIGURA 7.1 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CONFIGURAÇÕES ESTÁTICA E DINÂMICA ASSUMIDAS PELAS LINHAS

A idéia básica do método aproximado para se calcular as tensões que atuam no ponto de amarração durante a imposição do movimento é estabelecer uma relação direta entre as alterações causadas pelas forças dinâmicas na configuração geométrica da linha e a amplificação dinâmica das tensões no ponto de amarração.

Para se estabelecer esta relação admite-se como válidas as seguintes hipóteses subsidiárias sobre a dinâmica das linhas:

I) Os pontos ao longo da linha se movimentam apenas na direção vertical, qualquer que seja a frequência do movimento.

II) Os esforços de inércia e amortecimento provocados por estes movimentos se distribuem uniformemente ao longo da linha.

III) Com base nas hipóteses acima admite-se que a configuração geométrica dinâmica assumida pela linha durante o movimento (representada pela geometria (II) na figura 7.1) seja aproximadamente igual à configuração de uma catenária.

IV) As amplitudes dos movimentos impostos ao ponto de amarração são suficientemente pequenas para que se possa admitir que a resposta quase-estática seja aproximadamente linear.

Com base nestas hipóteses formula-se então a a primeira das hipóteses básicas que caracterizam o método aproximado para cálculo da resposta dinâmica das linhas.

1ª Hipótese Básica :

A configuração geométrica dinâmica da linha quando o ponto de amarração se encontra numa posição qualquer da trajetória, que dista δ da sua posição estática inicial, é, exceto pela região muito próxima ao ponto de amarração, equivalente à configuração estática que a linha assumiria caso fôsse deslocada quase-estaticamente de uma parcela δ_c desta distância δ .

Na figura 7.2, uma ampliação da figura 7.1, na região próxima ao ponto de amarração, ilustra geometricamente esta 1ª Hipótese Básica, para o exemplo do movimento vertical.

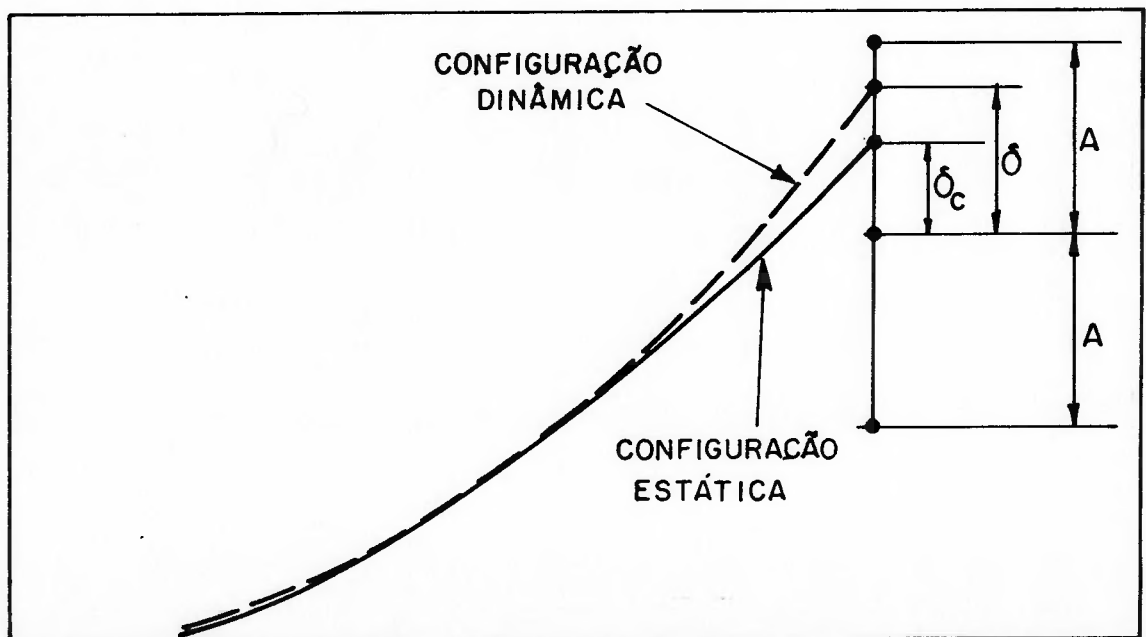


FIGURA 7.2 - ILUSTRAÇÃO DA HIPÓTESE SOBRE A CONFIGURAÇÃO DINÂMICA

A hipótese acima significa admitir que a configuração dinâmica assumida pela linha, quando seu ponto de amarração está a uma distância δ da posição de equilíbrio inicial, é equivalente à configuração que resultaria da aplicação de um processo hipotético de imposição de deslocamentos sobre a linha, na direção definida pela reta que une a posição instantânea do ponto de amarração e sua posição de equilíbrio inicial. Este processo pode ser resumido nas seguintes etapas: desloca-se o ponto de amarração de forma quase-estática, na direção acima definida, a uma distância δ_c da posição inicial de equilíbrio estático ; admite-se que nesta posição intermediária a nova configuração geométrica da linha não possa mais sofrer alterações exceto através de deformação elástica ; nesta situação aplica-se um novo deslocamento ao ponto de amarração, na mesma direção e de magnitude igual à diferença entre δ e δ_c .

Com base nesta hipótese propõe-se então que a tensão dinâmica atuante no ponto de amarração, durante a imposição do movimento, possa ser avaliada através da soma de duas parcelas: uma parcela proporcional à rigidez da linha definida pela configuração estática inicial ; e uma parcela proporcional à rigidez elástica axial da linha.

Em termos matemáticos, para uma posição δ qualquer do ponto de amarração ao longo da trajetória, esta aproximação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$T^D = T^C + T^E \quad (104)$$

onde: T^D = tensão dinâmica atuante no ponto de

amarração quando este se encontra a uma distância δ de sua posição na configuração estática inicial, enquanto percorre a trajetória pré-estabelecida.

T^C = parcela da tensão dinâmica proporcional à rigidez da linha determinada na configuração estática inicial.

T^E = parcela da tensão dinâmica proporcional à rigidez elástica da linha.

A parcela T^C , proporcional à rigidez da linha, é calculada admitindo-se que a parcela δ_c da distância δ tenha sido absorvida como se o ponto de amarração a tivesse percorrido de forma quase-estática. Neste caso o valor de T^C é o resultado da soma da tensão estática inicial T_0 com o produto de δ_c pela rigidez da linha na direção definida pela posição instantânea do ponto de amarração. No caso do exemplo da figura 7.1 a rigidez a ser utilizada é a rigidez K_z .

A outra parcela T^E da tensão dinâmica é o resultado do produto da rigidez elástica da linha na mesma direção pela distância $(\delta - \delta_c)$. No caso do exemplo da figura 7.1 a rigidez elástica a ser utilizada é a rigidez K_{ZE} .

Introduzindo estes resultados na equação 104, a tensão dinâmica na linha pode ser calculada aproximadamente através da equação 105 apresentada a seguir, onde, por conveniência, a rigidez da linha está representada pelo símbolo k_1 e sua rigidez elástica pelo símbolo k_2 .

$$T^D = T_0 + k_1 \cdot \delta_c + k_2 \cdot (\delta - \delta_c) \quad (105)$$

No entanto, o valor de δ_c pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\delta_c = \delta - (\delta - \delta_c) \quad (106)$$

Substituindo a equação 106 na equação 105 obtem-se:

$$T^D = T_0 + k_1 \cdot \delta + (k_2 - k_1) \cdot (\delta - \delta_c) \quad (107)$$

O parcela $(T_0 + k_1 \cdot \delta)$ que aparece no termo à direita na equação 107 é na realidade a tensão que atuaria no ponto de amarração se o deslocamento δ fôsse imposto de forma quase-estática. Chamando esta tensão quase-estática de T^S , a equação 107 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$T^D = T^S + (k_2 - k_1) \cdot (\delta - \delta_c) \quad (108)$$

Portanto, para se determinar a tensão dinâmica na linha, a equação 108 mostra que é necessário que se calcule apenas o valor de δ_c , já que os valores de k_1 , k_2 , δ e T^S podem ser previamente determinados.

Para a avaliação de δ_c emprega-se a idealização proposta por Suhara na referência [4] para representar a oscilação dinâmica de linhas de amarração com configurações caracterizadas por valores do parâmetro D entre 0,3 e 0,5, quando seus pontos de amarração são submetidos a movimentos harmônicos em torno de uma configuração estática inicial.

Suhara propõe que se represente a oscilação da linha de amarração através do movimento vertical do centro de gravidade do trecho suspenso da linha, como se toda massa do trecho suspenso estivesse concentrada neste ponto. Em outras palavras, Suhara propõe que se represente a linha de amarração como uma massa concentrada que oscila verticalmente, com base na hipótese de que seu comportamento dinâmico possa ser avaliado através resposta dinâmica desta massa concentrada.

Esta idealização se fundamenta na constatação de que, para linhas com configurações geométricas caracterizadas por valores de D entre 0,3 e 0,5, as alterações de geometria provocadas por deslocamentos do ponto de amarração ocorrem de uma forma tal que os deslocamentos dos pontos situados ao longo da parte suspensa da linha se dão preponderantemente na direção vertical. Como consequência, o deslocamento médio destes pontos, que representa o deslocamento do centro de gravidade do trecho suspenso da linha, pode ser admitido como equivalente à sua componente vertical.

Esta característica do comportamento geométrico das linhas foi verificada analiticamente no capítulo 3, para o caso de deslocamentos quase-estáticos do ponto de amarração, e foi observada visualmente nos ensaios experimentais para movimentos de natureza dinâmica, conforme relatado no capítulo anterior.

Empregando esta idealização de Suhara e a hipótese de que a configuração geométrica durante os movimentos seja equivalente à uma catenária formula-se então a segunda Hipótese Básica que caracteriza o método aproximado de

cálculo da tensão dinâmica.

Para facilitar a interpretação desta segunda hipótese básica define-se aqui como z_g a distância vertical percorrida pelo centro de gravidade a partir da posição deste centro quando a linha se encontra na configuração estática inicial. Esta nova definição é equivalente ao símbolo CGZ utilizado no item 3.9 do capítulo 3.

2ª Hipótese Básica :

A parcela δ_c acima definida é proporcional à distância vertical percorrida pelo centro de gravidade do trecho suspenso inicial da linha quando o ponto de amarração é deslocado quase-estaticamente de uma distância δ_c a partir da configuração estática inicial.

Para interpretar esta hipótese considere-se as duas configurações apresentadas na figura 7.3 a seguir, que simula o mesmo exemplo da figura 7.1.

Na figura 7.3 indica-se a posição vertical do centro de gravidade do trecho suspenso inicial da linha para as configurações I e II definidas na figura 7.1.

A posição deste centro referente à configuração I, que na figura está representada por G_I , é equivalente à posição que seria assumida se o ponto de amarração tivesse sido deslocado quase-estaticamente até a distância δ . Esta posição está situada a uma distância z_g^S da posição inicial do centro de gravidade, representada na figura por G_0 .

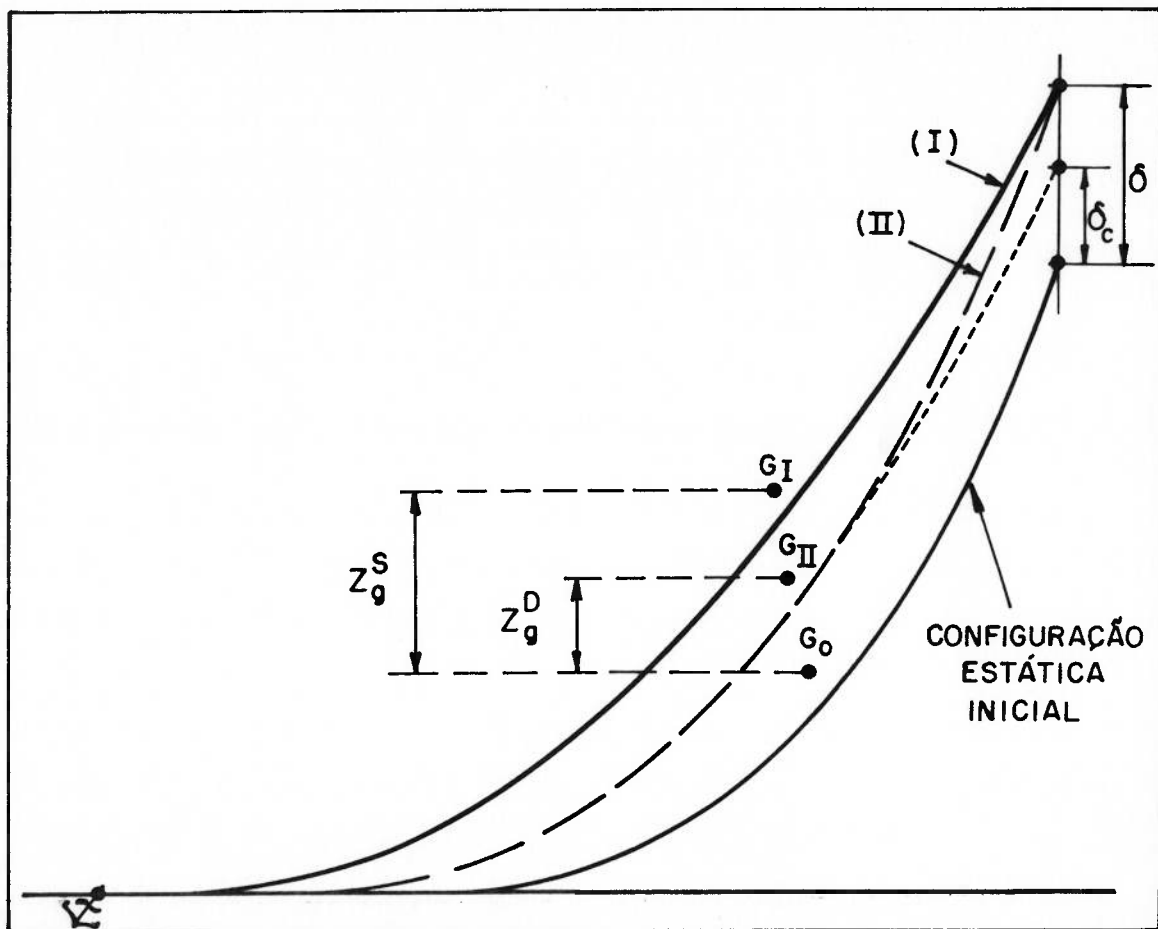


FIGURA 7.3 - POSIÇÕES DO CENTRO DE GRAVIDADE DA LINHA

A posição referente à configuração II, representada na figura por G_{II} , é equivalente à posição que seria assumida se o ponto de amarração fôsse deslocado quase-estaticamente até a distância δ_c . Esta posição está situada a uma distância z_g^D da posição inicial do centro de gravidade.

O que a segunda hipótese básica sugere é que se a configuração II - que é a configuração dinâmica assumida pela linha quando o ponto de amarração está a uma distância δ da posição inicial - for admitida equivalente a uma catenária, então a distância δ_c pode ser considerada proporcional à distância z_g^D percorrida pelo centro de gravidade,

sendo o coeficiente de proporcionalidade igual aos coeficientes de deslocamento definidos no ítem 3.9 do capítulo 3.

Chamando por conveniência estes coeficientes de deslocamento de k_3 , os valores de z_g^D e z_g^S podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$z_g^D = k_3 \cdot \delta c \quad (109)$$

$$z_g^S = k_3 \cdot \delta \quad (110)$$

Substituindo os valores de δ e δc obtidos das equações 109 e 110, na equação 108 obtem-se:

$$T^D = T^S + \frac{(k_2 - k_1)}{k_3} \cdot (z_g^S - z_g^D) \quad (111)$$

A equação 111 pode ser simplificada introduzindo-se a definição do coeficiente K_T^D , explicitada através da seguinte equação:

$$K_T^D = \frac{(k_2 - k_1)}{k_3} \quad (112)$$

Introduzindo esta definição na equação 111 obtem-se:

$$T^D = T^S + K_T^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \quad (113)$$

A equação 113 é uma das equações fundamentais do método aproximado de cálculo da resposta dinâmica das linhas. Esta equação mostra que a diferença entre a tensão dinâmica que atua no ponto de amarração, quando este está

numa posição qualquer da trajetória, e a tensão estática que nele atuaria, se a linha fôsse deslocada quase-estaticamente para tal posição, é proporcional à distância vertical entre as posições do centro de gravidade do trecho inicialmente suspenso, resultantes da configuração geométrica quase-estática e da configuração geométrica dinâmica relativas àquela posição do ponto de amarração.

A tensão dinâmica pode ser determinada através da equação 113 desde que se conheça as equações do movimento do ponto de amarração, os coeficientes de rigidez e de deslocamento da linha para a posição de equilíbrio inicial e os valores do coeficiente K_f^D e da variável z_g^D .

As equações do movimento do ponto de amarração podem ser escritas a partir do sistema de coordenadas auxiliar definido no capítulo anterior. Um movimento harmônico qualquer do ponto de amarração no plano da linha pode ser descrito através de equações que descrevam as componentes deste movimento nas direções dos eixos de coordenadas. Estas equações para as direções horizontal e vertical podem ser postas da seguinte forma:

$$\alpha_a = X_a \cdot \cos(\omega t + \varphi_x) \quad (114)$$

$$\gamma_a = Z_a \cdot \cos(\omega t + \varphi_z) \quad (115)$$

onde : α_a = coordenada horizontal da posição do ponto de amarração ao longo da trajetória

γ_a = coordenada vertical da posição do ponto de amarração ao longo da trajetória

X_a = amplitude do movimento na direção horizontal

Z_a = amplitude do movimento na direção vertical

ω = frequência do movimento

φ_x = fase do movimento na direção horizontal

φ_z = fase do movimento na direção vertical

A tensão quase-estática T^S pode ser determinada em qualquer posição do ponto de amarração ao longo da trajetória conhecendo-se os coeficientes de rigidez da linha nas direções horizontal e vertical, que são representados respectivamente por K_x e K_z . Estes coeficientes podem ser calculados através das equações apresentadas no capítulo 3, implementadas no programa CATENA que soluciona o problema estático de uma catenária. Admitindo que o comportamento quase-estático seja linear, a tensão quase-estática pode ser aproximada da seguinte maneira:

$$T^S = T_0 + K_x \cdot \alpha_a + K_z \cdot \gamma_a \quad (116)$$

De forma semelhante, a variação quase-estática da posição vertical do centro de gravidade do trecho suspenso inicial da linha pode ser avaliada conhecendo-se os coeficientes KG_{zx} e KG_{zz} definidos no ítem 3.9 do capítulo 3. Supondo também um comportamento linear, o deslocamento vertical quase-estático do centro de gravidade a partir de sua posição na configuração estática inicial, para qualquer posição do ponto de amarração ao longo da trajetória, pode

ser avaliado através da seguinte equação:

$$z_g^S = KGzX \cdot \alpha_a + KGzZ \cdot \gamma_a \quad (117)$$

Assim, para se efetivar o cálculo dinâmico resta avaliar a variável z_g^D , que representa o deslocamento dinâmico do centro de gravidade, e determinar o coeficiente K_T^D . Os procedimentos para avaliação destes parâmetros estão apresentados nos próximos itens, e complementam o desenvolvimento do método aproximado de cálculo da resposta dinâmica das linhas.

7.3 - Cálculo do Deslocamento Dinâmico do Centro de Gravidade

Para o cálculo do deslocamento dinâmico do centro de gravidade (z_g^D) apresenta-se a seguir um procedimento aproximado desenvolvido por Suhara na referência [4], com base na sua idealização da linha como uma massa concentrada.

Para desenvolver este procedimento as seguintes hipóteses são consideradas:

I) durante a oscilação dinâmica da linha há sempre um trecho da mesma apoiado sobre o solo.

II) a deformação elástica da linha pode ser considerada desprezível em qualquer situação de sua resposta dinâmica.

III) a configuração dinâmica da linha durante a aplicação

do movimento é aproximadamente igual à de uma catenária.

IV) os deslocamentos impostos ao ponto de amarração são suficientemente pequenos de modo que se possa admitir que o comprimento suspenso da linha durante os movimentos seja aproximadamente igual ao comprimento suspenso que ocorre na configuração estática inicial.

V) a oscilação dinâmica da linha de amarração pode ser representada através da oscilação vertical de uma massa igual à massa do trecho suspenso na configuração estática inicial, concentrada no centro de gravidade deste trecho suspenso.

VI) os pontos ao longo do trecho suspenso da linha se deslocam apenas na direção vertical durante o movimento do ponto de amarração.

VII) as forças de inércia e amortecimento, causadas pelos deslocamentos dos pontos ao longo da linha, são admitidas como uniformemente distribuídas ao longo da mesma.

É com base nestas hipóteses que Suhara propõe um procedimento aproximado para determinação do deslocamento dinâmico do centro de gravidade da linha.

Para determinar este deslocamento Suhara parte da equação do equilíbrio dinâmico na direção vertical, das forças que agem sobre um elemento infinitesimal do trecho suspenso da linha durante sua oscilação.

Este elemento está representado na figura 7.4 e as forças que agem sobre ele são: as forças de inércia; as forças de gravidade; a flutuação; as forças aplicadas pelos elementos de linha vizinhos; e as forças aplicadas pelo fluido.

No caso das linhas de amarração, devido ao pequeno valor de suas dimensões transversais (diâmetro) em relação aos deslocamentos da mesma, admite-se que as forças aplicadas pelo fluido possam ser representadas através dos termos da equação de Morison.

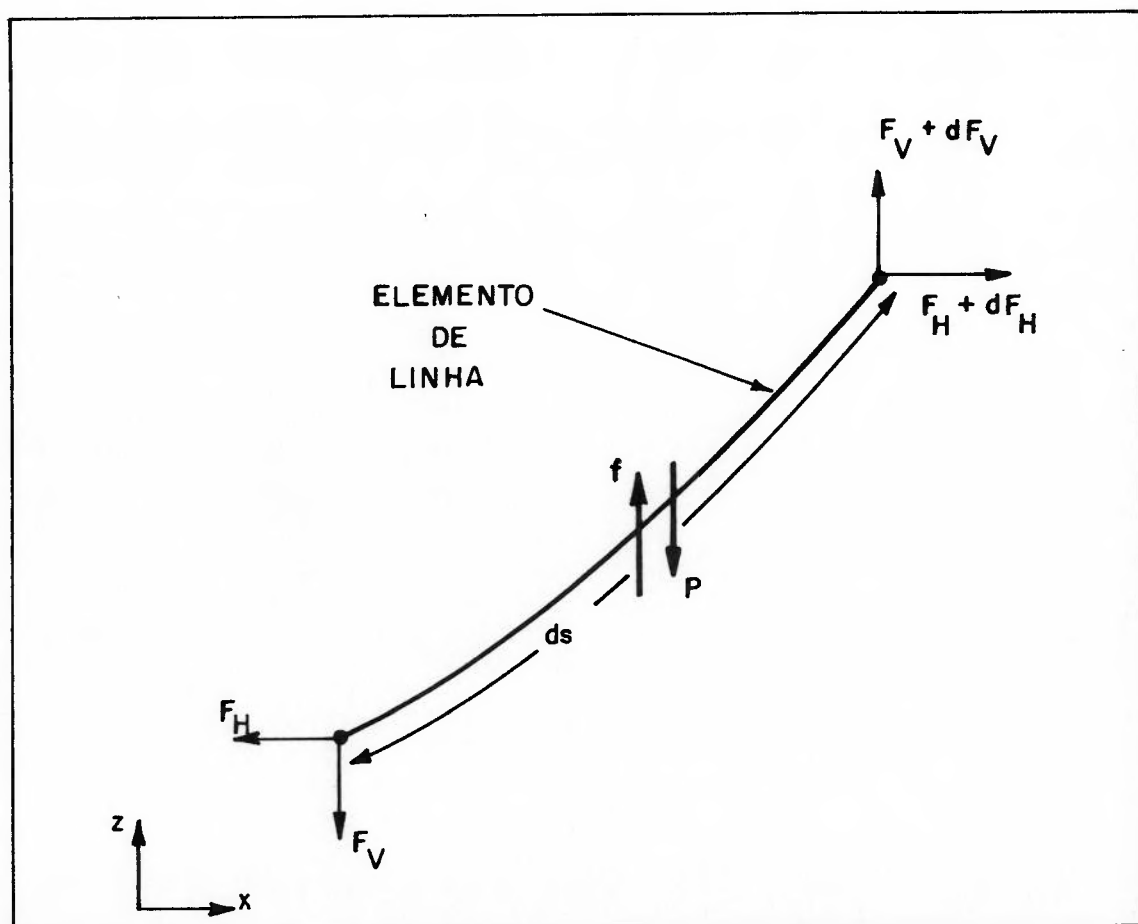


FIGURA 7.4 - FORÇAS ATUANTES NUM ELEMENTO DE LINHA

Desta forma, pode-se observar através da figura 7.4 que o equilíbrio dinâmico das componentes verticais das forças que agem num elemento de comprimento $d\Delta$ resulta na seguinte equação:

$$m \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} Ca\right) \cdot d\Delta \cdot \ddot{z}(\Delta) + \frac{1}{2} \rho_a \cdot Cd \cdot d_c \cdot \cos^3(\beta(\Delta)) \cdot d\Delta \cdot |\dot{z}(\Delta)| \cdot \dot{z}(\Delta) + q \cdot d\Delta - dF_v = 0 \quad (118)$$

onde : m = massa linear da linha

ρ, ρ_a = densidades da linha e da água

Ca = coeficiente de massa adicional da linha

Cd = coeficiente de arrasto na direção normal à linha

d_c = diâmetro equivalente da linha

q = peso linear submerso da linha

$d\Delta$ = comprimento do elemento de linha

$\beta(\Delta)$ = ângulo entre o eixo horizontal e a tangente à linha ao longo do comprimento

dF_v = resultante na direção vertical das forças aplicadas nas extremidades do elemento

\dot{z}, \ddot{z} = velocidade e aceleração do elemento de linha na direção vertical (eixo z_a)

O segundo termo na equação 118 representa a força de arrasto hidrodinâmico que resulta do movimento da linha dentro do fluído. Na avaliação desta força está implícita a hipótese de que a mesma é proporcional à velocidade relati-

va entre o fluido e o elemento de linha, na direção da normal à linha em qualquer ponto ao longo da mesma. É por esta razão que aparece neste segundo termo da equação a expressão " $\cos^3(\beta(\Delta))$ ".

Para permitir um desenvolvimento analítico aproximado da equação 118 duas simplificações são propostas por Suhara para tratar o termo que representa as forças de arrasto.

A primeira delas está relacionada ao ângulo $\beta(\Delta)$ entre a tangente à linha e o eixo horizontal. Suhara propõe que se considere este ângulo como aproximadamente constante e igual ao ângulo correspondente ao valor médio das inclinações (derivadas) do trecho suspenso da linha na configuração estática inicial.

Empregando as equações de catenária desenvolvidas no capítulo 3, este ângulo, chamado de β_m , pode ser obtido através do seguinte procedimento de cálculo:

$$\operatorname{tg}(\beta_m) = \frac{1}{l_{co}} \cdot \int_0^{l_{co}} \operatorname{tg}(\beta(\Delta)) \cdot d\Delta$$

$$\operatorname{tg}(\beta_m) = \frac{1}{l_{co}} \cdot \int_0^{l_{co}} \frac{q \cdot \Delta}{H} \cdot d\Delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{q \cdot l_{co}}{H} = \frac{1}{2} \operatorname{senh}(D)$$

onde : l_{co} = comprimento do trecho suspenso na configuração estática inicial

Portanto:

$$\beta_m = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{2} \cdot \operatorname{senh}(D) \right) \quad (119)$$

A segunda simplificação é proposta com o intuito de linearizar o termo que representa as forças de arrasto. Para tanto, Suhara propõe que este termo seja substituído por um amortecimento viscoso equivalente, de caráter linear, determinado a partir da imposição de que a energia dissipada num ciclo, por ambos os tipos de amortecimento, seja igual.

Admitindo que o movimento dinâmico dos pontos ao longo da linha seja harmônico e seguindo, por exemplo, o desenvolvimento proposto na referência [31], a energia dissipada por um amortecimento viscoso linear do tipo $(c \cdot \dot{z})$ pode ser obtida através do seguinte procedimento:

$$\dot{z} = -Z \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi^D)$$

$$U_c = \int_0^{\mathcal{T}} c \cdot \dot{z} \cdot \dot{z} \cdot dt$$

$$U_c = c \cdot Z^2 \cdot \omega^2 \cdot \int_0^{\mathcal{T}} \text{sen}^2(\omega t + \varphi^D) dt = \pi \cdot c \cdot Z^2 \cdot \omega \quad (120)$$

onde : c = coeficiente de amortecimento viscoso equivalente

Z = amplitude do movimento vertical do elemento de linha

φ^D = fase do movimento vertical do elemento de linha

U_c = energia dissipada pelo amortecimento viscoso linear, em um ciclo de oscilação

\mathcal{T} = período correspondente a um ciclo = $\frac{2 \pi}{\omega}$

A energia dissipada pelo arrasto viscoso não-linear, em um ciclo do movimento, pode ser obtida de modo semelhante, através do seguinte procedimento:

$$\begin{aligned}
 U_n &= \int_0^T \frac{1}{2} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_\Delta \cdot |\dot{z}| \cdot \dot{z}^2 \cdot dt = \\
 &= \frac{1}{2} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_\Delta \cdot Z^3 \cdot \omega^3 \cdot \int_0^T |\sin^3(\omega t + \varphi^D)| \cdot dt = \\
 &= \frac{1}{2} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_\Delta \cdot Z^3 \cdot \omega^3 \cdot 4 \cdot \int_0^{T/4} \sin^3(\omega t) \cdot dt \\
 &= \frac{4}{3} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_\Delta \cdot Z^3 \cdot \omega^2 \quad (121)
 \end{aligned}$$

onde : U_n = energia dissipada pelo amortecimento viscoso não-linear, em um ciclo

Igualando-se as equações 120 e 121 obtem-se o coeficiente de amortecimento equivalente, que vale:

$$c = \frac{4}{3 \pi} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_\Delta \cdot Z \cdot \omega \quad (122)$$

Desta forma, a força de amortecimento de caráter linear (\mathcal{F}_{v1}) que dissipa, num ciclo, a mesma quantidade de energia que a força de arrasto hidrodinâmico representada pelo segundo termo da equação 118, é dada por:

$$\mathcal{F}_{v1} = \frac{4}{3 \pi} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_\Delta \cdot \omega \cdot Z \cdot \dot{z}(\Delta) \quad (123)$$

Muito embora a força dada pela equação 123 represente uma linearização da força de arrasto hidrodinâmico, o caráter não-linear desta última não é totalmente perdido no processo de linearização, uma vez que o coeficiente de amortecimento dado pela equação 122 depende da amplitude Z do movimento oscilatório.

Substituindo então o segundo termo da equação 118 pela força dada pela equação 123, o equilíbrio dinâmico das componentes verticais das forças que agem num elemento de linha resulta na seguinte equação:

$$m \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} Ca\right) \cdot d_s \cdot \ddot{z}(\Delta) + \frac{4}{3} \frac{\rho_a \cdot Cd \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot d_s \cdot \omega \cdot Z(\Delta) \cdot \dot{z}(\Delta)}{\pi} + q \cdot d_s - dFv = 0 \quad (124)$$

Para determinar o movimento do centro de gravidade da parte suspensa Suhara propõe que os valores médios destas componentes, ao longo do trecho suspenso da linha, também estejam em equilíbrio dinâmico, e que este equilíbrio possa ser determinado a partir da equação 124.

Com base nas hipóteses de que o comprimento suspenso da linha permanece aproximadamente constante e igual ao seu valor (l_{co}) na configuração estática inicial e as configurações da linha durante o movimento mantenham aproximadamente a forma de catenária, as seguintes aproximações são propostas por Suhara para se determinar os valores médios das forças representadas na equação 124, num instante qual-

quer do movimento do ponto de amarração:

- Forças de Inércia

$$\frac{1}{l_c} \cdot \int_0^{l_c} m \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} C_a\right) \cdot \ddot{z}(\Delta) d\Delta \cong m \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} C_a\right) \cdot \ddot{z}_g^D \quad (125)$$

- Forças de Amortecimento

$$\begin{aligned} \frac{1}{l_c} \cdot \int_0^{l_c} \frac{4}{3\pi} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot \omega \cdot Z(\Delta) \cdot \dot{z}(\Delta) d\Delta &\cong \\ &\cong \frac{4}{3\pi} \rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot \cos^3 \beta_m \cdot \omega \cdot Z_g^D \cdot \dot{z}_g^D \end{aligned} \quad (126)$$

- Forças de Gravidade

$$\frac{1}{l_c} \cdot \int_0^{l_c} q \cdot d\Delta \cong \frac{1}{l_{c0}} \cdot V^S \quad (127)$$

- Forças das Vizinhanças

$$\frac{1}{l_c} \cdot \int_0^{l_c} dF_v \cong \frac{1}{l_{c0}} \cdot V^D \quad (128)$$

onde : l_c = comprimento suspenso da linha num instante qualquer do movimento

Z_g^D = amplitude do movimento vertical dinâmico do centro de gravidade

V^S = componente vertical da tensão que atuaria no ponto de amarração se a linha fôsse

posicionada estáticamente na posição em que se encontra este ponto num instante qualquer do movimento

v^D = componente vertical da tensão dinâmica que atua no ponto de amarração num instante qualquer do movimento

\ddot{z}_g^D = aceleração vertical do centro de gravidade da linha durante a aplicação do movimento

\dot{z}_g^D = velocidade vertical do centro de gravidade da linha durante a aplicação do movimento

Aplicando a integração acima na equação 124 e substituindo os resultados dados pelas equações 125, 126, 127 e 128 obtem-se o seguinte:

$$\begin{aligned} M_0 \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} C_a\right) \cdot \ddot{z}_g^D + \frac{4}{3} \frac{\rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot l_{c0} \cdot \cos^3 \beta_m \cdot \omega \cdot z_g^D \cdot \dot{z}_g^D}{\pi} = \\ = v^D - v^S \end{aligned} \quad (129)$$

onde : M_0 = massa do trecho suspenso da linha na configuração estática inicial = $m \cdot l_{c0}$

A equação 129 é a equação de movimento básica do modelo idealizado por Suhara para representar a linha de

amarração. Esta equação mostra que a diferença entre as componentes verticais das tensões que agem no ponto de amarração quando o movimento deste é realizado, respectivamente, de forma dinâmica e de forma quase-estática, é equivalente à soma das componentes verticais das forças de inércia e amortecimento que agem ao longo da linha durante o seu movimento.

Para determinar o deslocamento dinâmico do centro de gravidade a partir da equação 129, Suhara propõe o que se considera a terceira hipótese básica do método aproximado para cálculo das tensões dinâmicas nas linhas.

3ª Hipótese Básica :

A diferença entre o deslocamento vertical estático e o deslocamento vertical dinâmico do centro de gravidade $(z_g^S - z_g^D)$ é proporcional à componente vertical da soma das forças de inércia e amortecimento que agem sobre a linha durante sua oscilação.

Em termos matemáticos esta hipótese pode ser representada através da seguinte equação:

$$\begin{aligned} M_0 \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} C_a\right) \cdot \ddot{z}_g^D + \frac{4}{3} \frac{\rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot l_{co} \cdot \cos^3 \beta_m \cdot \omega}{\pi} \cdot z_g^D \cdot \dot{z}_g^D = \\ = K_V^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \end{aligned} \quad (130)$$

onde : K_V^D = constante de proporcionalidade

Este mesmo resultado da equação 130 pode também ser obtido se a idealização proposta no ítem 7.2, que permite calcular a tensão dinâmica que atua no ponto de amarração através da equação 113, for aplicada para a componente vertical desta tensão. Se isto for feito, seguindo o resultado apresentado na equação 113, a componente vertical da tensão dinâmica pode ser obtida através da seguinte equação:

$$V^D = V^S + K_V^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \quad (131)$$

Neste caso, a constante K_V^D é do mesmo tipo que o coeficiente K_I^D definido pela equação 112.

Se a equação 131 for combinada com a equação 129 obtem-se o mesmo resultado expresso pela equação 130, que deriva da hipótese proposta por Suhara.

Esta equivalência mostra que, muito embora a idealização apresentada no ítem 7.2 não tenha sido completamente baseada no desenvolvimento proposto por Suhara na referência [4], os resultados obtidos são coerentes com os estes últimos, fornecendo então uma base para justificar as hipóteses formuladas por Suhara.

Desta forma, considera-se que as equações 113, 129 e 131 são as equações fundamentais do método aproximado de cálculo da tensão dinâmica que atua no ponto de amarração de uma linha, quando este está sujeito a um movimento harmônico imposto no plano da linha.

Para facilitar o desenvolvimento subsequente, estas equações estão reproduzidas a seguir.

$$T^D = T^S + K_T^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \quad (132)$$

$$V^D = V^S + K_V^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \quad (133)$$

$$\begin{aligned} M_o \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} C_a\right) \cdot \ddot{z}_g^D + \frac{4}{3} \frac{\rho_a \cdot C_d \cdot d_c \cdot l_{co} \cdot \cos^3 \beta_m \cdot \omega}{\pi} \cdot z_g^D \cdot \dot{z}_g^D = \\ = V^D - V^S \end{aligned} \quad (134)$$

Uma vez determinados os valores dos coeficientes K_T^D e K_V^D as únicas incógnitas nas equações acima são as variáveis T^D , V^D e z_g^D , o que torna determinado e possível de ser resolvido o sistema formado pelas três equações.

Esta solução, que em outras palavras significa o cálculo da tensão dinâmica na linha, pode ser obtida executando-se as seguintes etapas: a) combina-se as equações 133 e 134 para se obter a equação do movimento do centro de gravidade da linha, já explicitada na equação 130; b) com base nas equações do movimento do ponto de amarração (equações 114 e 115) determina-se a equação do movimento vertical quase-estático (z_g^S) do centro de gravidade (equação 117); c) introduz-se esta última equação na equação 130 e determina-se a equação do movimento vertical dinâmico (z_g^D) do centro de gravidade; d) introduz-se as equações do movimento vertical quase-estático e dinâmico na equação 132 e determina-se a tensão dinâmica no ponto de amarração.

Nos próximos itens apresenta-se o desenvolvimento desta solução e a determinação dos coeficientes K_T^D e K_V^D .

7.4 - A Solução da Equação do Movimento Dinâmico do Centro de Gravidade da Linha

A equação do movimento dinâmico do centro de gravidade é obtida através da solução da equação que resulta da combinação das equações 133 e 134. Esta combinação fornece a seguinte equação, que é uma reprodução da equação 130:

$$\begin{aligned} M_0 \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} Ca\right) \cdot \ddot{z}_g^D + \frac{4}{3} \frac{\rho_a}{\pi} \rho_a \cdot Cd \cdot d_c \cdot l_{co} \cdot \cos^3 \beta_m \cdot \omega \cdot z_g^D \cdot \dot{z}_g^D = \\ = K_V^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \end{aligned} \quad (135)$$

Para facilitar a manipulação da equação 135, define-se os seguintes coeficientes:

$$M_{eq} = M_0 \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} Ca\right) \quad (136)$$

$$C_{eq} = \frac{4}{3} \frac{\rho_a}{\pi} \rho_a \cdot Cd \cdot d_c \cdot l_{co} \cdot \cos^3 \beta_m \quad (137)$$

$$\zeta = \frac{C_{eq}}{M_{eq}} \quad (138)$$

$$n^2 = \frac{K_V^D}{M_{eq}} \quad (139)$$

Substituindo-se as equações 136 e 137 na equação 135 e rearranjando seus termos obtém-se:

$$M_{eq} \cdot \ddot{z}_g^D + C_{eq} \cdot \omega \cdot z_g^D \cdot \dot{z}_g^D + K_V^D \cdot z_g^D = K_V^D \cdot z_g^S \quad (140)$$

A equação 140 é equivalente a equação de equilíbrio dinâmico de um sistema massa/mola/amortecedor de um grau de liberdade, sujeito a uma força externa dada pelo produto $(K_V^D \cdot z_g^S)$.

Esta equação, no entanto, apresenta um coeficiente de amortecimento dado pelo produto $(C_{eq} \cdot \omega \cdot Z_g^D)$, que depende da amplitude da resposta dinâmica. É esta característica que confere o caráter não-linear ao modelo de uma massa concentrada idealizado para representar o comportamento dinâmico das linhas de amarração.

A solução da equação 140 fornece o movimento dinâmico do centro de gravidade do trecho suspenso da linha.

A força externa, ou excitação, na equação 140 é proporcional ao movimento vertical z_g^S do centro de gravidade que seria obtido se o movimento do ponto de amarração fôsse imposto de forma quase-estática.

Para movimentos harmônicos do ponto de amarração, dados pelas equações 114 e 115, a força externa, ou excitação, na equação 140 é determinada combinando-se estas equações com a equação 117. Esta combinação fornece:

$$z_g^S = KG_{zx} \cdot X_a \cdot \cos(\omega t + \varphi_x) + KG_{zz} \cdot Z_a \cdot \cos(\omega t + \varphi_z) \quad (141)$$

Desenvolvendo-se a equação 141 obtem-se:

$$z_g^S = Z_c^S \cdot \cos(\omega t) - Z_s^S \cdot \sin(\omega t) \quad (142)$$

onde:

$$Z_c^S = KG_{zx} \cdot X_a \cdot \cos(\varphi_x) + KG_{zz} \cdot Z_a \cdot \cos(\varphi_z) \quad (143)$$

$$Z_g^S = KG_{zx} \cdot X_a \cdot \text{sen}(\varphi_x) + KG_{zz} \cdot Z_a \cdot \text{sen}(\varphi_z) \quad (144)$$

A amplitude Z_g^S do movimento vertical quase-estático do centro de gravidade pode ser obtida da equação 142 e vale:

$$Z_g^S = \sqrt{(Z_C^S)^2 + (Z_S^S)^2} \quad (145)$$

Para uma excitação harmônica, a solução da equação 140, em regime permanente, tem a mesma forma que a equação 142, podendo ser escrita da seguinte maneira:

$$z_g^D = Z_C^D \cdot \cos(\omega t) - Z_S^D \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (146)$$

$$\dot{z}_g^D = -\omega \cdot Z_C^D \cdot \text{sen}(\omega t) - \omega \cdot Z_S^D \cdot \cos(\omega t) \quad (147)$$

$$\ddot{z}_g^D = -\omega^2 \cdot Z_C^D \cdot \cos(\omega t) + \omega^2 \cdot Z_S^D \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (148)$$

A amplitude Z_g^D do movimento vertical dinâmico do centro de gravidade pode ser determinada através da equação 146, e vale:

$$Z_g^D = \sqrt{(Z_C^D)^2 + (Z_S^D)^2} \quad (149)$$

Para que a solução dada pelas equações acima seja completa deve-se determinar os valores de Z_C^D e Z_S^D .

Para tanto, introduz-se na equação 140 as definições

dadas nas equações 138 e 139, com o intuito de facilitar o desenvolvimento algébrico. Isto resulta em:

$$\ddot{z}_g^D + \zeta \cdot \omega \cdot z_g^D \cdot \dot{z}_g^D + n^2 \cdot z_g^D = n^2 \cdot z_g^S \quad (150)$$

Para solucionar a equação 150 e se obter os valores de z_c^D e z_s^D introduz-se na mesma as equações 142, 146, 147 e 148, obtendo-se:

$$\begin{aligned} & - \omega^2 \cdot z_c^D \cdot \cos(\omega t) + \omega^2 \cdot z_s^D \cdot \sin(\omega t) - \zeta \cdot \omega^2 \cdot z_g^D \cdot z_c^D \cdot \sin(\omega t) + \\ & - \zeta \cdot \omega^2 \cdot z_g^D \cdot z_s^D \cdot \cos(\omega t) + n^2 \cdot z_c^D \cdot \cos(\omega t) - n^2 \cdot z_s^D \cdot \sin(\omega t) = \\ & = n^2 \cdot z_c^S \cdot \cos(\omega t) - n^2 \cdot z_s^S \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (151)$$

Agrupando-se os termos em $\cos(\omega t)$ e $\sin(\omega t)$ tem-se:

$$\begin{aligned} & \left(n^2 \cdot z_c^D - n^2 \cdot z_c^S - \omega^2 \cdot z_c^D - \zeta \cdot \omega^2 \cdot z_g^D \cdot z_s^D \right) \cdot \cos(\omega t) + \\ & + \left(n^2 \cdot z_s^S - n^2 \cdot z_s^D + \omega^2 \cdot z_s^D - \zeta \cdot \omega^2 \cdot z_g^D \cdot z_c^D \right) \cdot \sin(\omega t) = 0 \end{aligned} \quad (152)$$

Para que a igualdade representada pela equação 152 seja satisfeita em qualquer instante de tempo as seguintes equações devem ser satisfeitas simultaneamente:

$$\left(n^2 \cdot z_c^D - n^2 \cdot z_c^S - \omega^2 \cdot z_c^D - \zeta \cdot \omega^2 \cdot z_g^D \cdot z_s^D \right) = 0 \quad (153)$$

$$\left(n^2 \cdot z_s^S - n^2 \cdot z_s^D + \omega^2 \cdot z_s^D - \zeta \cdot \omega^2 \cdot z_g^D \cdot z_c^D \right) = 0 \quad (154)$$

Resolvendo as equações 153 e 154 para as incógnitas Z_C^D e Z_S^D obtem-se:

$$Z_C^D = \frac{n^2 \cdot (n^2 - \omega^2) \cdot Z_S^S + \zeta \cdot Z_g^D \cdot \omega^2 \cdot n^2 \cdot Z_S^S}{(n^2 - \omega^2)^2 + (\zeta \cdot Z_g^D \cdot \omega^2)^2} \quad (155)$$

$$Z_S^D = \frac{n^2 \cdot (n^2 - \omega^2) \cdot Z_S^S - \zeta \cdot Z_g^D \cdot \omega^2 \cdot n^2 \cdot Z_C^S}{(n^2 - \omega^2)^2 + (\zeta \cdot Z_g^D \cdot \omega^2)^2} \quad (156)$$

A determinação dos valores de Z_C^D e Z_S^D através das equações 155 e 156 depende do conhecimento prévio da amplitude Z_g^D . Para determinar esta amplitude substitui-se os valores acima de Z_C^D e Z_S^D na equação 149, e com o auxílio da equação 145, obtem-se a seguinte equação polinomial:

$$(Z_g^D)^4 \cdot \left(\zeta \cdot \frac{\omega^2}{n^2} \right)^2 + (Z_g^D)^2 \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{n^2} \right)^2 - (Z_g^S)^2 = 0 \quad (157)$$

Resolvendo a equação 157 através de substituição de variável obtem-se:

$$Z_g^D = \sqrt{\frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{n^2} \right)^4 + 4 \left(\zeta \cdot \frac{\omega^2}{n^2} \right)^2 \cdot (Z_g^S)^2} - \left(1 - \frac{\omega^2}{n^2} \right)^2}{2 \cdot \left(\zeta \cdot \frac{\omega^2}{n^2} \right)^2}} \quad (158)$$

A equação 158 permite determinar a amplitude do movi-

mento vertical dinâmico do centro de gravidade do trecho suspenso da linha. Esta equação pode ser aplicada desde que a frequência ω não seja nula.

O caso de frequência ω nula representa a situação de um movimento quase-estático. Neste caso, é imediato verificar na equação 157 que a amplitude Z_g^D é igual a amplitude Z_g^S , como era de se esperar.

Uma vez determinado o valor da amplitude Z_g^D através da equação 158 pode-se calcular os valores de Z_c^D e Z_s^D através das equações 155 e 156. Substituindo estes dois últimos valores na equação 146 obtem-se a solução completa para o movimento vertical dinâmico do centro de gravidade (Z_g^D).

Para isto, no entanto, resta ainda determinar o coeficiente K_V^D e, através da equação 139, o coeficiente n para que todos os parâmetros das equações 155, 156 e 158 sejam conhecidos.

O coeficiente K_V^D pode ser determinado através da equação 133, com o auxílio de um argumento físico bastante simples, elaborado com base nas observações efetuadas no estudo experimental.

Verificou-se no estudo experimental que, a medida em que se aumentava a frequência do movimento, as amplitudes dos deslocamentos dos pontos ao longo da linha iam se reduzindo de forma que, cada vez mais, a linha respondia elasticamente aos deslocamentos do ponto de amarração ao invés de com alterações em sua configuração geométrica.

Com o aumento posterior da frequência, este comportamento se acentuava, permitindo então inferir que, no limite, a tendência é os deslocamentos dos pontos ao longo da

linha se tornarem nulos, "congelando" a linha numa configuração geométrica praticamente idêntica àquela da condição estática inicial. Nesta situação, evidentemente, a resposta puramente elástica é a única forma possível da linha responder aos deslocamentos do ponto de amarração.

Uma vez que nas condições acima a configuração geométrica da linha permanece praticamente inalterada durante o movimento do ponto de amarração, sofrendo apenas deformação elástica axial, pode-se considerar que os deslocamentos verticais dos pontos ao longo da mesma sejam nulos. Como consequência, o mesmo resultado se aplica ao deslocamento vertical z_g^D do centro de gravidade.

Portanto, na situação limite onde a resposta das linhas é de natureza essencialmente elástica, pode-se considerar que o deslocamento vertical dinâmico do centro de gravidade seja também essencialmente nulo.

Levando este resultado na equação 133 e admitindo que a resposta elástica seja linear, obtem-se:

$$V_0 + K_{ZXE} \cdot \alpha_a + K_{ZZE} \cdot \gamma_a =$$

$$V_0 + K_{ZX} \cdot \alpha_a + K_{ZZ} \cdot \gamma_a + K_V^D \cdot (K_{GZX} \cdot \alpha_a + K_{GZZ} \cdot \gamma_a) \quad (159)$$

Rearranjando esta equação obtem-se:

$$K_V^D = \frac{K_{ZXE} \cdot \alpha_a + K_{ZZE} \cdot \gamma_a - K_{ZX} \cdot \alpha_a - K_{ZZ} \cdot \gamma_a}{K_{GZX} \cdot \alpha_a + K_{GZZ} \cdot \gamma_a} \quad (160)$$

Uma vez conhecidos os coeficientes de rigidez e des-

locamento presentes na equação acima, basta substituir os valores de α_a e γ_a , dados pelas equações 114 e 115, para se obter o valor do coeficiente K_V^D .

Este procedimento, no entanto, sugere uma dependência do coeficiente K_V^D com a posição do ponto de amarração ao longo da trajetória, o que não é um resultado coerente com a hipótese de linearidade implícita no cálculo do movimento do centro de gravidade da linha, que exige que o valor deste coeficiente seja constante e não dependente do tempo.

Entretanto, as equações 114 e 115, que permitem determinar as coordenadas α_a e γ_a , mostram que no caso de um movimento com trajetória linear as fases φ_x e φ_z são iguais, o que torna iguais os termos dependentes do tempo nestas duas equações. Neste caso, ao se substituir na equação 160 as variáveis α_a e γ_a pelas equações 114 e 115, todos os termos dependentes do tempo podem ser cancelados, tornando constante e independente do tempo a expressão que resulta para avaliar o coeficiente K_V^D .

Por outro lado, no caso de um movimento com trajetória não-linear não se verifica a igualdade das fases φ_x e φ_z e a substituição das equações 114 e 115 na equação 160 resulta numa expressão dependente do tempo, contrariando a hipótese de linearidade do comportamento dinâmico.

Para contornar este problema no caso de movimentos com trajetórias não-lineares, assume-se que o coeficiente K_V^D tenha um valor igual àquele determinado através da equação 160 quando a posição do ponto de amarração se encontra sobre a direção da tangente à linha no ponto de

amarração na configuração estática inicial.

As justificativas para formulação desta hipótese estão associadas ao fato de que o procedimento proposto para avaliar o coeficiente K_V^D se baseia essencialmente na hipótese de que quando o deslocamento dinâmico do centro de gravidade torna-se nulo, a linha fica "congelada" na sua configuração estática inicial e a resposta dinâmica passa a ser de natureza puramente elástica. Neste caso, admitindo que a linha se comporte como uma barra elástica, a resposta puramente elástica ocorre para um deslocamento do ponto de amarração na direção da tangente à linha neste ponto, e seu valor é, com certeza, dado pelo produto da rigidez elástica da linha pela amplitude do deslocamento.

Aplicando estes resultados na equação 160, obtem-se as seguintes expressões para avaliar o coeficiente K_V^D , em função da trajetória do ponto de amarração:

a) para movimentos com trajetórias lineares

$$K_V^D = \frac{K_{zxE} \cdot X_a + K_{zZE} \cdot Z_a - K_{zx} \cdot X_a - K_{zz} \cdot Z_a}{K_{Gzx} \cdot X_a + K_{Gzz} \cdot Z_a} \quad (161)$$

b) para movimentos com trajetórias não-lineares

$$K_V^D = \frac{K_{zxE} + K_{zZE} \cdot \text{tg}(\beta a) - K_{zx} - K_{zz} \cdot \text{tg}(\beta a)}{K_{Gzx} + K_{Gzz} \cdot \text{tg}(\beta a)} \quad (162)$$

Com estes resultados obtem-se então a solução completa do movimento vertical dinâmico z_g^D do centro de gravidade

da linha.

A resposta dinâmica da linha pode agora ser determinada substituindo-se na equação 132 a expressão de z_g^D , dada pela equação 146, obtendo-se o resultado que será apresentado no próximo item.

7.5 - O Cálculo da Resposta Dinâmica da Linha

De acôrdo com as etapas de cálculo estabelecidas no final do item 7.3 (página 239), uma vez determinada a equação do movimento vertical dinâmico (z_g^D) do centro de gravidade, resta apenas aplicar a equação 132 para se obter a resposta dinâmica da linha, em termos da tensão atuante no ponto de amarração.

Explicitando então a equação 132 obtem-se:

$$T^D = T_0 + K_X \cdot \alpha_a + K_Z \cdot \gamma_a + K_T^D \cdot (z_g^S - z_g^D) \quad (163)$$

Os valores de z_g^S e z_g^D são obtidos, respectivamente, das equações 117 e 146, que fornecem:

$$z_g^S = K_{GzX} \cdot \alpha_a + K_{GzZ} \cdot \gamma_a$$

$$z_g^D = Z_C^D \cdot \cos(\omega t) - Z_S^D \cdot \sin(\omega t)$$

Nas equações acima, os valores de T_0 , K_X , K_Z , K_{GzX} e K_{GzZ} são determinados a partir da solução do equilíbrio es-

tático da linha, para a configuração inicial pré-estabelecida. As componentes α_a e γ_a do movimento do ponto de amarração são dados de entrada do problema, e os valores de Z_C^D e Z_S^D são determinados de acordo com o procedimento estabelecido no item anterior (equações 155 e 156).

Resta então, para obter a solução completa da equação 163, determinar o valor do coeficiente K_I^D .

Para isto emprega-se os mesmos argumentos utilizados no item anterior para estabelecer o procedimento de cálculo do coeficiente K_V^D . No entanto, neste caso, cabe um aprimoramento adicional para incluir na resposta dinâmica os efeitos da vibração axial da linha já analisados no capítulo 6.

Verificou-se no item 6.7 que a resposta axial elástica da linha sofria alterações com o aumento da frequência em função da aproximação desta com a primeira frequência natural axial elástica.

Admitindo que o comportamento elástico axial da linha seja similar ao de uma barra elástica reta, pode-se empregar a equação de vibração axial desta última para se avaliar a resposta dinâmica da linha na direção axial.

Considere-se para isto uma linha com comprimento total l impedida de sofrer mudanças na sua configuração geométrica de forma que só possa responder a um deslocamento do ponto de amarração através de deformação elástica axial. Por simplicidade, admita-se que no seu ponto de amarração esteja sendo imposto um movimento harmônico linear, de amplitude U_0 , na direção da tangente à linha neste ponto, conforme ilustrado na figura 7.5 a seguir.

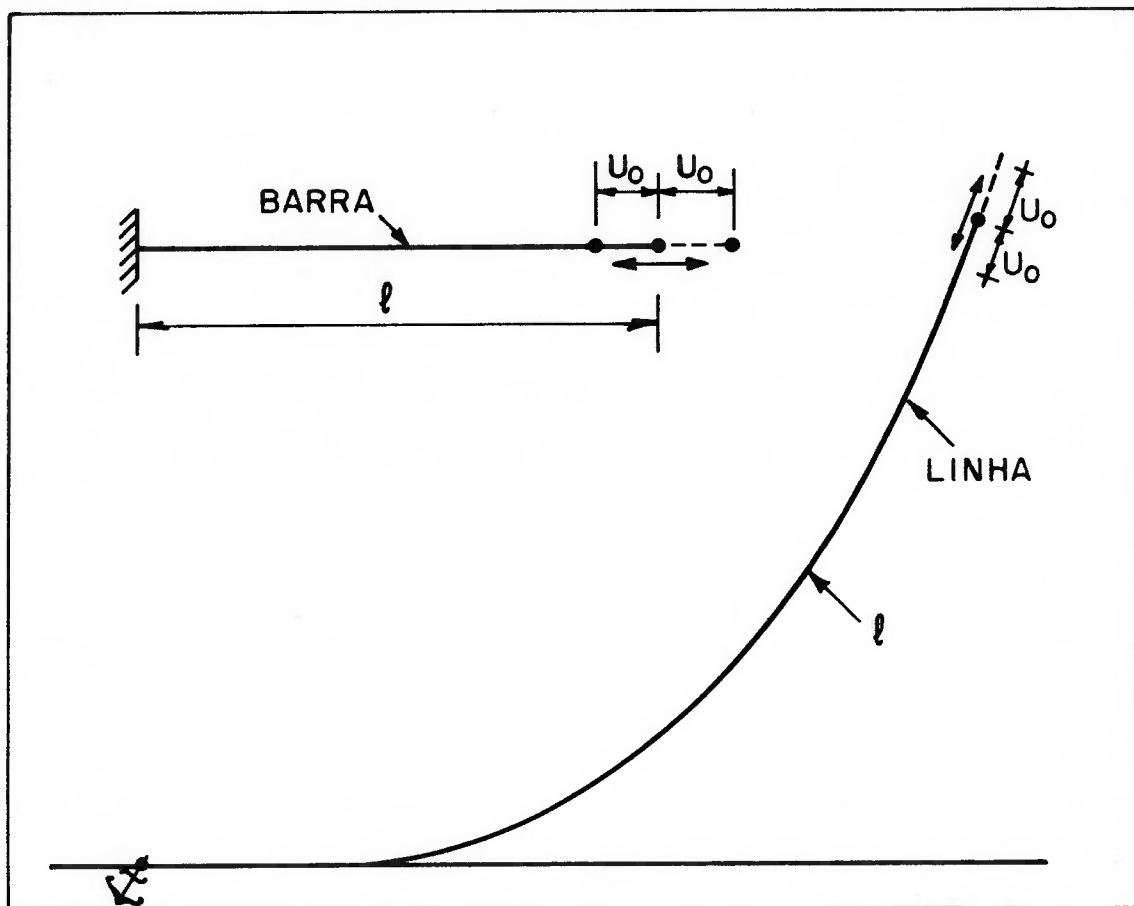


FIGURA 7.5 - MODELO PARA AVALIAR A RESPOSTA DINÂMICA AXIAL

Admitindo um comportamento similar ao de uma barra reta, a equação de equilíbrio dinâmico na direção axial da linha pode ser escrita da seguinte forma:

$$EA \cdot \frac{\partial^2 u(\Delta, t)}{\partial \Delta^2} = m \cdot \frac{\partial^2 u(\Delta, t)}{\partial t^2} \quad (164)$$

onde : u = deslocamento de um ponto qualquer da linha na direção axial.

Δ = coordenada curvilínea medida ao longo da linha, com origem no ponto de ancoragem.

m = massa linear da linha.

Com base no mesmo argumento de similaridade com a barra, a força axial \mathcal{F}_a que age num ponto qualquer da linha pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\mathcal{F}_a(\Delta, t) = EA \cdot \frac{\partial u}{\partial \Delta} \quad (165)$$

Admitindo que em regime permanente a resposta dinâmica axial a um movimento imposto seja harmônica, a solução da equação 164 pode ser escrita da seguinte forma:

$$u(\Delta, t) = \left[A \operatorname{sen} \left(\frac{\omega}{c} \Delta \right) + B \operatorname{cos} \left(\frac{\omega}{c} \Delta \right) \right] \cdot \left(C_1 \operatorname{sen}(\omega t) + C_2 \operatorname{cos}(\omega t) \right)$$

$$\text{onde: } c = \sqrt{\frac{EA}{m}}$$

As condições de contorno para a linha de amarração correspondem às de uma barra reta com uma extremidade engastada e com a outra livre mas submetida a um movimento harmônico de amplitude U_0 . Em termos matemáticos estas condições significam:

$$\text{para } \Delta = 0 \Rightarrow u = 0$$

$$\text{para } \Delta = l \Rightarrow u = U_0 \cdot \operatorname{cos}(\omega t)$$

Aplicando estas condições na solução acima obtem-se:

$$u(\Delta, t) = U_0 \cdot \frac{\text{sen}\left(\eta \frac{\Delta}{l}\right)}{\text{sen}(\eta)} \cdot \cos(\omega t) \quad (166)$$

$$\text{onde: } \eta = \omega l \cdot \sqrt{\frac{m}{EA}}$$

Considerando que a primeira frequência natural axial ω_e da linha seja equivalente à primeira frequência natural axial da barra reta submetida às condições de contorno acima especificadas, pode-se escrever:

$$\omega_e = \frac{\pi}{2l} \cdot \sqrt{\frac{EA}{m}}$$

Utilizando os resultados acima na equação 165, a força axial que age em qualquer ponto ao longo da linha resulta em:

$$\mathcal{F}_a(\Delta, t) = U_0 \cdot \frac{EA}{l} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \frac{\Delta}{l}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e}\right)} \cdot \cos(\omega t) \quad (167)$$

O termo $(U_0 \cdot EA/l)$ que aparece na equação acima é equivalente à força axial que atuaria ao longo da linha se o deslocamento U_0 fôsse aplicado quase-estaticamente no ponto de amarração. Chamando este termo de τ_{eq} e utilizando a equação 167 acima, a amplitude dinâmica τ_{ed} da força

elástica axial que atua no ponto de amarração da linha, onde $\delta = l$, resulta em:

$$\tau_{ed} = \tau_{eq} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e}\right)} \quad (168)$$

Na figura 7.6 a seguir apresenta-se um gráfico levantado com base na equação 168, que mostra como varia a relação τ_{ed}/τ_{eq} , no ponto de amarração, com a relação de frequências ω/ω_e .

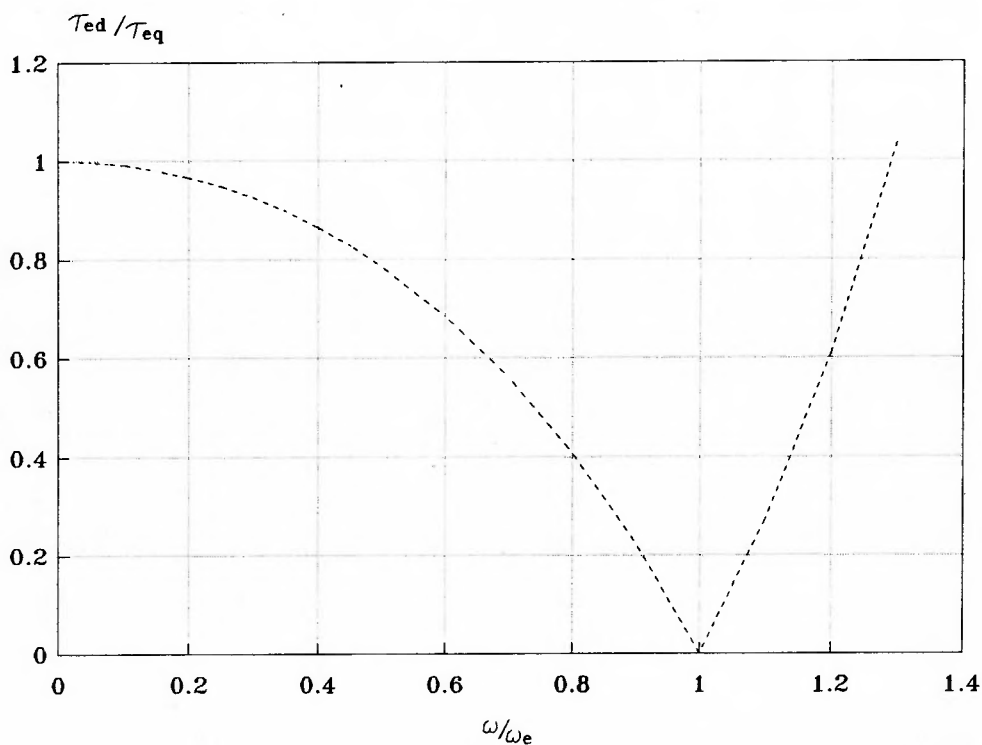


FIGURA 7.6 - RESPOSTA DINÂMICA AXIAL DA LINHA DE AMARRAÇÃO

O gráfico da figura 7.6 mostra claramente que, para uma linha respondendo apenas elasticamente ao movimento do ponto de amarração, a amplitude da tensão dinâmica que atua neste ponto se reduz a medida em que a frequência cresce e se aproxima da frequência natural elástica, confirmando portanto a análise apresentada no item 6.7 do capítulo anterior. Quando ocorre $\omega = \omega_e$, a amplitude da tensão dinâmica se anula, já que para uma linha, ou barra, com extremidade livre não é necessário nenhum esforço para manter uma oscilação livre nesta frequência.

Com base nos resultados obtidos através das equações 167 e 168 e nas definições dos coeficientes de rigidez elástica apresentadas no item 3.8.3 do capítulo 3, a tensão dinâmica que atua no ponto de amarração de uma linha, que responde apenas elasticamente ao movimento deste ponto, pode então ser determinada através da seguinte equação:

$$T^D = T_0 + C_e \cdot (K_{XE} \cdot \alpha_a + K_{ZE} \cdot \gamma_a) \quad (169)$$

$$\text{onde: } C_e = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_e}\right)} \quad (170)$$

Levando os resultados acima na equação 163, e lembrando que o movimento dinâmico do centro de gravidade (z_g^D) é nulo quando a linha está "congelada" e respondendo elasticamente ao movimento do ponto de amarração, obtém-se

o seguinte resultado:

$$T_0 + C_e \cdot K_{XE} \cdot \alpha_a + C_e \cdot K_{ZE} \cdot \gamma_a = T_0 + K_X \cdot \alpha_a + K_Z \cdot \gamma_a + K_T^D \cdot (K_{GZX} \cdot \alpha_a + K_{GZZ} \cdot \gamma_a) \quad (171)$$

Rearranjando a equação acima obtem-se então:

$$K_T^D = \frac{C_e \cdot K_{XE} \cdot \alpha_a + C_e \cdot K_{ZE} \cdot \gamma_a - K_X \cdot \alpha_a - K_Z \cdot \gamma_a}{K_{GZX} \cdot \alpha_a + K_{GZZ} \cdot \gamma_a} \quad (172)$$

Empregando os mesmos argumentos utilizados para o cálculo do coeficiente K_V^D , obtem-se então as seguintes expressões para avaliar o coeficiente K_T^D em função da trajetória do ponto de amarração:

a) para movimentos com trajetórias lineares

$$K_T^D = \frac{C_e \cdot K_{XE} \cdot X_a + C_e \cdot K_{ZE} \cdot Z_a - K_X \cdot x_a - K_Z \cdot z_a}{K_{GZX} \cdot X_a + K_{GZZ} \cdot Z_a} \quad (173)$$

b) para movimentos com trajetórias não-lineares

$$K_T^D = \frac{C_e \cdot K_{XE} + C_e \cdot K_{ZE} \cdot \text{tg}(\beta_a) - K_X - K_Z \cdot \text{tg}(\beta_a)}{K_{GZX} + K_{GZZ} \cdot \text{tg}(\beta_a)} \quad (174)$$

Uma vez determinado o valor do coeficiente K_f^D todos os termos da equação 163 tornam-se conhecidos, permitindo então que sejam calculadas, em qualquer frequência, as amplitudes máxima e mínima da tensão dinâmica no ponto de amarração, completando portanto o cálculo da resposta dinâmica da linha através do método aproximado exposto neste capítulo.

Para facilitar a aplicação deste método, todo o equationamento apresentado ao longo deste capítulo foi implementado num programa para micro-computador denominado CADILAC, desenvolvido em linguagem Pascal. Este programa está acoplado ao programa CATENA e utiliza os resultados deste como dados de entrada para o cálculo da resposta dinâmica.

A avaliação do método aproximado para cálculo da resposta dinâmica das linhas foi feita simulando-se no programa CADILAC todos os ensaios do estudo experimental. A comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e através do método aproximado está apresentada no próximo item.

7.6 - A Avaliação do Método Aproximado

Para se avaliar a precisão do método aproximado para cálculo da resposta dinâmica de linhas de amarração apresentado neste capítulo, calculou-se através do programa CADILAC a resposta dinâmica dos modelos de linha nas condições de cada ensaio do estudo experimental.

Os resultados destas simulações estão plotados nos

mesmos gráficos do Apêndice A onde foram apresentados os resultados experimentais e podem ser identificados através da legenda CADILAC. Para as condições de cada ensaio a resposta dinâmica foi calculada numa ampla gama de frequências de forma a abranger aquelas nas quais os experimentos foram realizados.

Pode-se observar nos gráficos que, em todos os ensaios, a resposta dinâmica calculada através do método aproximado apresenta o mesmo tipo de comportamento detectado através dos resultados experimentais e que foi motivo de análise nos itens anteriores.

De um modo geral, há uma concordância muito boa entre os resultados analíticos e os experimentais. As maiores discrepâncias ocorrem nos ensaios onde os efeitos da não-linearidade geométrica são mais acentuados, como era de se esperar, já que o método aproximado assume a hipótese de um comportamento linear das linhas.

Nos ensaios onde os efeitos da não-linearidade geométrica são menos importantes o método aproximado apresenta resultados bastante próximos dos experimentais e capta com boa precisão os efeitos dinâmicos na resposta das linhas. Em alguns casos, inclusive, esta concordância permanece boa mesmo nas frequências onde ocorre afrouxamento da linha.

No método aproximado, a ocorrência do afrouxamento é detectada quando se obtém um valor negativo para a tensão mínima calculada através da equação 163. Este valor negativo, embora irreal, é inevitável em função das hipóteses de linearidade assumidas no método aproximado. Nestes casos,

apenas para que não seja apresentado um resultado absurdo, o programa impõe um valor nulo à tensão quando seu valor calculado é negativo.

Ainda assim, é interessante observar que, nestes casos, o método aproximado é capaz de detectar com precisão bastante boa a frequência na qual o afrouxamento tem início. Em alguns ensaios, conforme já comentado, mesmo em frequências superiores os valores de tensão máxima calculados se comparam bastante bem com os valores experimentais.

Muito embora se observe em alguns casos esta boa concordância das respostas nas frequências onde ocorre o afrouxamento, este é um resultado de pouco valor prático já que, nos sistemas de ancoragem usuais, as linhas de amarração não são projetadas para operar nesta situação, devido às altas cargas de impacto causadas pelo chicoteamento da linha.

Desta forma, considerando-se a resposta calculada apenas na faixa de frequências onde não ocorre o chicoteamento, pode-se concluir com base nas comparações com os resultados experimentais, que o método aproximado apresenta resultados bastante satisfatórios e mostra um bom potencial para ser aplicado como uma ferramenta auxiliar nos ciclos iniciais do projeto de um sistema de ancoragem.

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise das respostas dinâmicas das linhas de amarração realizada a partir dos ensaios experimentais desenvolvidos neste trabalho, foi capaz de mostrar e elucidar de forma bastante satisfatória as principais características do comportamento dinâmico de linhas que têm seus pontos de amarração submetidos aos movimentos de 1^a ordem da plataforma flutuante.

A partir dos resultados experimentais e com o auxílio de uma análise prévia sobre o comportamento estático das linhas foi possível evidenciar de forma bastante clara o mecanismo básico através do qual as linhas respondem a estas solicitações.

Em essência verificou-se que os efeitos dinâmicos provocados pelo movimento da linha dentro d'água fazem com que ocorra uma transição contínua entre as duas formas fundamentais através das quais a linha acomoda um deslocamento de seu ponto de amarração: a mudança de geometria e a deformação elástica axial.

Pôde-se concluir que esta transição é causada basicamente pelas forças de amortecimento viscoso que passam a agir ao longo da linha quando a mesma oscila devido ao movimento do ponto de amarração.

A análise sobre estes efeitos viscosos mostrou que, no caso das linhas de amarração, este amortecimento é bastante acentuado e assume muitas vezes a característica de um amortecimento supercrítico.

Verificou-se que a ação deste amortecimento impede que, com o aumento da frequência do movimento, a linha continue acomodando a maior parte do deslocamento do ponto de amarração através de mudança na sua configuração geométrica. Como consequência torna-se inevitável que uma parcela cada vez maior deste deslocamento passe a ser acomodada através da deformação elástica axial.

Em resumo, as linhas de amarração respondem dinamicamente a um movimento do ponto de amarração através de uma mudança na forma de acomodar os deslocamentos deste ponto. A resposta evolui de uma forma essencialmente geométrica, que é característica da resposta quase-estática, para uma forma essencialmente elástica, associada às frequências mais altas.

A partir destas constatações verificou-se então que é possível se estabelecer antecipadamente o limite superior das tensões dinâmicas numa linha de amarração conhecendo-se apenas as características de sua configuração estática inicial. Este limite é equivalente à tensão que atuaria no ponto de amarração se a linha respondesse apenas através de deformação elástica ao deslocamento deste ponto.

Acredita-se que estas conclusões e as demais características levantadas ao longo do trabalho sobre o comportamento dinâmico das linhas, fornecem subsídios bastante importantes para auxiliar o projetista durante o processo de especificação e dimensionamento de sistemas de ancoragem para plataformas flutuantes.

Com base neste estudo sobre o comportamento das linhas pôde-se então propor um método aproximado para o

cálculo da resposta dinâmica no domínio da frequência.

Os resultados obtidos com este método mostraram uma concordância bastante boa com os resultados dos ensaios experimentais, indicando que o mesmo tem um bom potencial para ser utilizado como uma ferramenta auxiliar do projetista nos ciclos iniciais do projeto do sistema de ancoragem.

Tendo em vista os resultados obtidos e expostos ao longo dos capítulos, acredita-se que os objetivos propostos para o presente trabalho foram satisfatoriamente atingidos.

Como prosseguimento natural dos estudos já realizados, entende-se que, a partir deste ponto, trabalhos posteriores devem procurar focalizar dois aspectos relacionados à dinâmica das linhas de amarração e ao trabalho aqui exposto.

Em primeiro lugar, em função dos conhecimentos obtidos através do estudo experimental, seria interessante estender o estudo teórico da dinâmica das linhas a partir de uma análise mais formal das equações diferenciais que descrevem o fenômeno. O objetivo seria tentar, através desta análise, enxergar matematicamente as principais características do comportamento dinâmico das linhas e com isto estabelecer de modo formal como os principais parâmetros envolvidos influenciam a resposta dinâmica. Para isto, os trabalhos de Triantafyllou citados nas referências bibliográficas fornecem os subsídios necessários e indicam as formas mais adequadas para se abordar o problema.

Finalmente, o outro assunto que pode ser tratado está relacionado com o aperfeiçoamento do método aproximado aqui proposto.

O aprofundamento teórico sugerido acima, juntamente com os conhecimentos já adquiridos, pode fornecer outros subsídios que permitam melhorar o método aproximado de cálculo e torná-lo adequado para aplicação em linhas com qualquer configuração geométrica ou mesmo para linhas de composição mista.

Outros melhoramentos podem também ser introduzidos para permitir, por exemplo, uma avaliação preliminar da vida a fadiga, o que tornaria o método uma ferramenta completa para auxílio ao projeto nos ciclos iniciais.

Além disto seria interessante também desenvolver um estudo comparativo entre o método aproximado e programas de cálculo mais sofisticados e já consagrados, baseados por exemplo no método dos elementos finitos, de forma que se pudesse assegurar a confiabilidade do método e estabelecer com maior precisão suas limitações e restrições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units", API-RP2P, American Petroleum Institute, Second Edition, May 1987.
- [2] "API Recommended Practice for Design, Analysis and Maintenance of Catenary Mooring for Floating Production Systems", Draft Copy, American Petroleum Institute, May 1989.
- [3] "Rules for Classification of Mobile Offshore Units", Part 6, Chapter 2-Position Mooring (POSMOOR), Det Norske Veritas, July 1989.
- [4] Suhara, T. et alli, "Approximate Method for Calculating Dynamic Tension of Mooring Chain", NK Technical Bulletin, Japan, 1985.
- [5] Suhara, T. et alli, "Behavior and Tension of Oscillating Chain in Water", Journal of the Society of Naval Architects, vol.148, Japan, 1980.
- [6] Suhara, T. et alli, "Behavior and Tension of Oscillating Chain in Water (II)", Journal of the Society of Naval Architects, vol.152, Japan, 1983.
- [7] Suhara, T. et alli, "Behavior and Tension of Oscillating Chain in Water (III)", Journal of the Society of Naval Architects, vol.154, Japan, 1983.
- [8] Suhara, T. et alli, "Dynamic Behaviour and Tension of Oscillating Chain in Water", Offshore Technology Conference, USA, 1981.
- [9] Lindahl, J., "Modellförsök med en Förankringskabel", Report Series A:12, Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Sweden, 1985.

- [10] Triantafyllou, M.S. et alii, "Dynamic Analysis as a Tool for Open-sea Mooring System Design", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Annual Meeting, New York, USA, 1985.
- [11] Triantafyllou, M.S. et alii, "The Statics and Dynamics of the Mooring Lines of a Guyed Tower for design Applications", Proceedings Behaviour of Offshore Structures at Sea, Cambridge, Massachusetts, USA, 1982.
- [12] Triantafyllou, M.S., "The Dynamics of Taut Inclined Cables", Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, vol.37, 1984.
- [13] Triantafyllou, M.S. and Blied, A., "The Dynamics of Inclined Taut and Slack marine Cables", Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1983.
- [14] Triantafyllou, M.S. and Blied, A., "Dynamic Analysis of Mooring Lines Using Perturbation Techniques", IEEE, 1982.
- [15] Triantafyllou, M.S., "Preliminary Design Of Mooring Systems", Journal of Ship Research, vol.26, N° 1, 1982.
- [16] Triantafyllou, M.S. and Blied, A., "Nonlinear Cable Dynamics", Proceedings Behaviour of Offshore Structures at Sea, Amsterdam, 1985.
- [17] Sincock, P. and Lalani, M., "Developments In Fatigue Design Guidelines for Anchor Chains as Moorings Lines", Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1990.
- [18] Hwang, Y.L., "Nonlinear Dynamic Analysis of Mooring Lines", Technical Development Division, IMODCO, Los Angeles, USA.

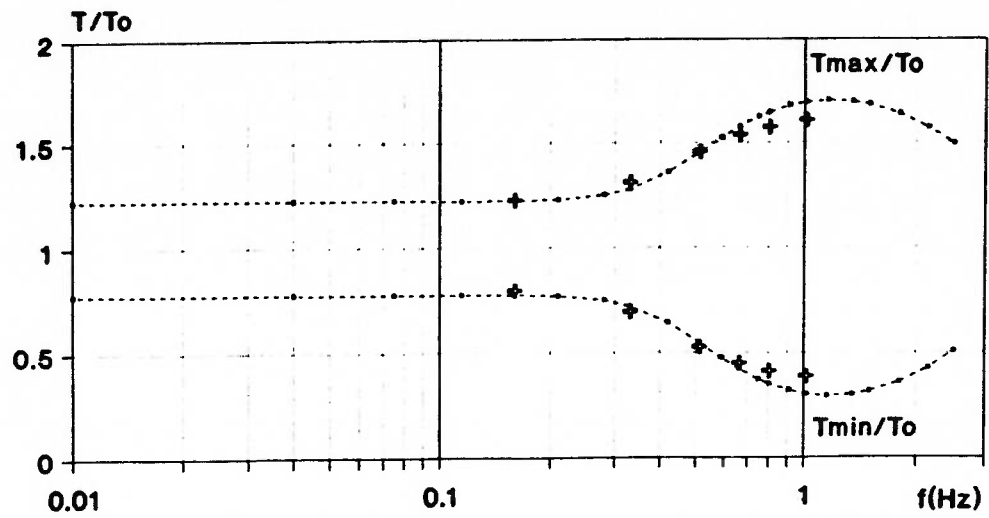
- [19] van der Boom, H.J.J., "Dynamic Behaviour of Mooring Lines", Proceedings Behaviour of Offshore Structures at Sea, Amsterdam, 1985.
- [20] Polderdijk, S.H., "Response of Anchor Lines to Excitation at the Top", Proceedings Behaviour of Offshore Structures at Sea, Amsterdam, 1985.
- [21] Fylling, I.J. and Mørch, M., "Dynamic Response in Anchor Lines: Numerical Simulations Compared with Field Measurements", Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1983.
- [22] Larsen, C.M. and Fylling, I.J., "Dynamic Behaviour of Anchor Lines", Norwegian Maritime Research, N° 3, Norway, 1982.
- [23] van Sluijs, M.F. and Blok, J.J., "The Dynamic Behaviour of Mooring Lines", Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1977.
- [24] Goodman, T.R. and Breslin, J.P., "Statics and Dynamics of Anchoring Cables in Waves", Journal of Hydronautics, vol.10, N° 4, 1976.
- [25] Alexandrov, M., "On the Dynamics of Cables with Application to Marine Use", Marine Technology, January, 1971.
- [26] Wilson, B.W. and Garbaccio, D.H., "Dynamics of Ship Anchor Lines in Waves and Current", Journal of the Waterways and Harbors Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, November, 1969.
- [27] Ractliffe, A.T., "The Validity of Quasi-Static and Approximate Formulae in the Context of Cable and Flexible Riser Dynamics", Proceedings Behaviour of Offshore Structures at Sea, Amsterdam, 1985.

- [28] Hairston,D.E., "Dynamics of Vessels Moored by Multiple Cables in Deep Water", Marine Technology, vol.16, N° 2, April, 1979.
- [29] Korkut,M.D. and Herbert,E.J., "Some Notes on Static Anchor Chain Curve", Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1970.
- [30] Barusco Filho,P.J., "Estudo de um Critério de Projeto de Sistemas de Ancoragem para Aguas Profundas", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1987.
- [31] W.Weaver, S.P.Timoshenko, D.H.Young, "Vibration Problems in Engineering" , Fifth Edition, John Wiley and Sons, 1990.
- [32] L.Meirovitch, "Elements of Vibration Analysis" , Second Edition, McGraw Hill International Editions, 1986

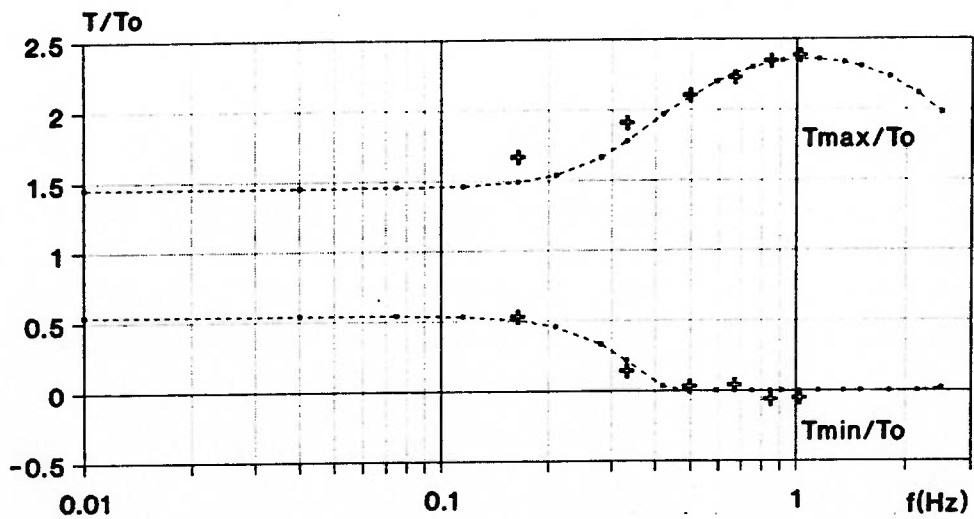
APÊNDICE - A

GRÁFICOS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS

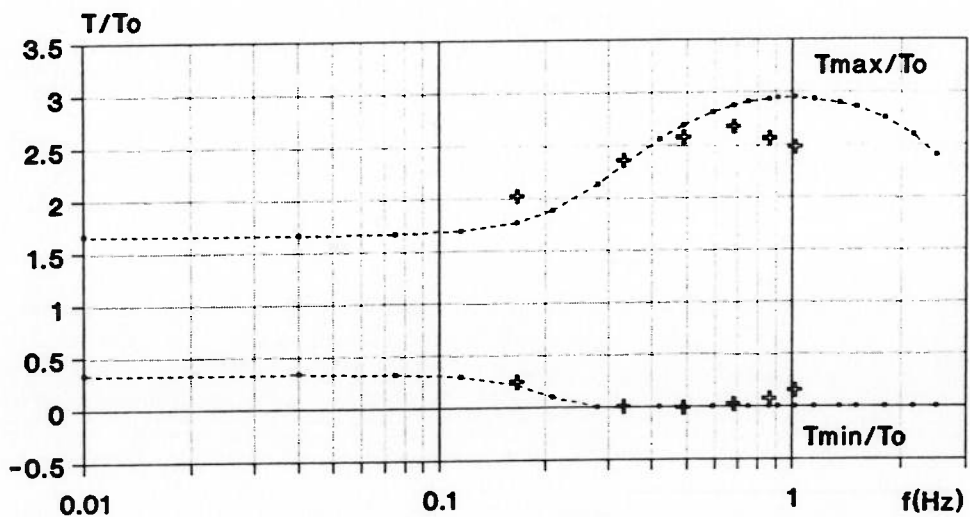
ENSAIO 1 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=20,298m; A=0,040m



ENSAIO 2 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=20,298m; A=0,081m

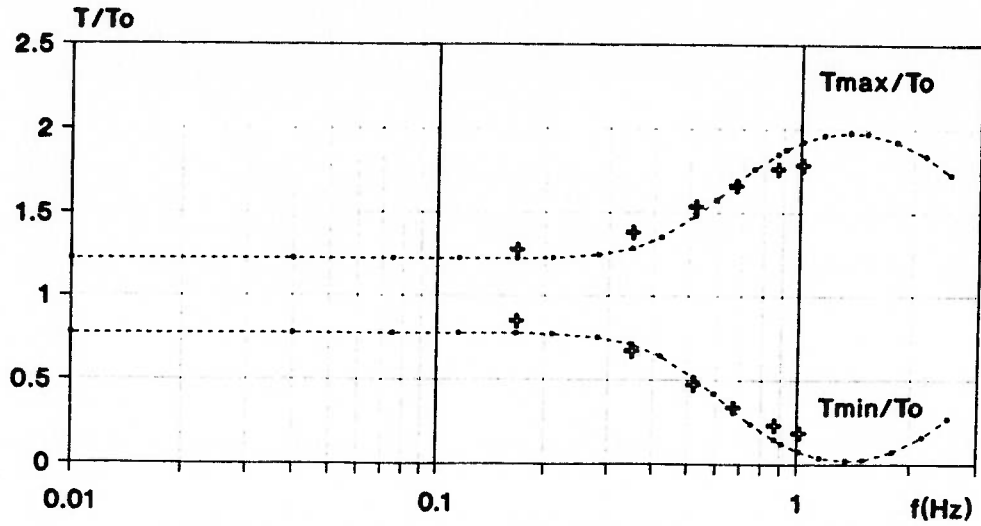


ENSAIO 3 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=20,298m; A=0,118m

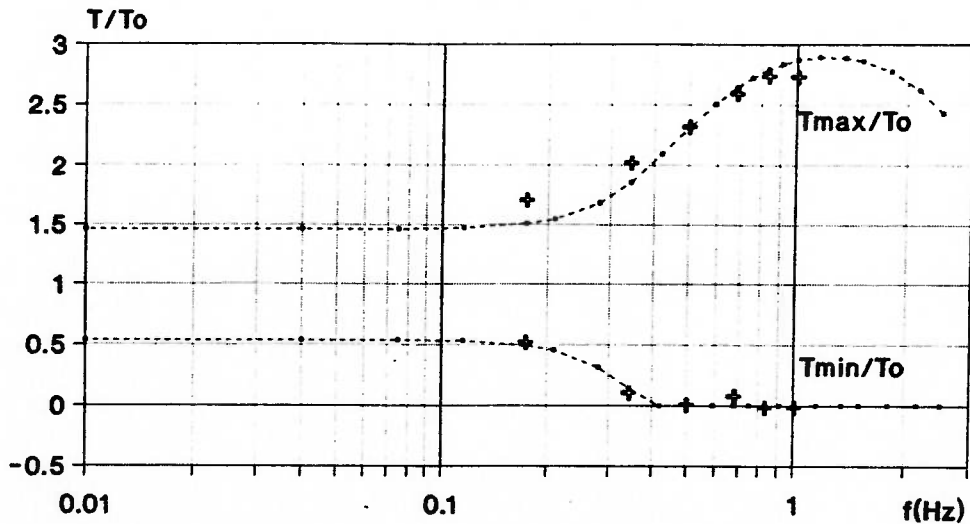


..... Cadillac + Experimental

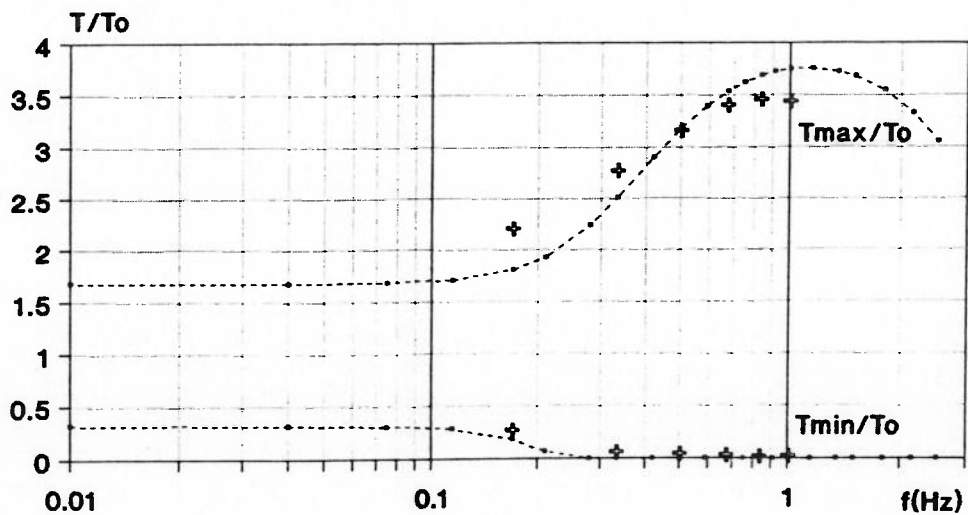
ENSAIO 4 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,388; li=20,298m; A=0,041m



ENSAIO 5 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,388; li=20,298m; A=0,084m

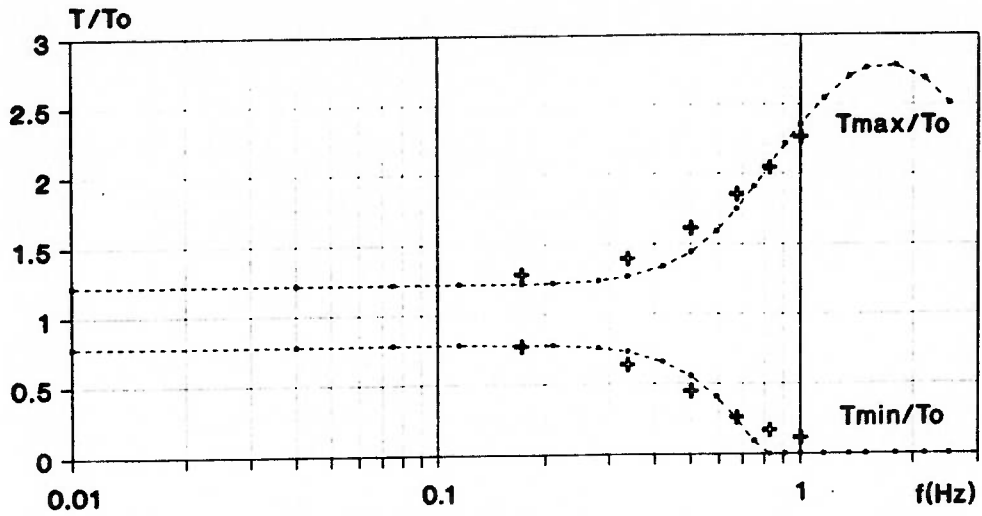


ENSAIO 6 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,388; li=20,298m; A=0,124m

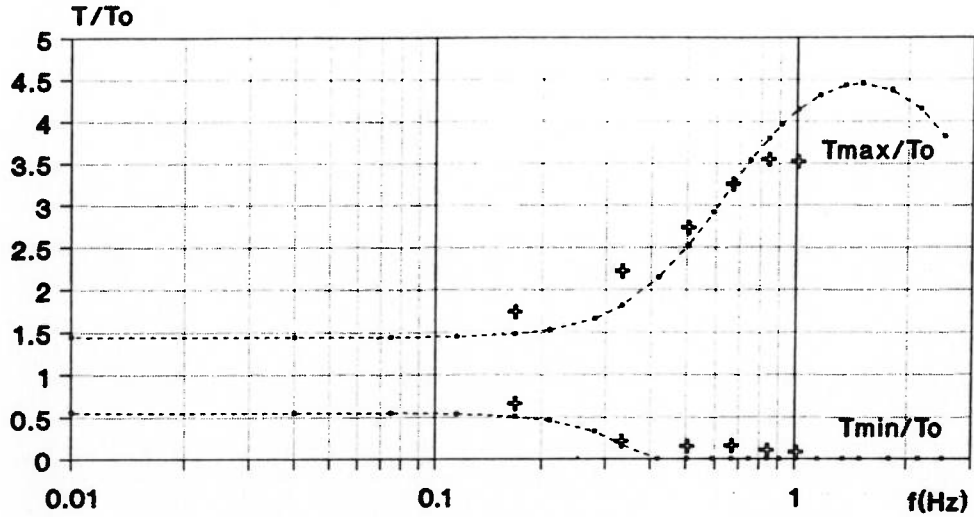


..... Cadillac + Experimental

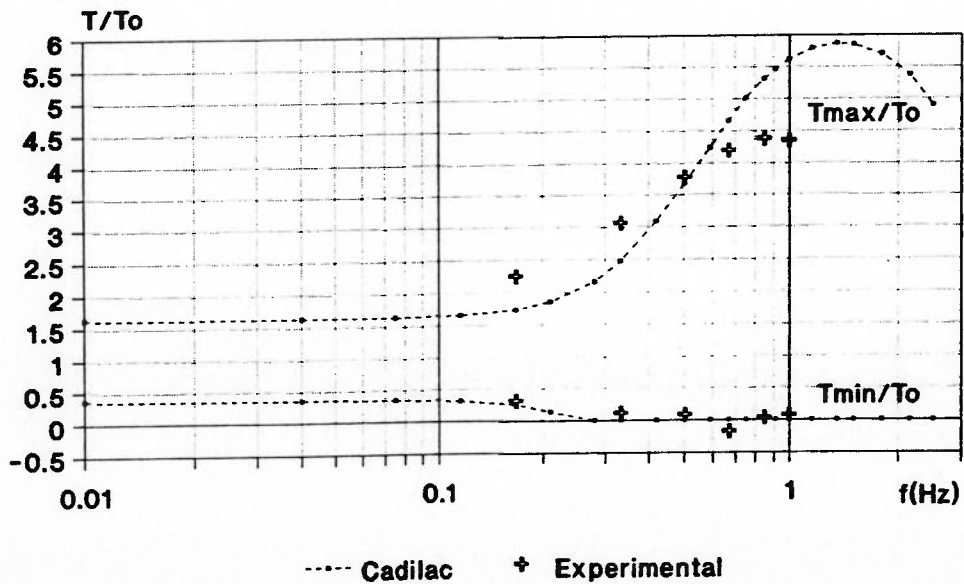
ENSAIO 7 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,520; li=20,298m; A=0,047m



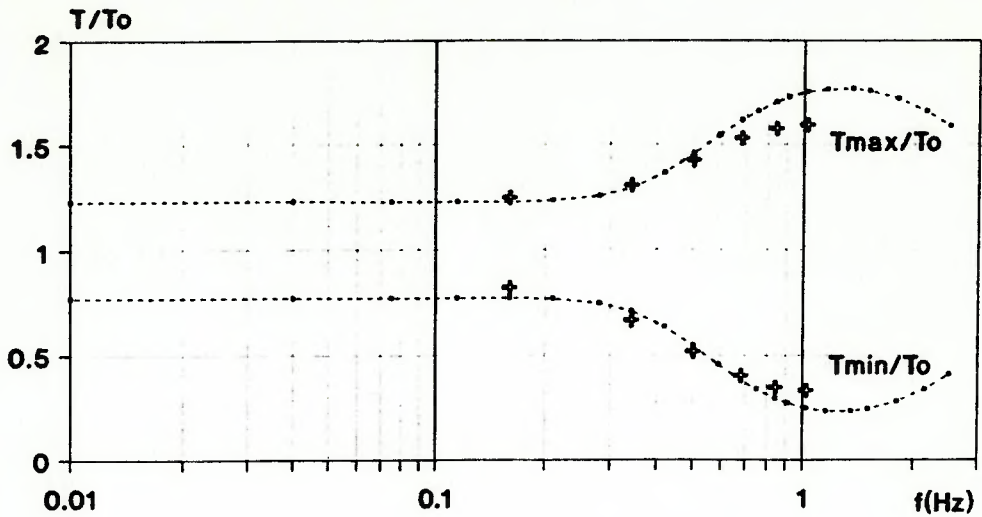
ENSAIO 8 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,520; li=20,298m; A=0,095m



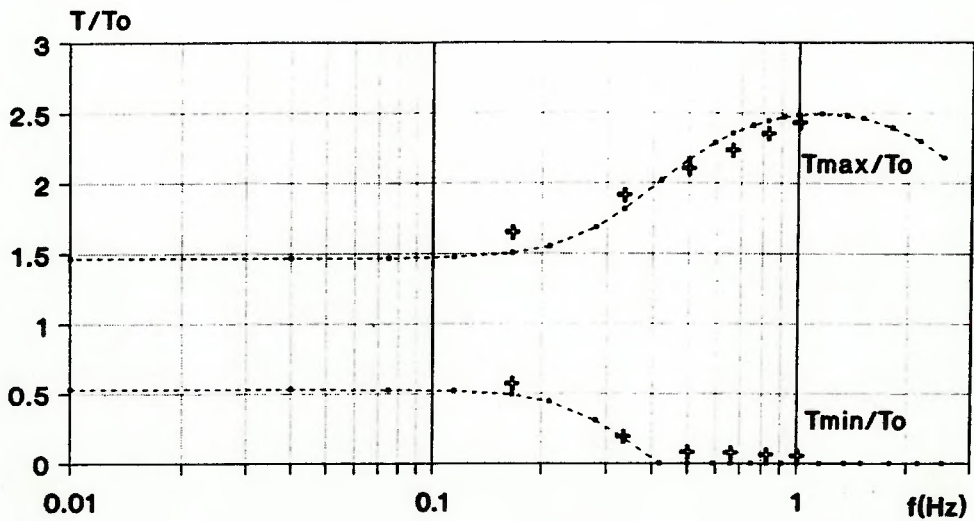
ENSAIO 9 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,520; li=20,298m; A=0,135m



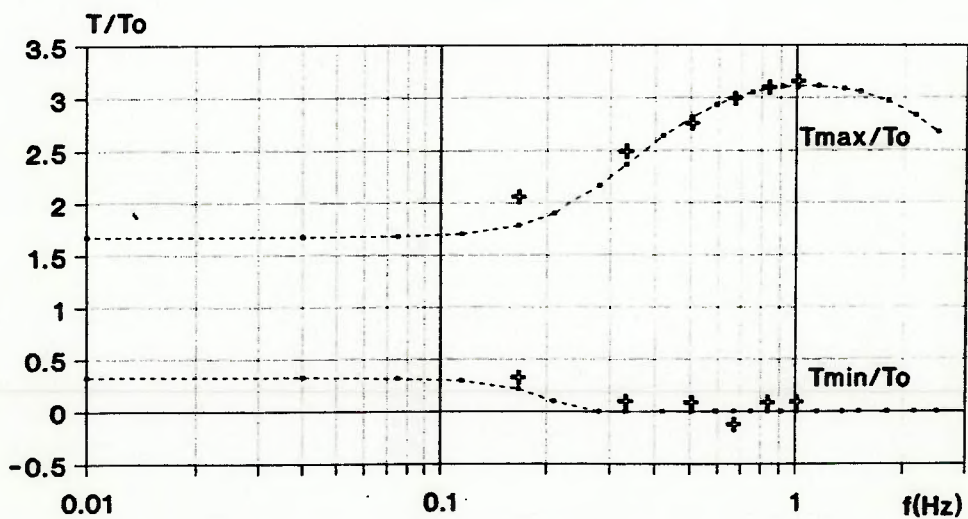
ENSAIO 10 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,328; li=18,279m; A=0,039m



ENSAIO 11 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,328; li=18,279m; A=0,080m

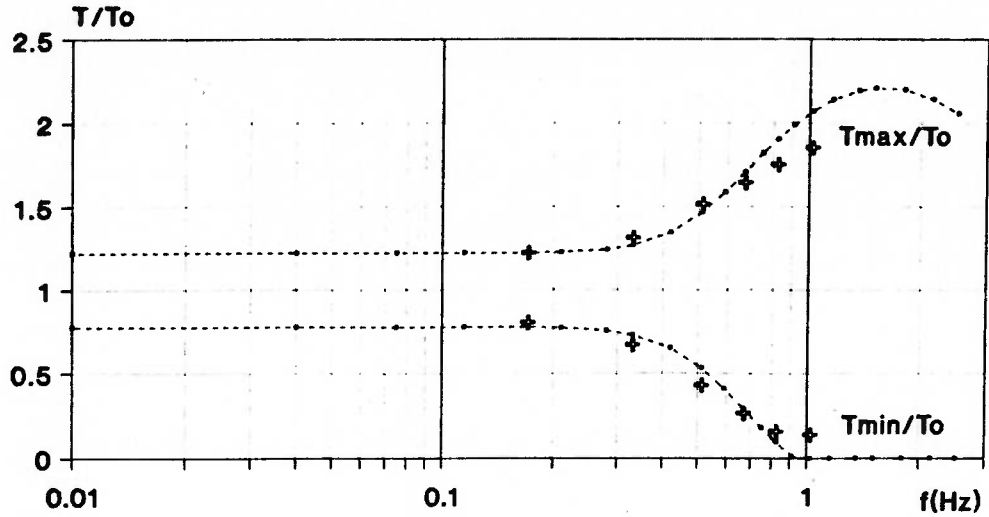


ENSAIO 12 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,328; li=18,279m; A=0,115m

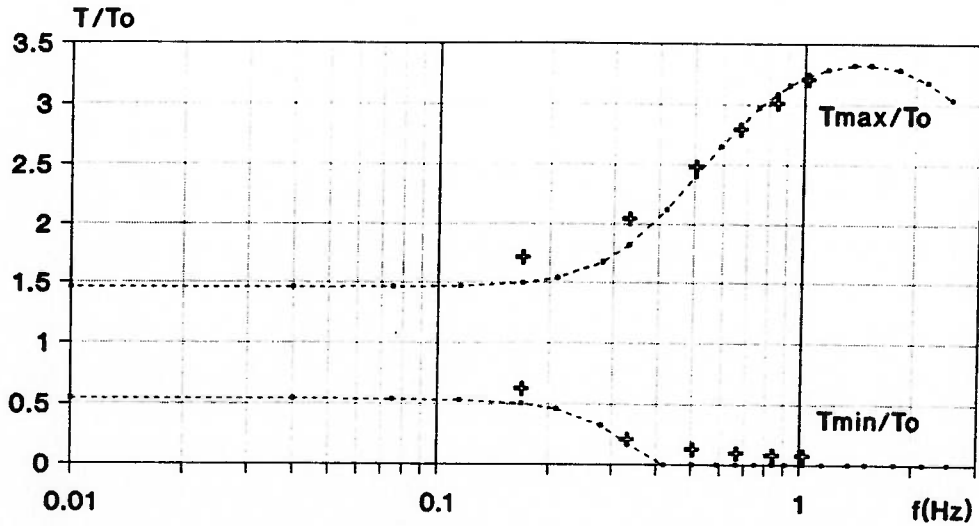


--- Cadilac + Experimental

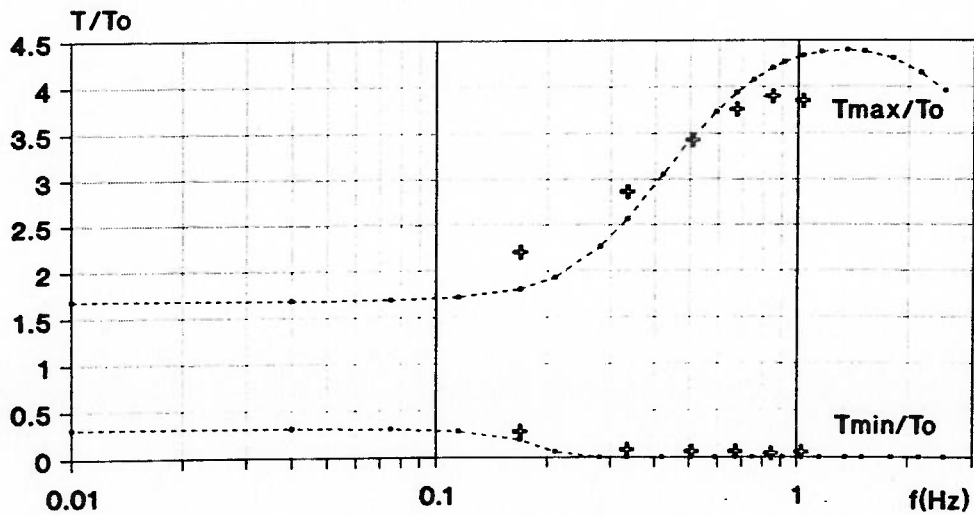
ENSAIO 13 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,391; li=16,257m; A=0,039m



ENSAIO 14 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,391; li=16,257m; A=0,080m

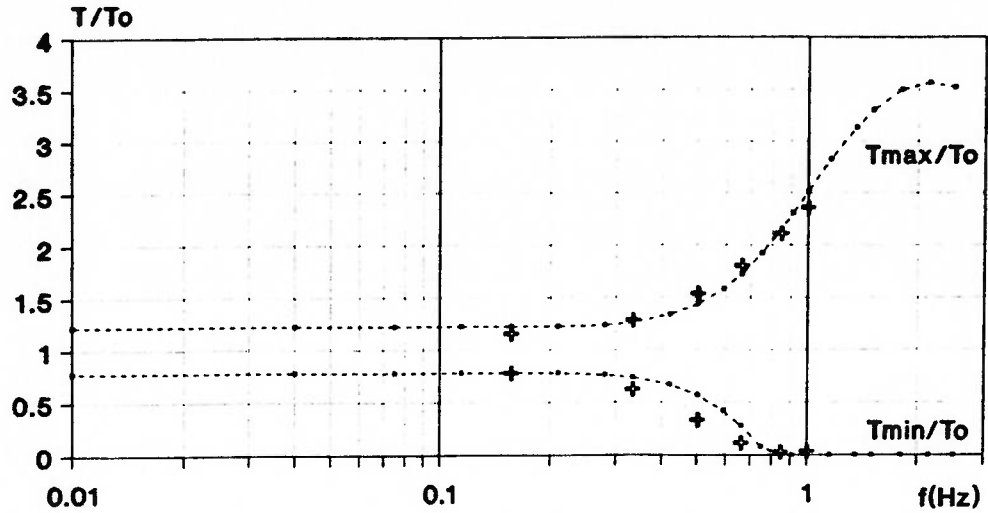


ENSAIO 15 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,391; li=16,257m; A=0,119m

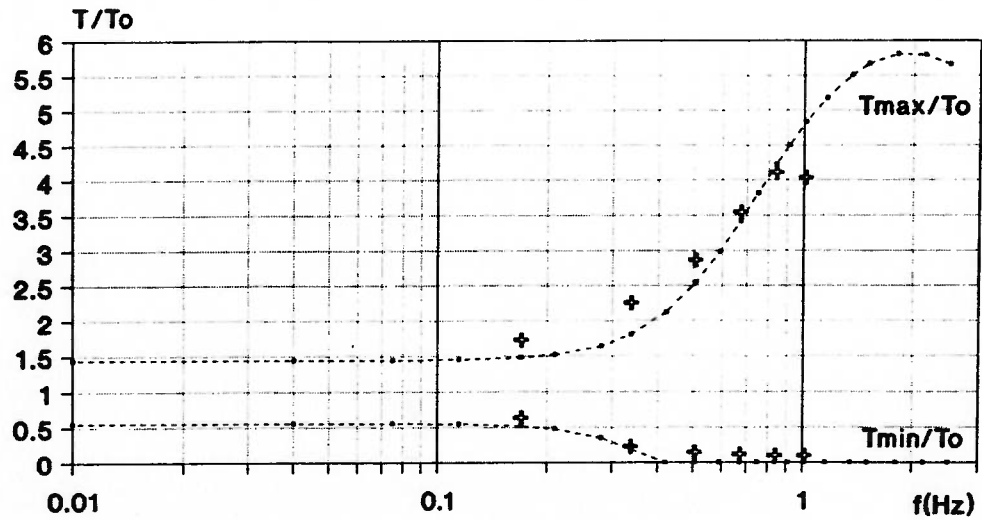


--- Cadillac + Experimental

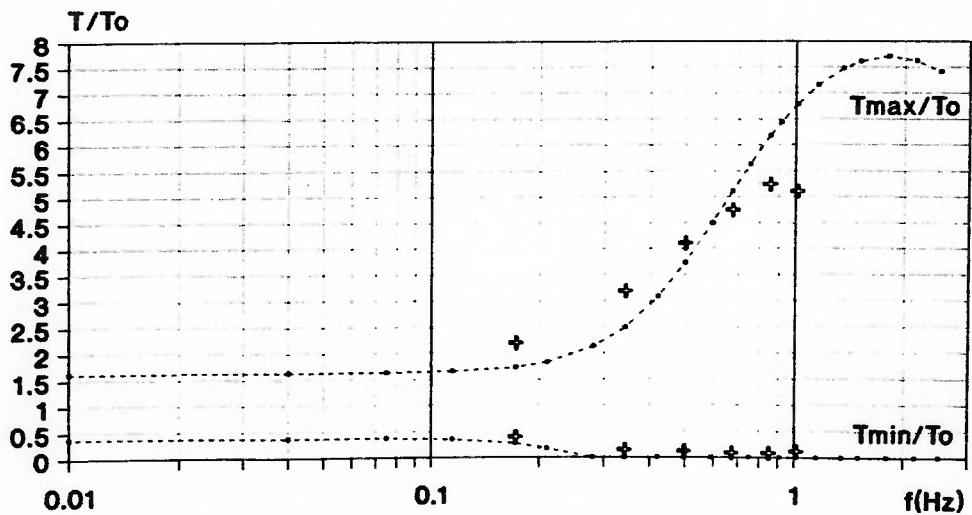
ENSAIO 16 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,516; li=14,237m; A=0,045m



ENSAIO 17 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,516; li=14,237m; A=0,090m

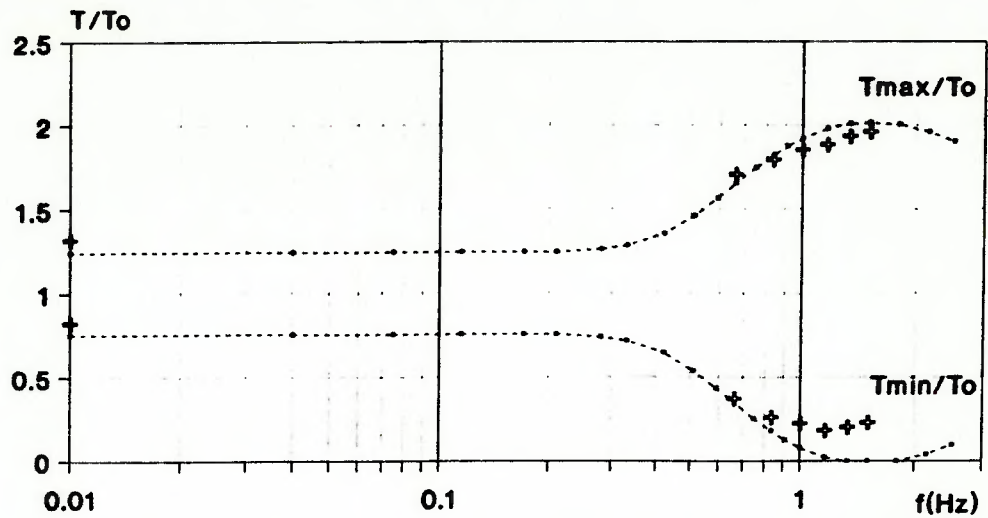


ENSAIO 18 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,516; li=14,237m; A=0,127m

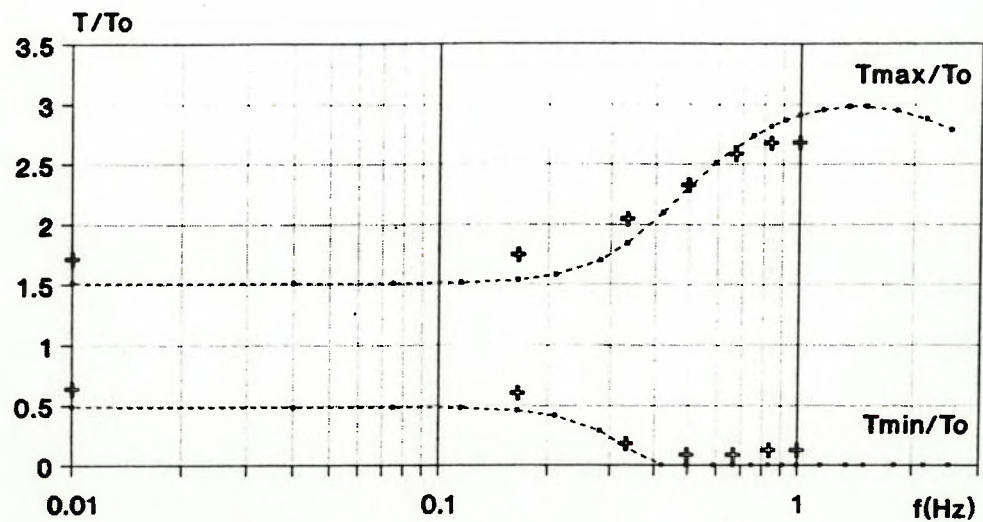


----- Cadilac + Experimental

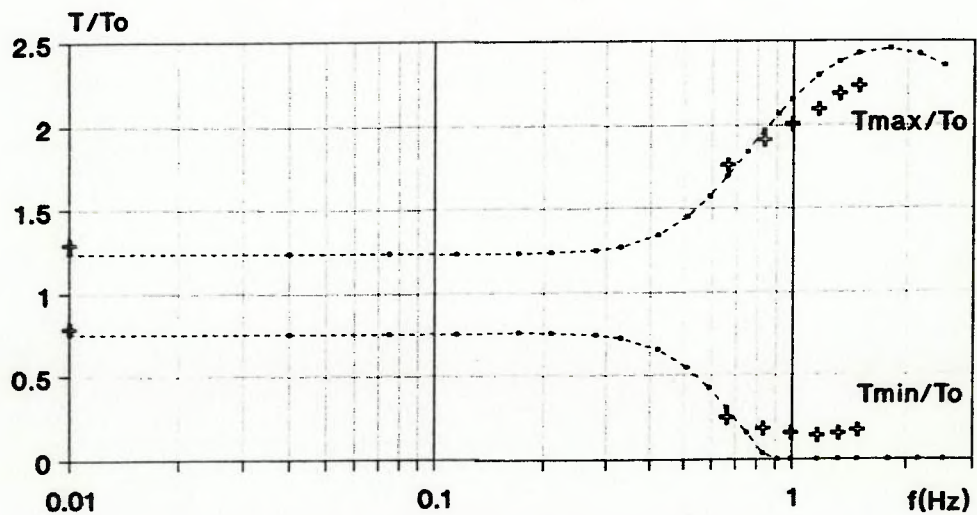
ENSAIO 19 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 $D=0,329$; $l_i=14,268m$; $A=0,035m$



ENSAIO 20 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 $D=0,329$; $l_i=14,268m$; $A=0,073m$

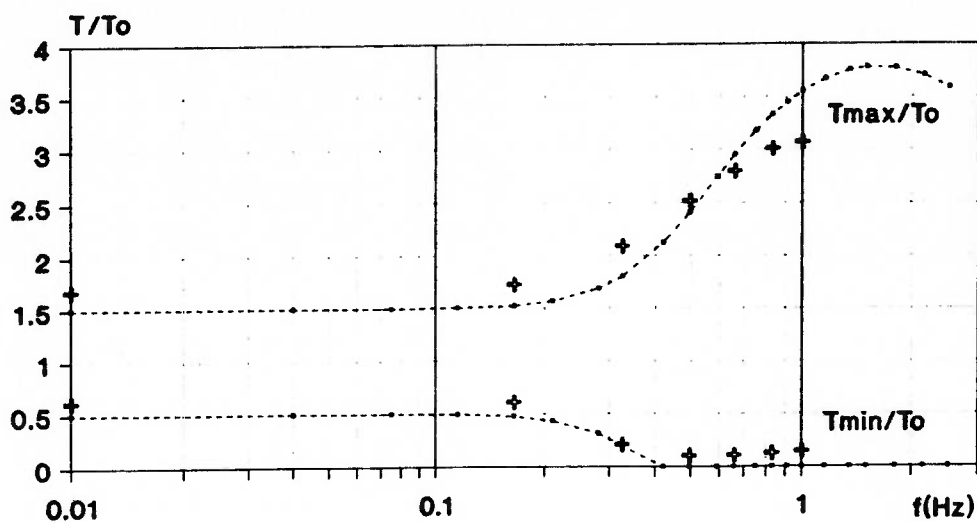


ENSAIO 21 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
 $D=0,389$; $l_i=14,268m$; $A=0,037m$

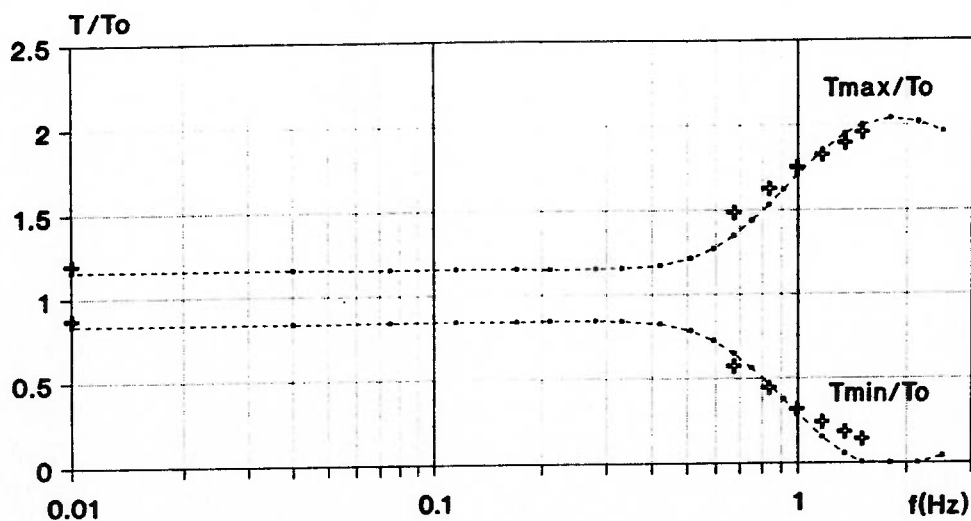


----- Cadillac + Experimental

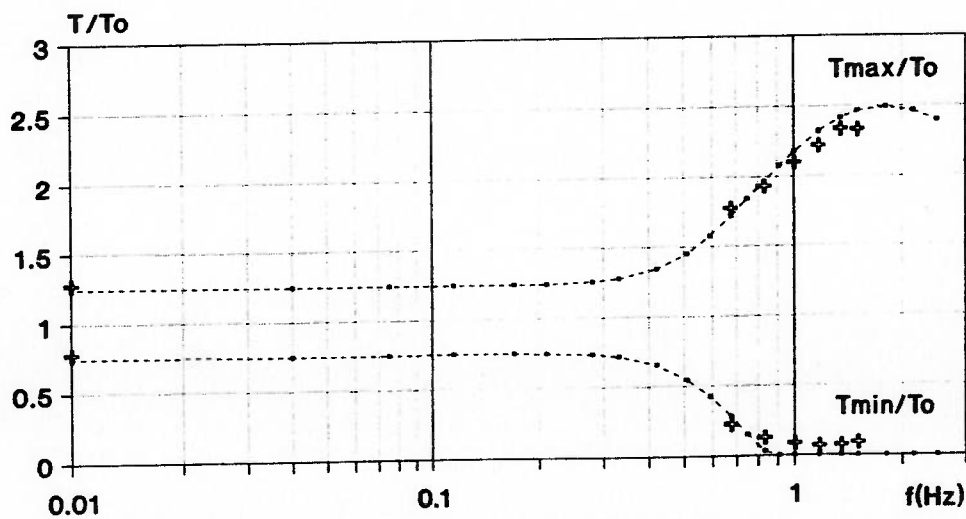
ENSAIO 22 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,389; li=14,268m; A=0,076m



ENSAIO 23 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,391; li=14,268m; A=0,024m

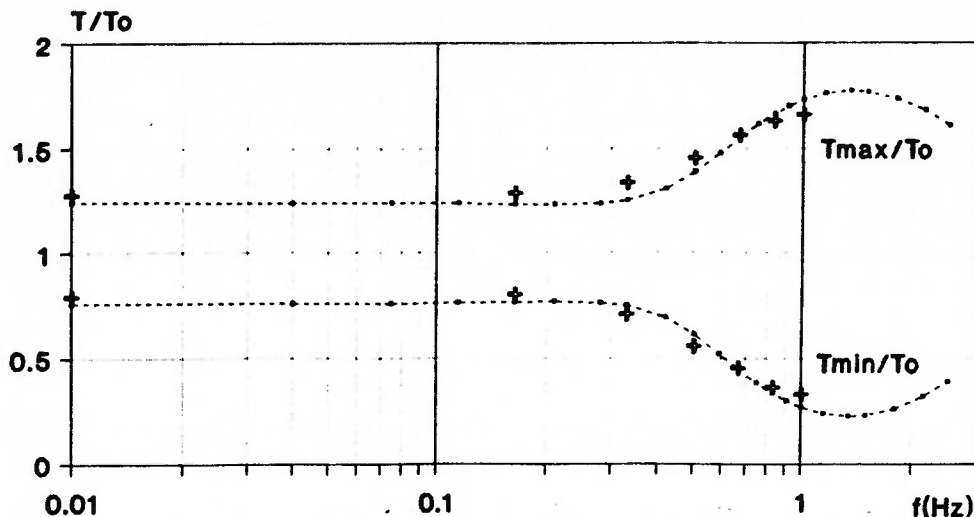


ENSAIO 24 - LINHA 1 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,391; li=14,268m; A=0,037m

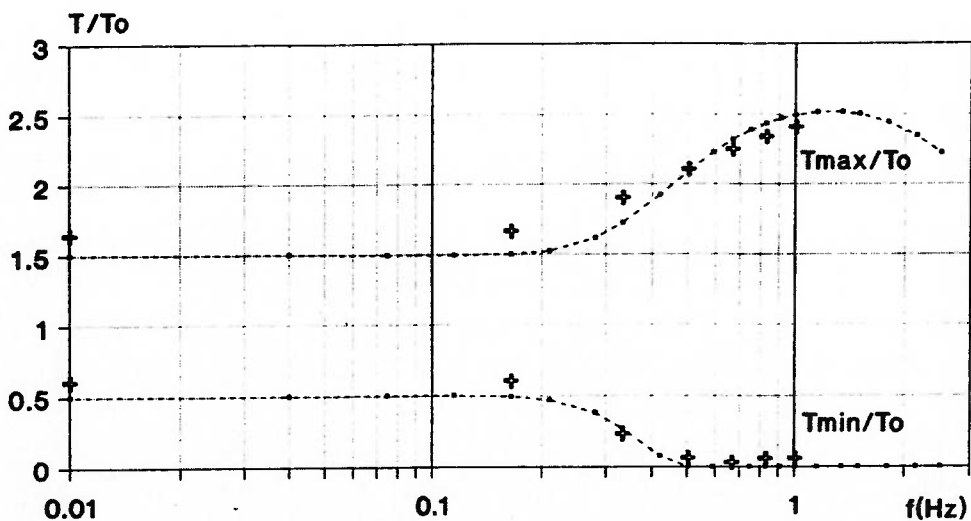


----- Cadillac + Experimental

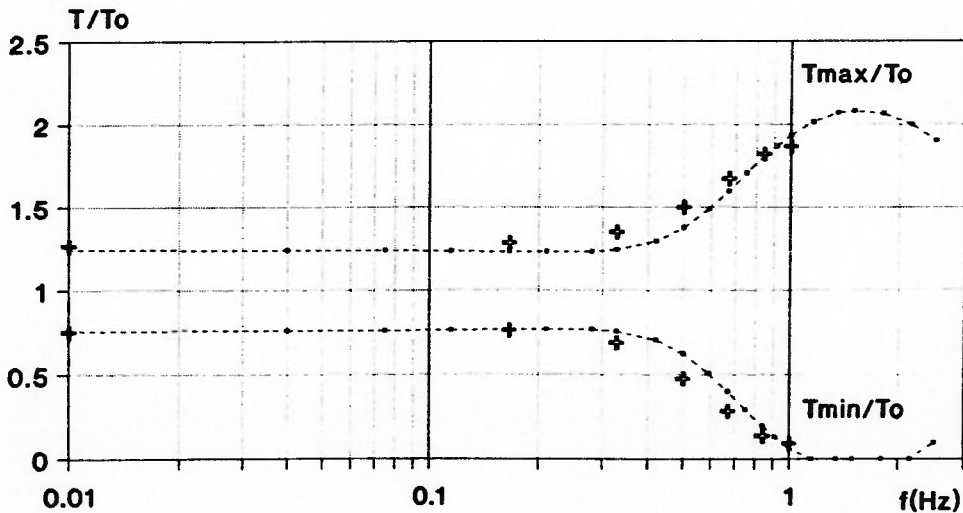
ENSAIO 25-LINHA1-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,329; li=18,313m; A=0,039m



ENSAIO 26-LINHA 1-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,329; li=18,313m; A=0,081m

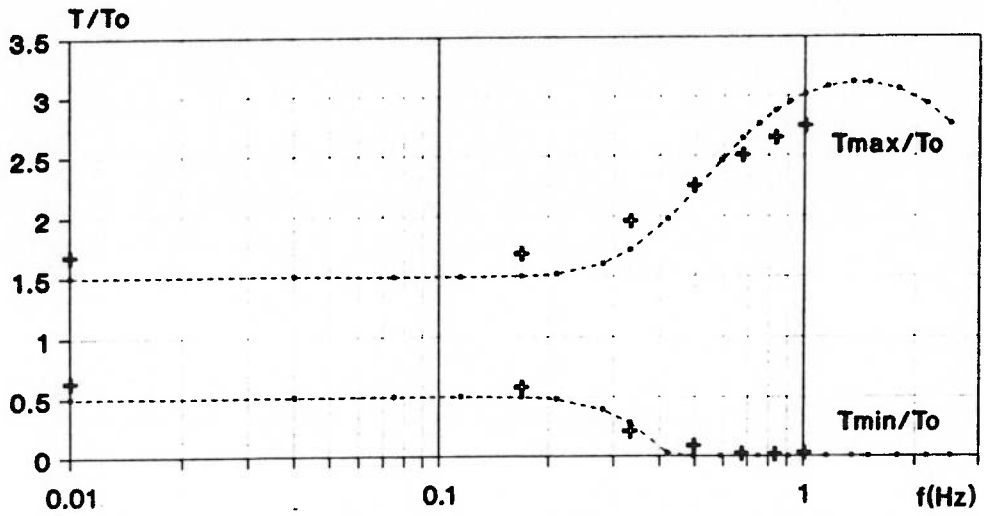


ENSAIO 27-LINHA 1-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,390; li=18,313m; A=0,041m

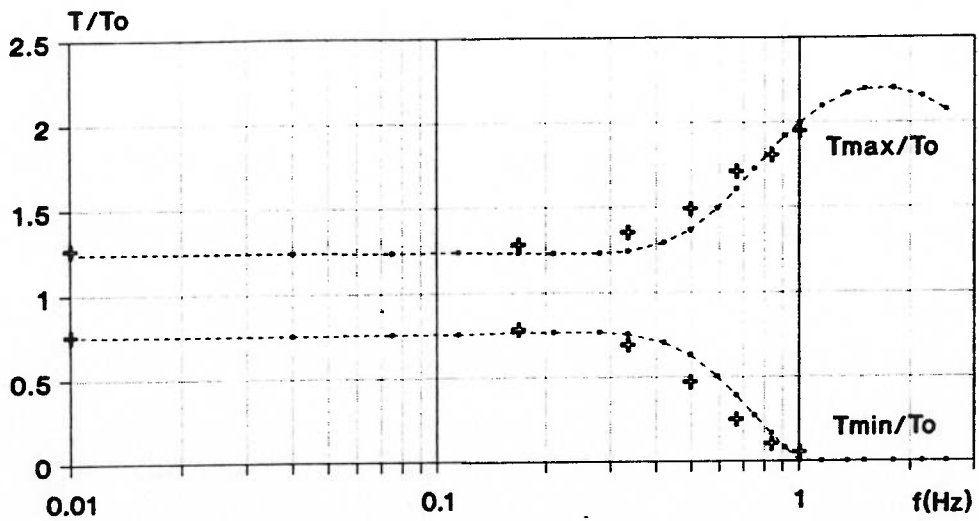


----- Cadillac + Experimental

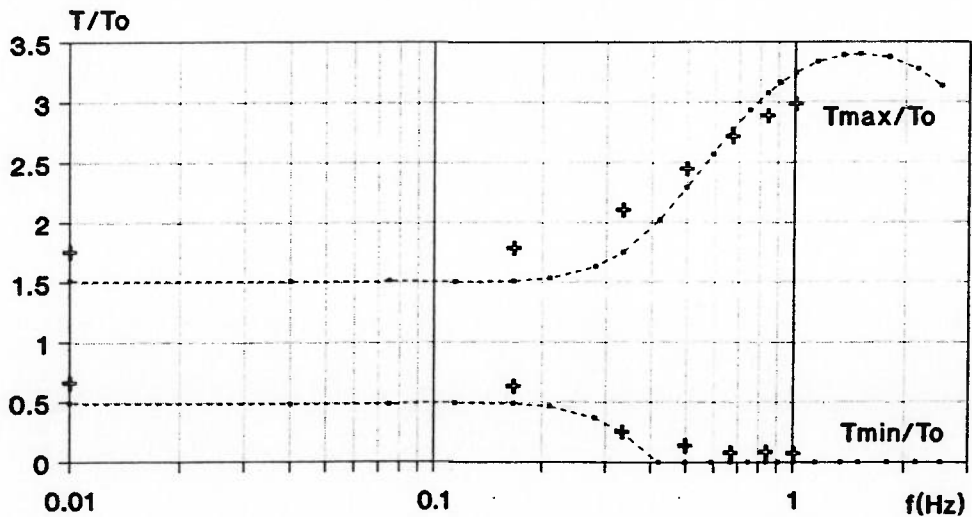
ENSAIO 28-LINHA 1-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,390; li=18,313m; A=0,085m



ENSAIO 29-LINHA 1-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,389; li=16,290m; A=0,040m

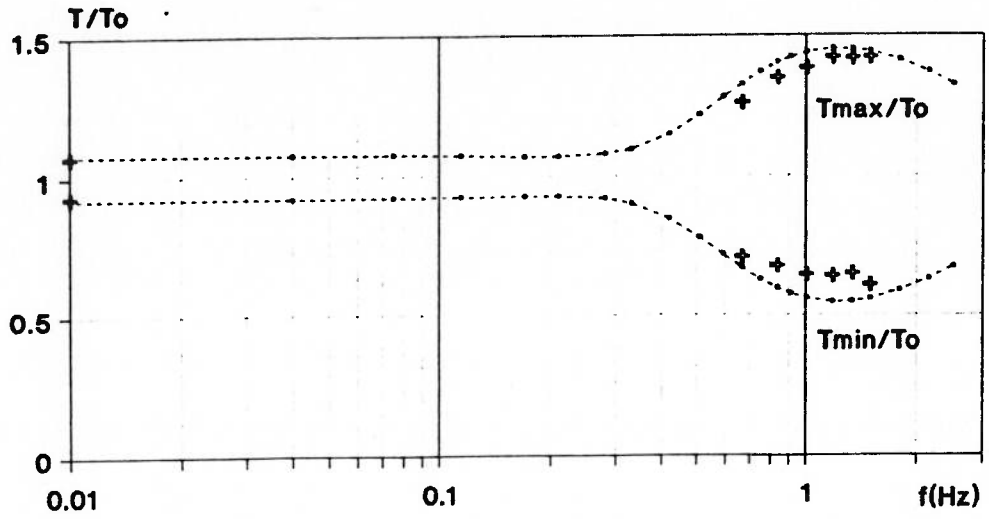


ENSAIO 30-LINHA 1-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,389; li=16,290m; A=0,085m

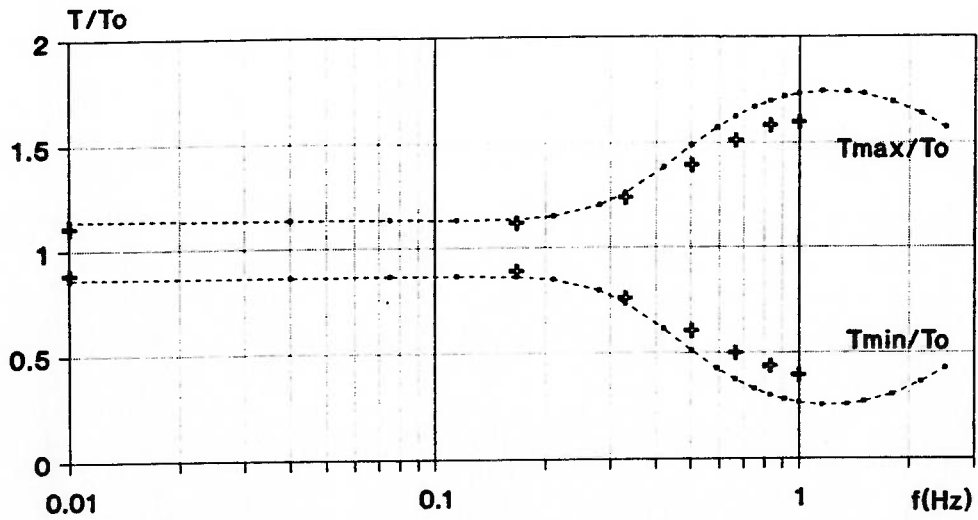


--- Cadillac + Experimental

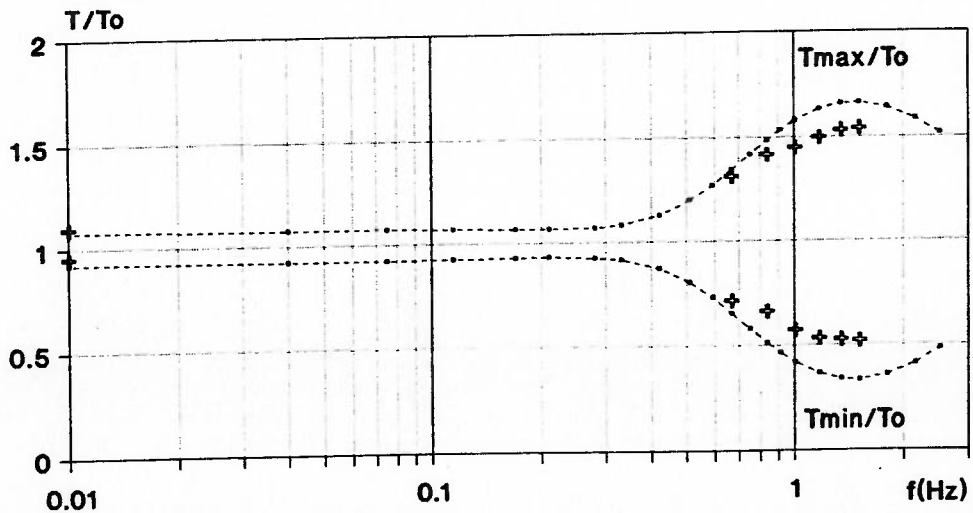
ENSAIO 31-LINHA 1-MOV.LINEAR VERTICAL
D=0,329; li=18,313m; A=0,065m



ENSAIO 32-LINHA 1-MOV.LINEAR VERTICAL
D=0,329; li=18,313m; A=0,116m

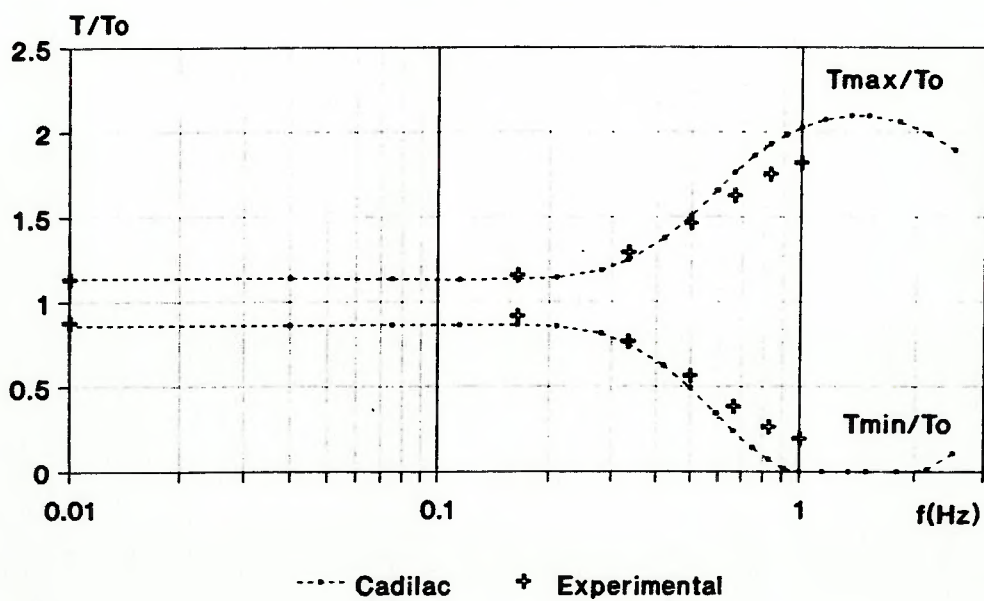


ENSAIO 33-LINHA 1-MOV.LINEAR VERTICAL
D=0,390; li=18,313m; A=0,060m

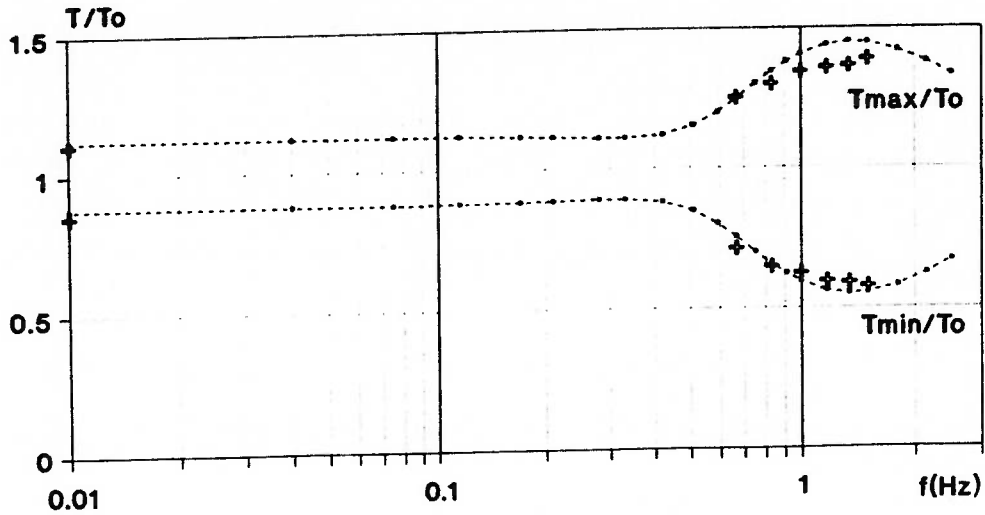


----- Cadilac + Experimental

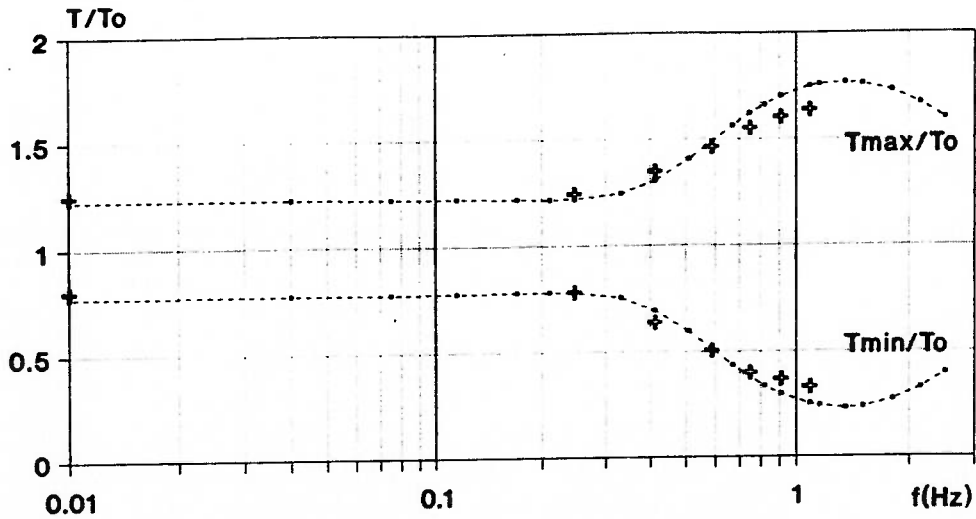
ENSAIO 34-LINHA 1-MOV.LINEAR VERTICAL
 D=0,390; li=18,313m; A=0,108m



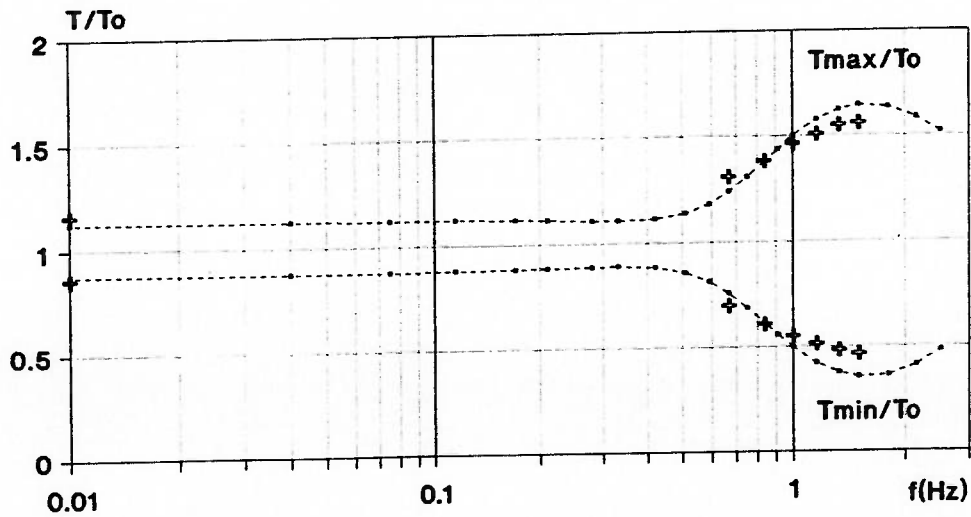
ENSAIO 35-LINHA 1-MOV.LINEAR INCLINADO
D=0,329; li=18,313m; A=0,020m



ENSAIO 36-LINHA 1-MOV.LINEAR INCLINADO
D=0,329; li=18,313m; A=0,037m

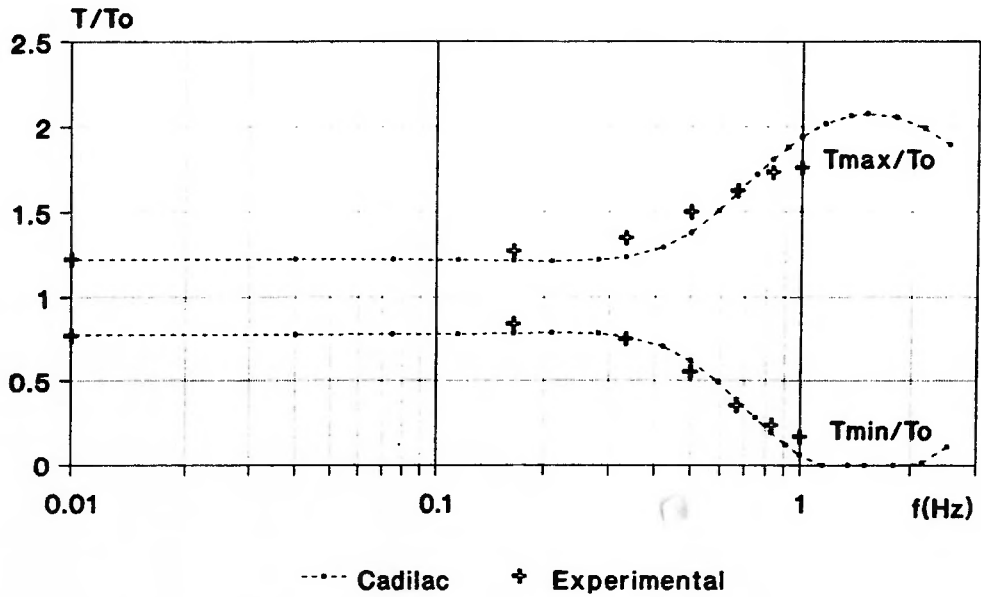


ENSAIO 37-LINHA 1-MOV.LINEAR INCLINADO
D=0,390; li=18,313m; A=0,021m

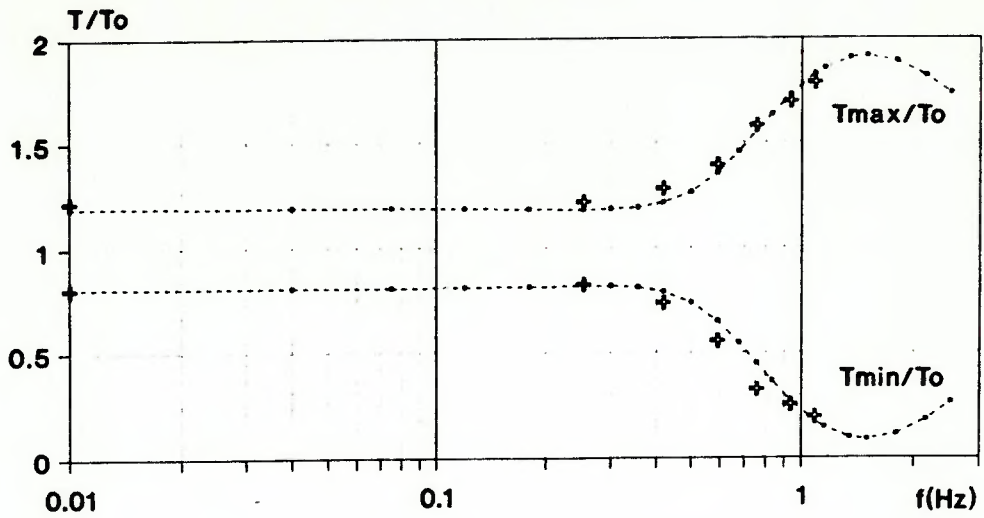


..... Cadillac + Experimental

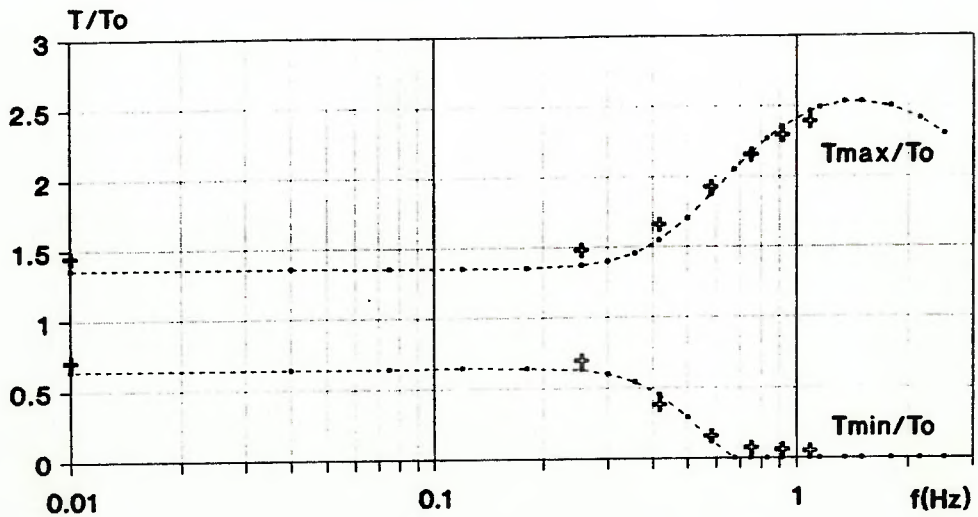
ENSAIO 38-LINHA 1-MOV.LINEAR INCLINADO
D=0,390; li=18,313m; A=0,038m



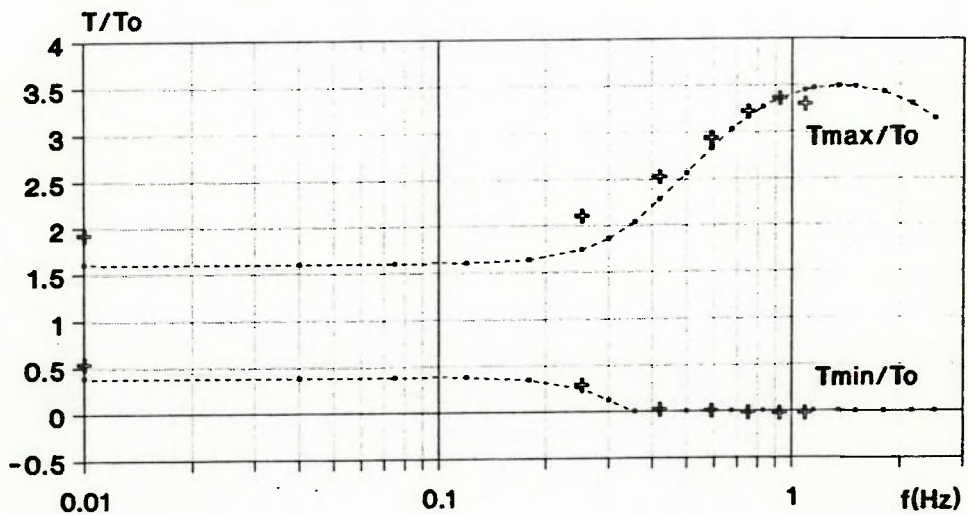
ENSAIO 39 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=20,296m; A=0,030m



ENSAIO 40 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=20,296m; A=0,055m

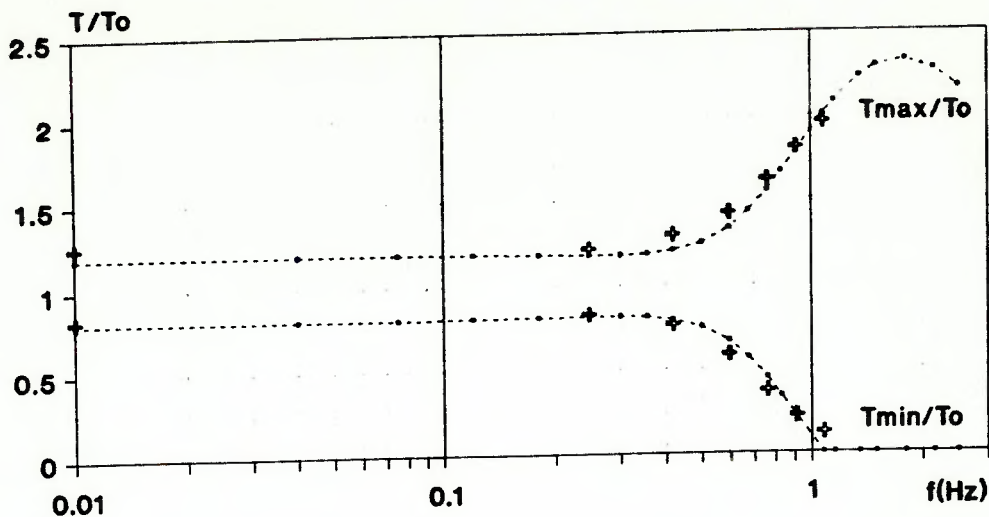


ENSAIO 41 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=20,296m; A=0,094m

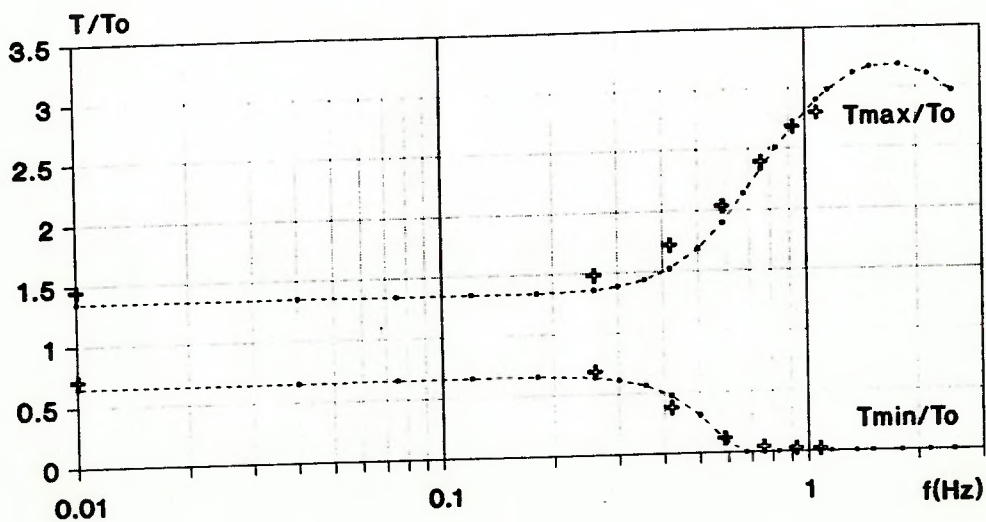


----- Cadillac + Experimental

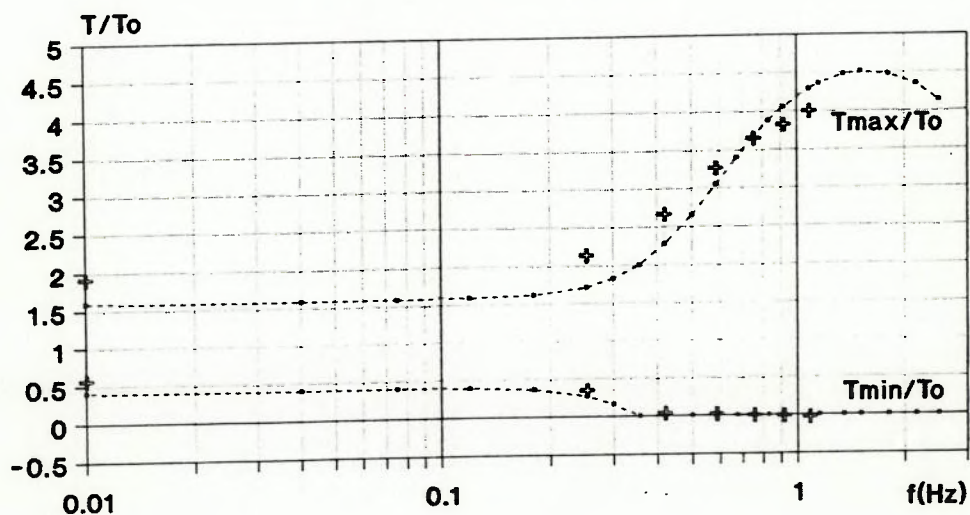
ENSAIO 42 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,390; li=20,296m; A=0,032m



ENSAIO 43 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,390; li=20,296m; A=0,058m

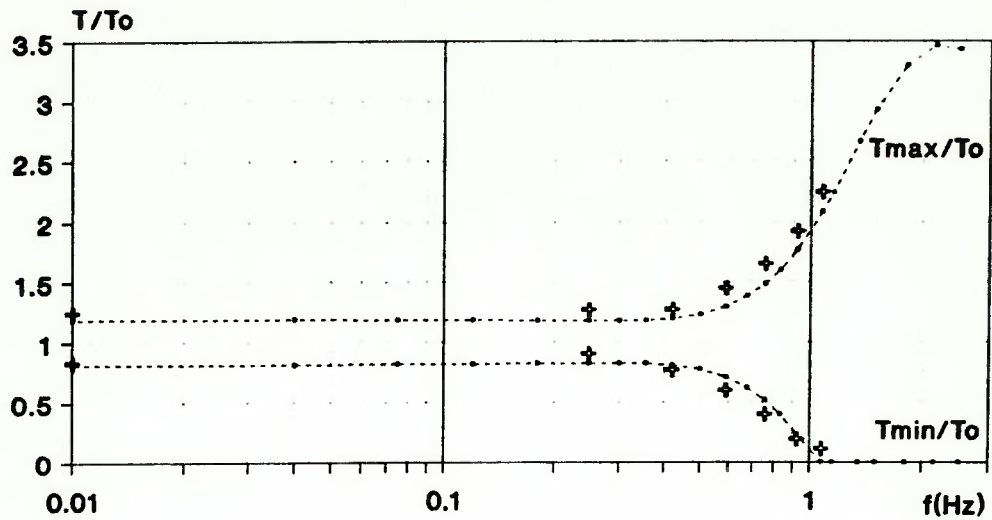


ENSAIO 44 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,390; li=20,296m; A=0,098m

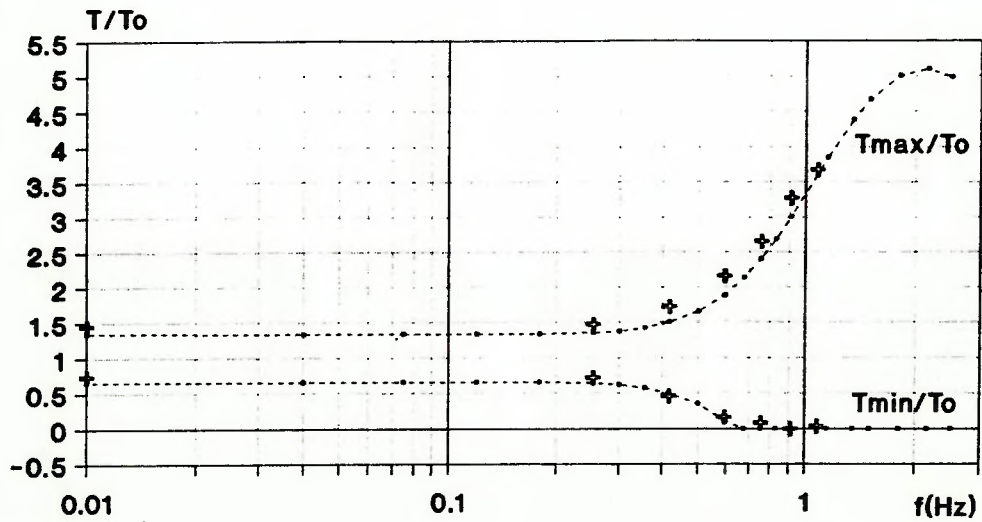


..... Cadillac + Experimental

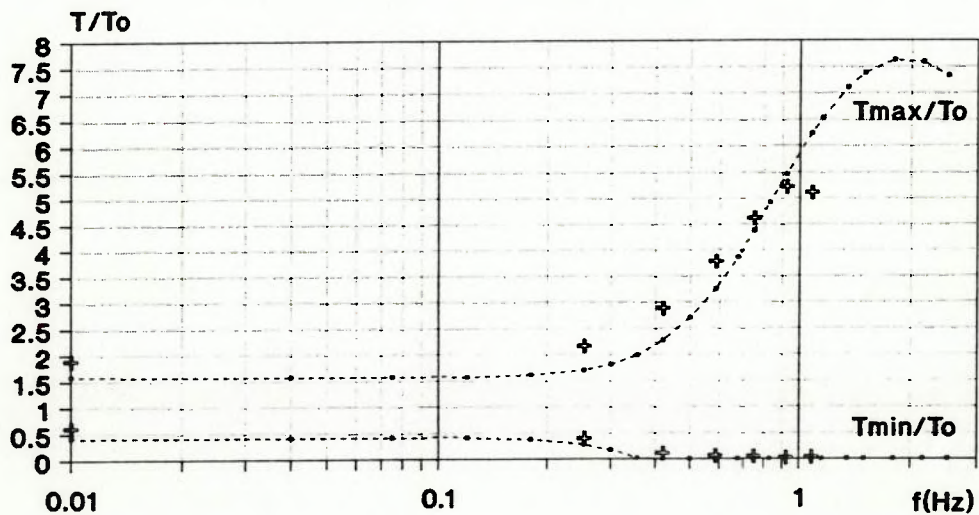
ENSAIO 45 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,520; li=20,296m; A=0,038m



ENSAIO 46 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,520; li=20,296m; A=0,069m

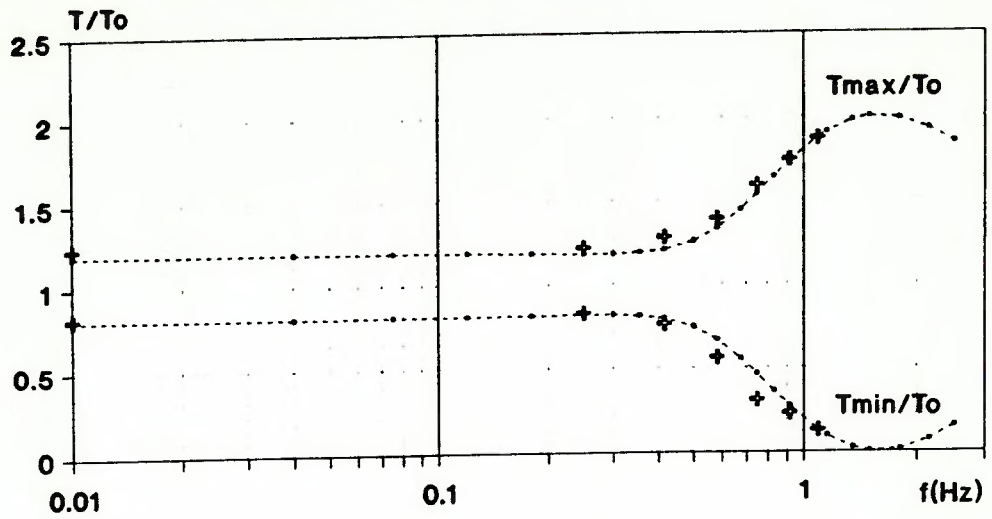


ENSAIO 47 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
 D=0,520; li=20,296m; A=0,117m

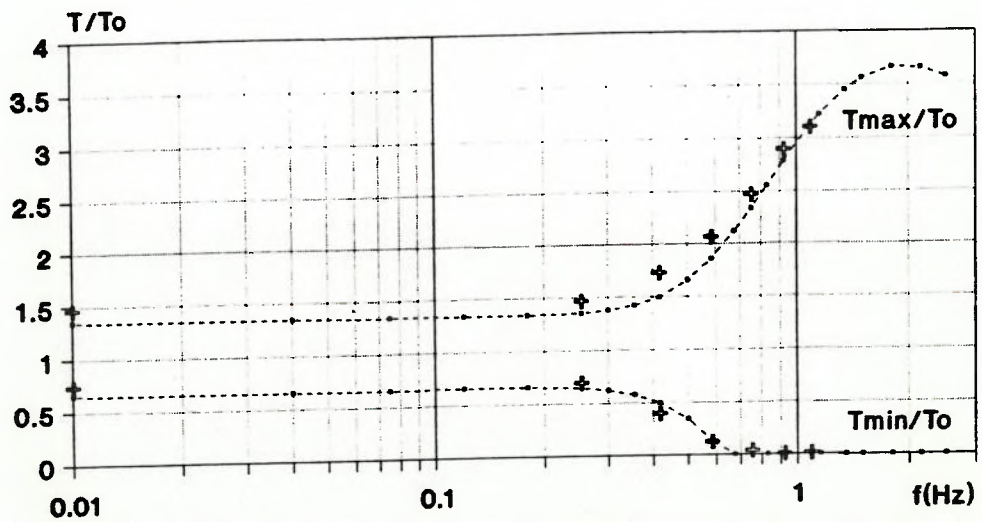


----- Cadillac + Experimental

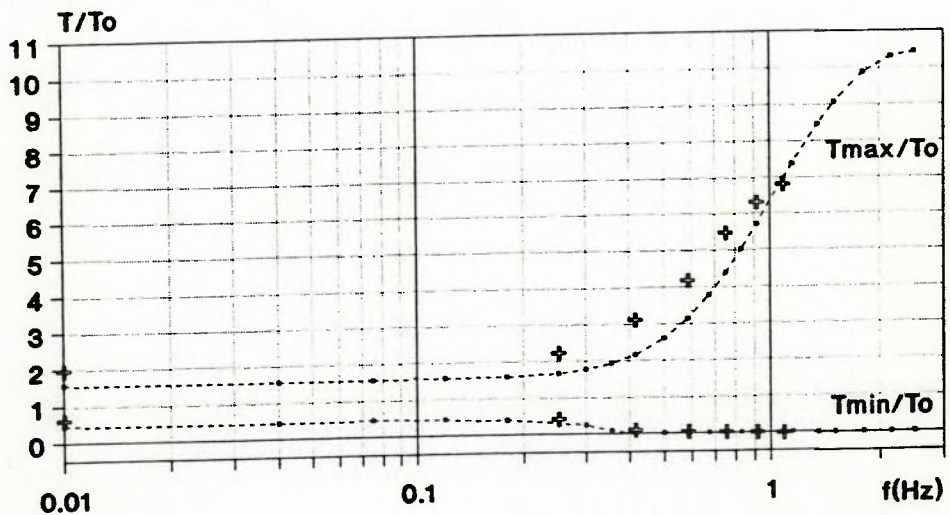
ENSAIO 48 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,330; li=18,278m; A=0,029m



ENSAIO 49 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,390; li=16,260m; A=0,055m

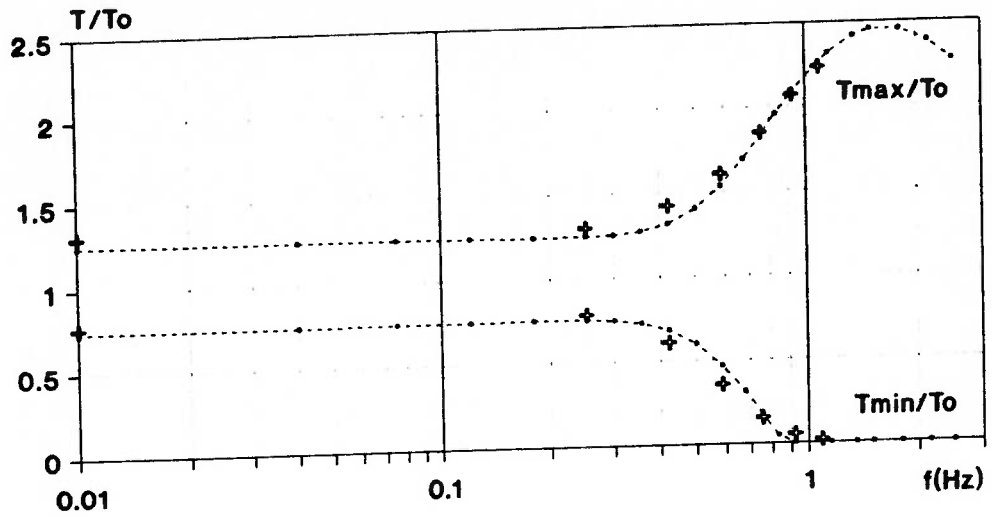


ENSAIO 50 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,519; li=14,241m; A=0,111m

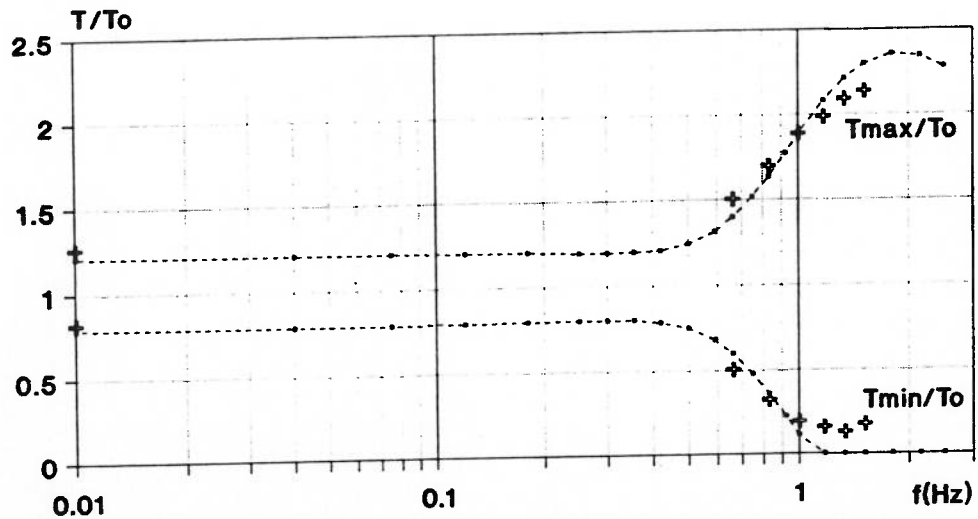


----- Cadillac + Experimental

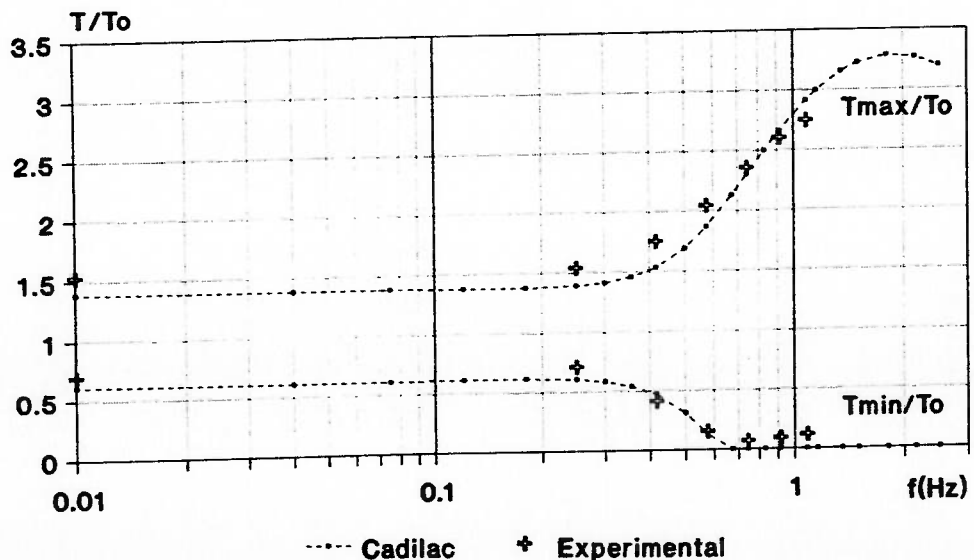
ENSAIO 51 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,368; li=20,296m; A=0,041m



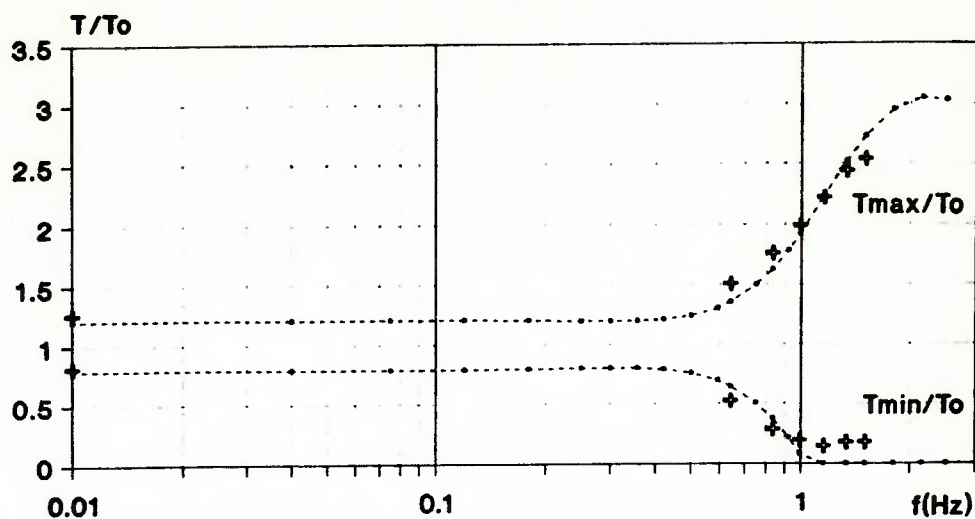
ENSAIO 52 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=14,241m; A=0,027m



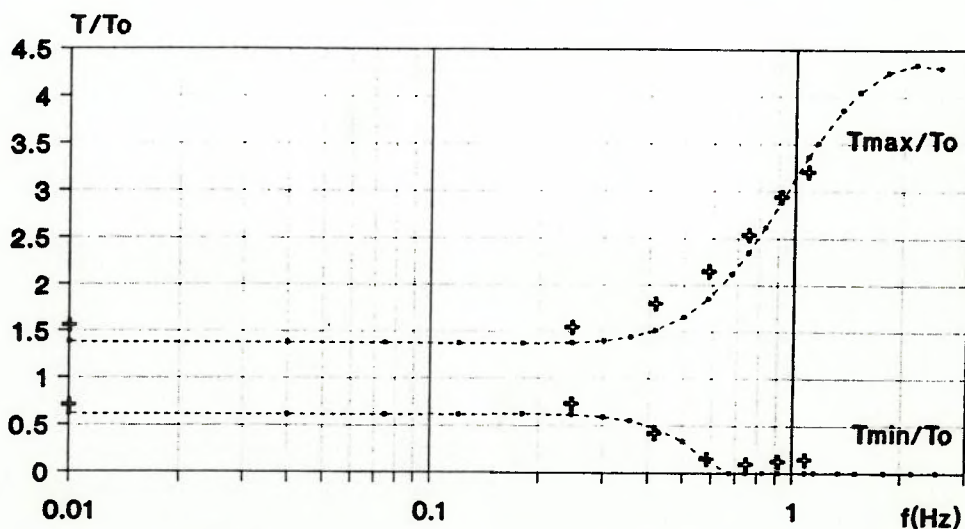
ENSAIO 53 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,329; li=14,241m; A=0,050m



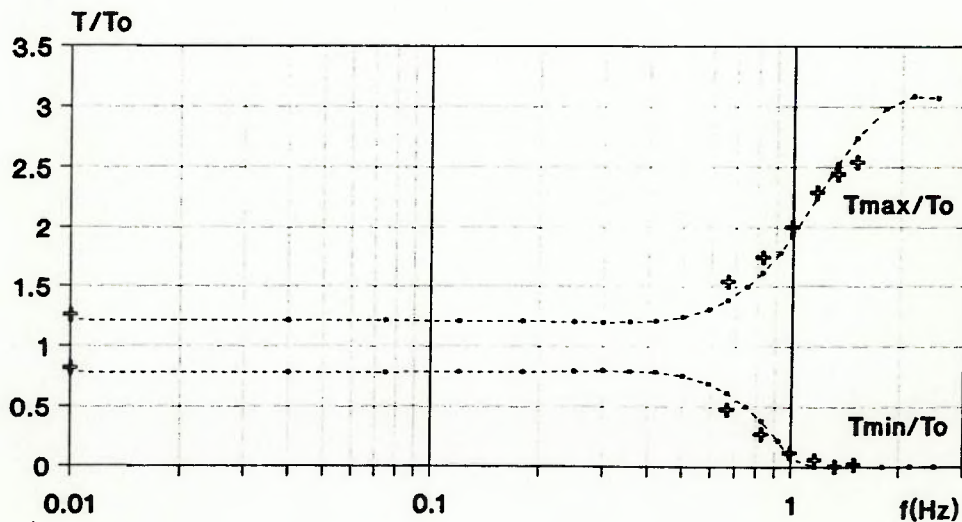
ENSAIO 54 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,390; li=14,241m; A=0,030m



ENSAIO 55 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,390; li=14,241m; A=0,054m

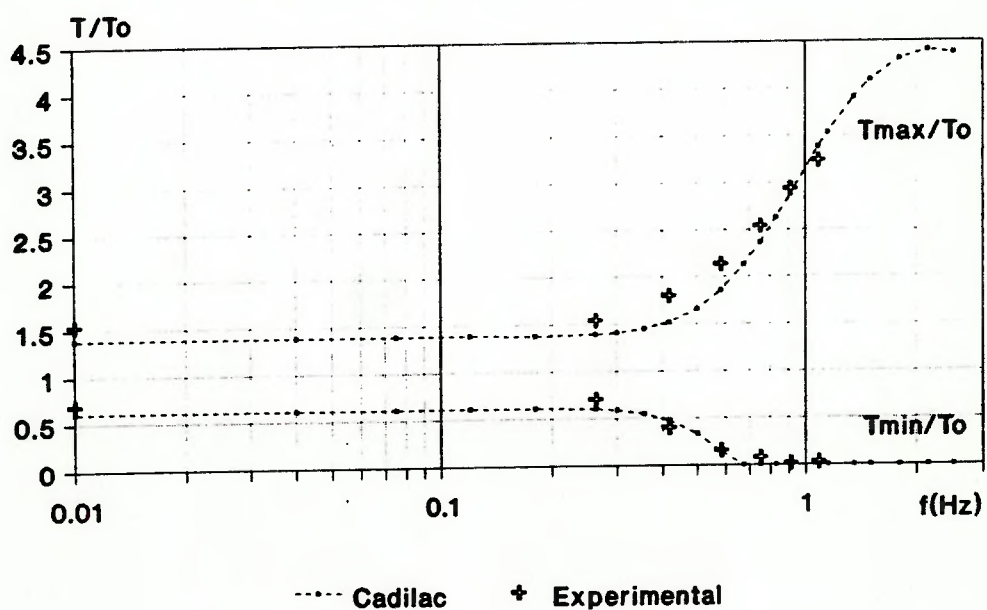


ENSAIO 56 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,390; li=14,241m; A=0,030m

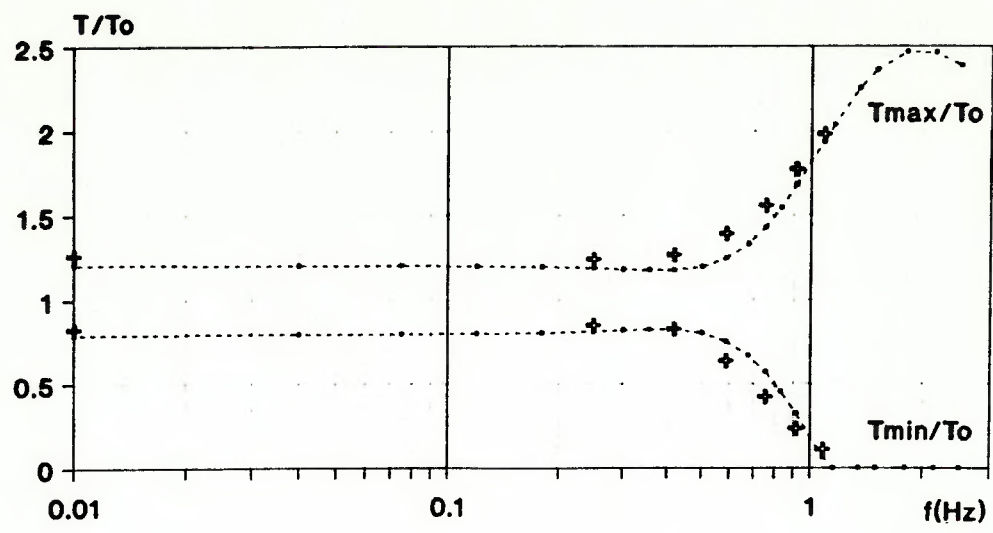


----- Cadillac + Experimental

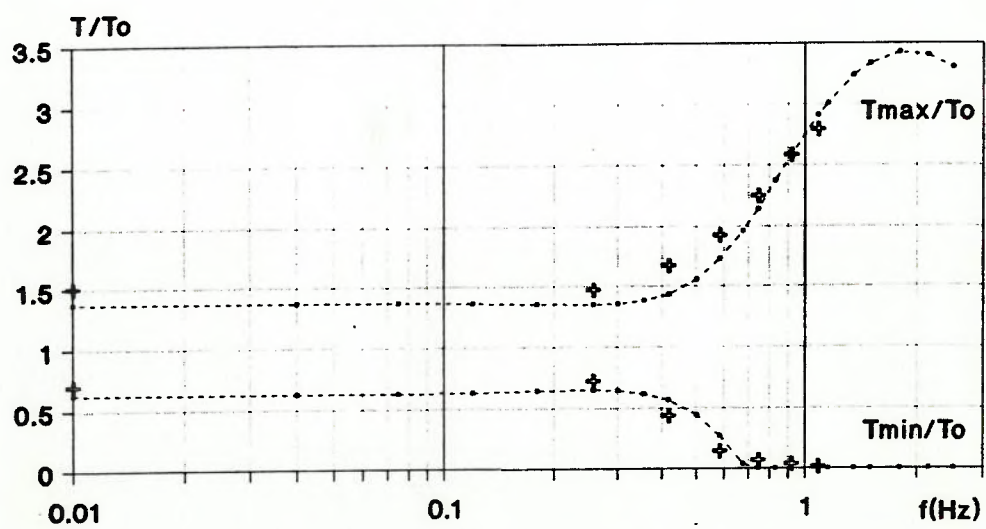
ENSAIO 57 - LINHA 2 - MOVIMENTO CIRCULAR
D=0,390; li=14,241m; A=0,054m



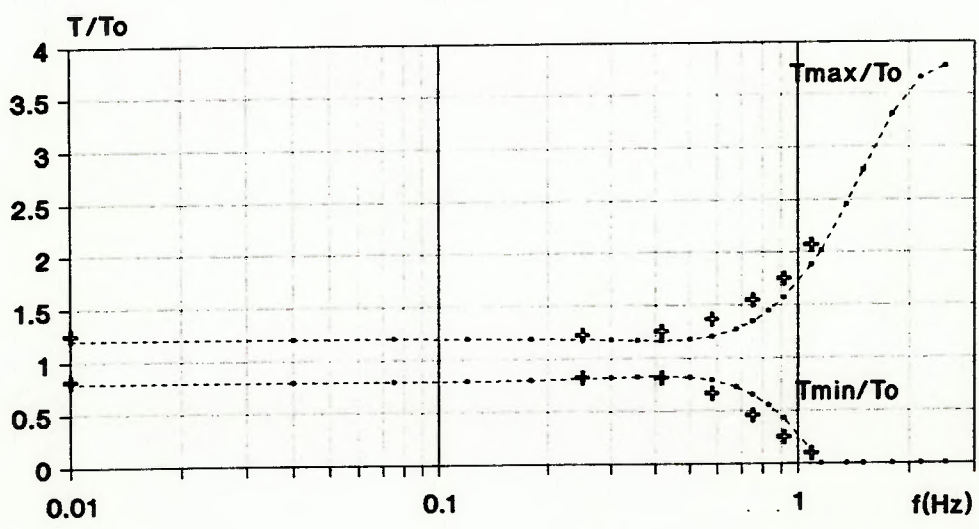
ENSAIO 58-LINHA 2-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,390; li=18,278m; A=0,032m



ENSAIO 59-LINHA 2-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,390; li=18,278m; A=0,058m

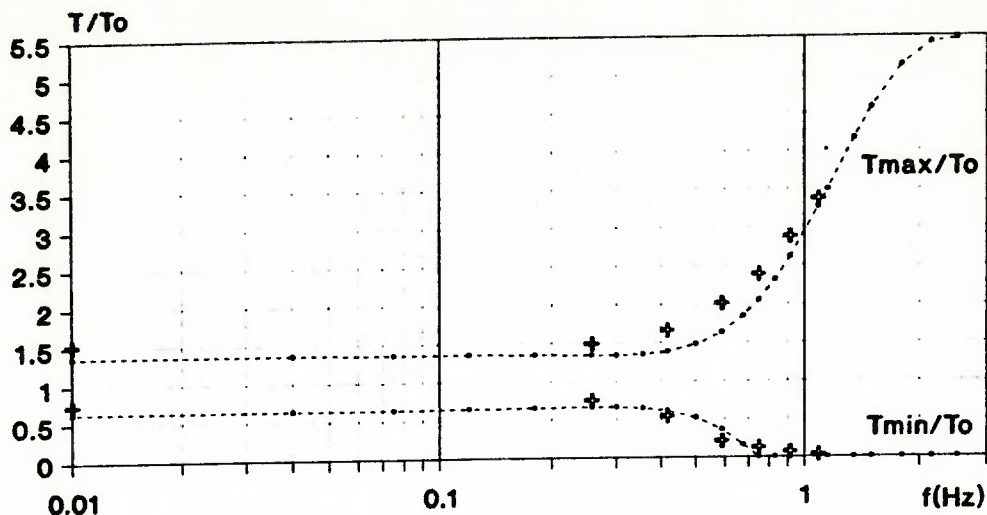


ENSAIO 60-LINHA 2-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,521; li=18,278m; A=0,040m

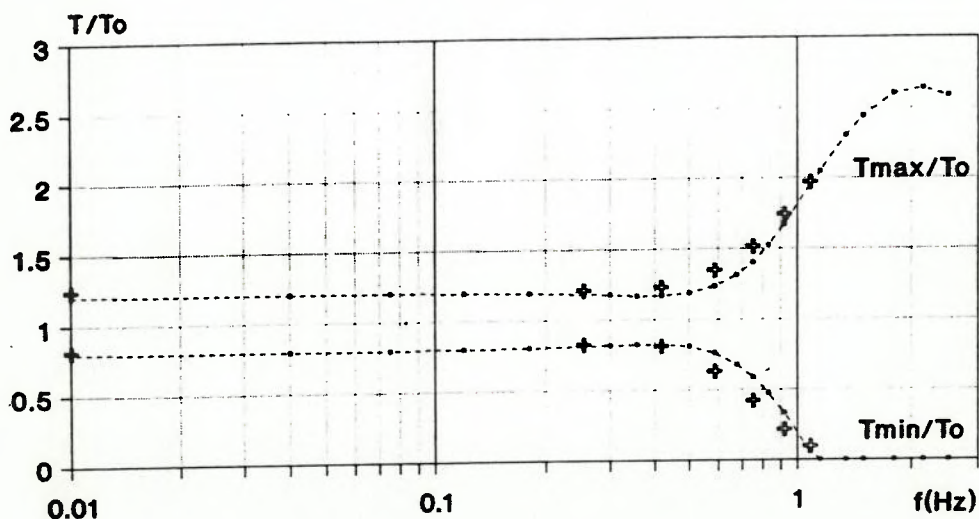


----- Cadillac + Experimental

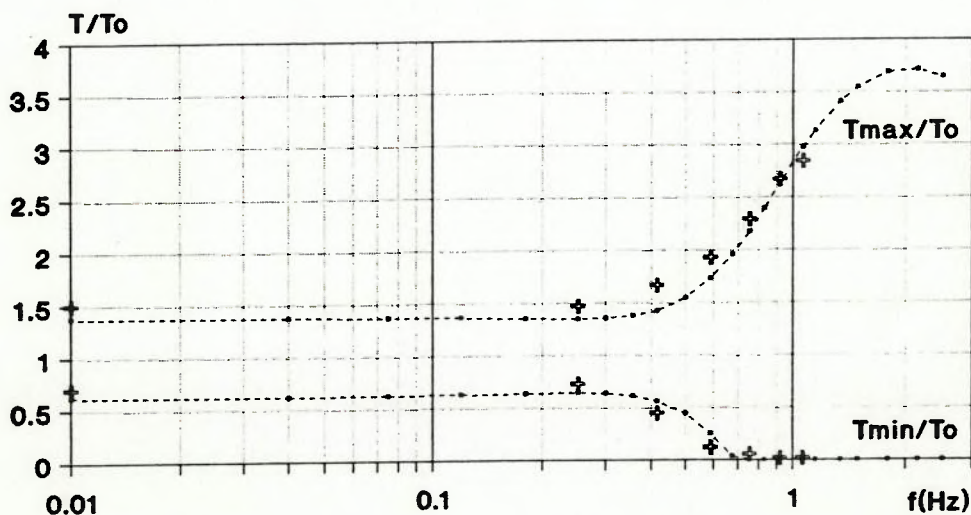
ENSAIO 61-LINHA 2-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,521; li=18,278m; A=0,071m



ENSAIO 62-LINHA 2-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,389; li=16,260m; A=0,031m

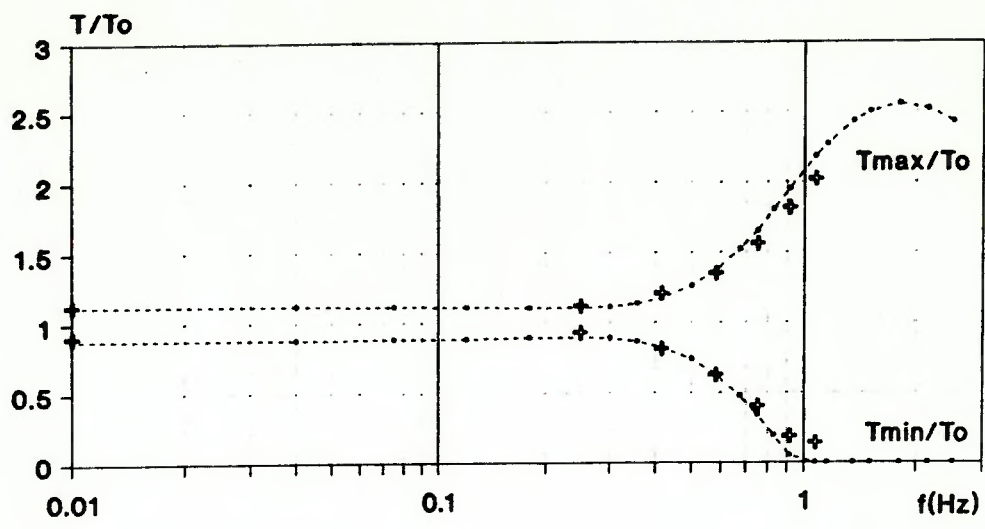


ENSAIO 63-LINHA 2-MOV.LINEAR HORIZONTAL
D=0,389; li=16,260m; A=0,057m

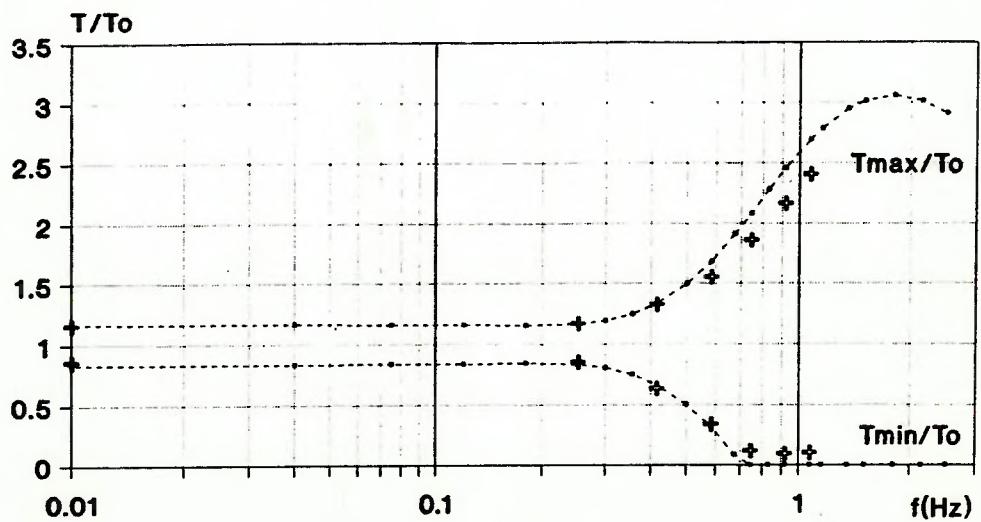


----- Cadillac + Experimental

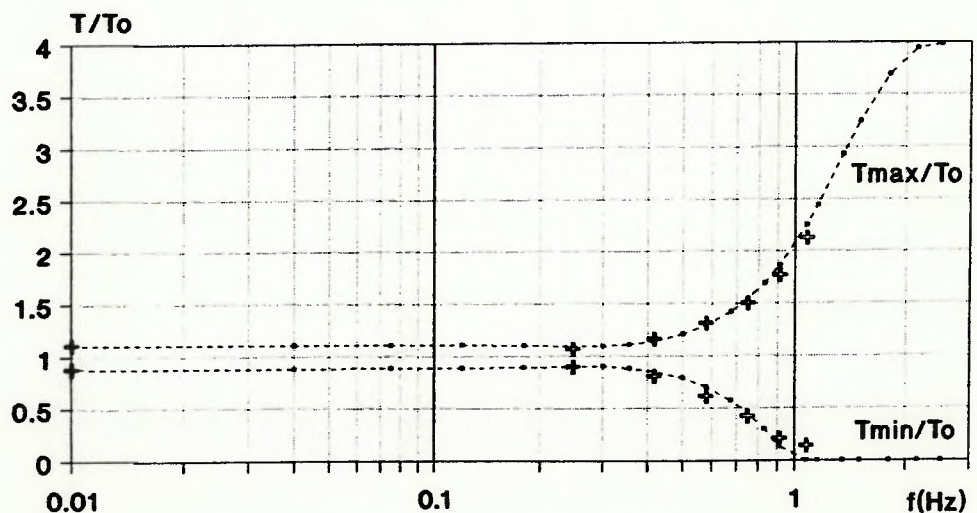
ENSAIO 64-LINHA 2-MOV.LINEAR VERTICAL
D=0,390; li=18,278m; A=0,089m



ENSAIO 65-LINHA 2-MOV.LINEAR VERTICAL
D=0,390; li=18,278m; A=0,125m

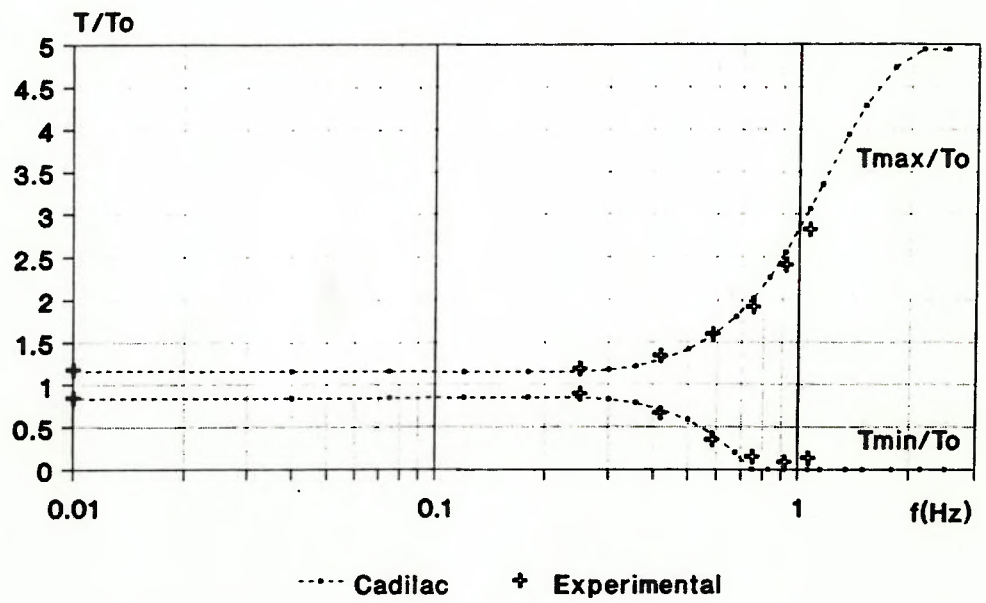


ENSAIO 66-LINHA 2-MOV.LINEAR VERTICAL
D=0,520; li=18,278m; A=0,084m

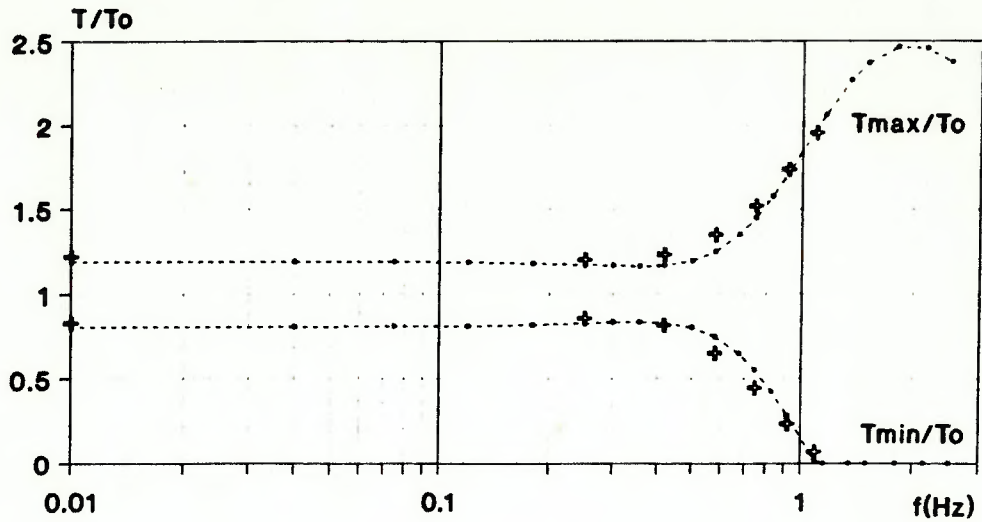


----- Cadillac + Experimental

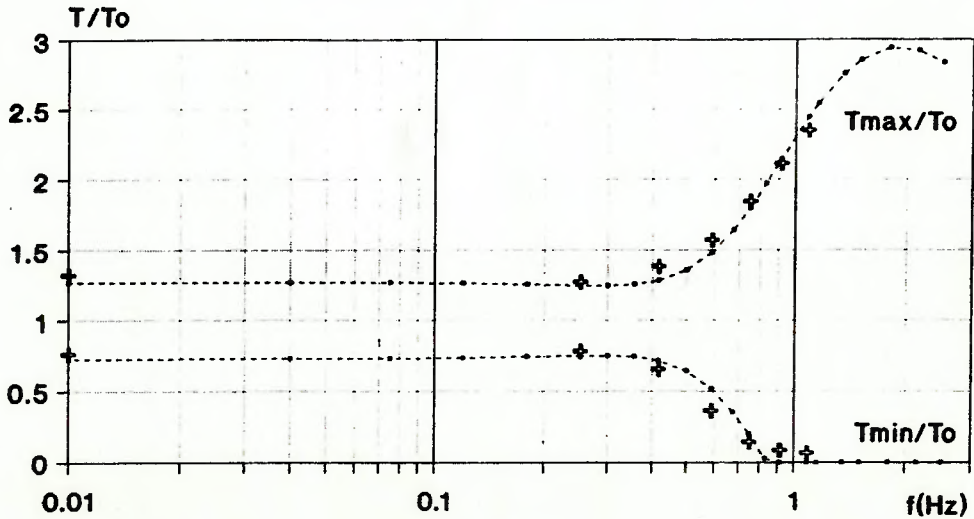
ENSAIO 67-LINHA 2-MOV.LINEAR VERTICAL
 D=0,520; li=18,278m; A=0,118m



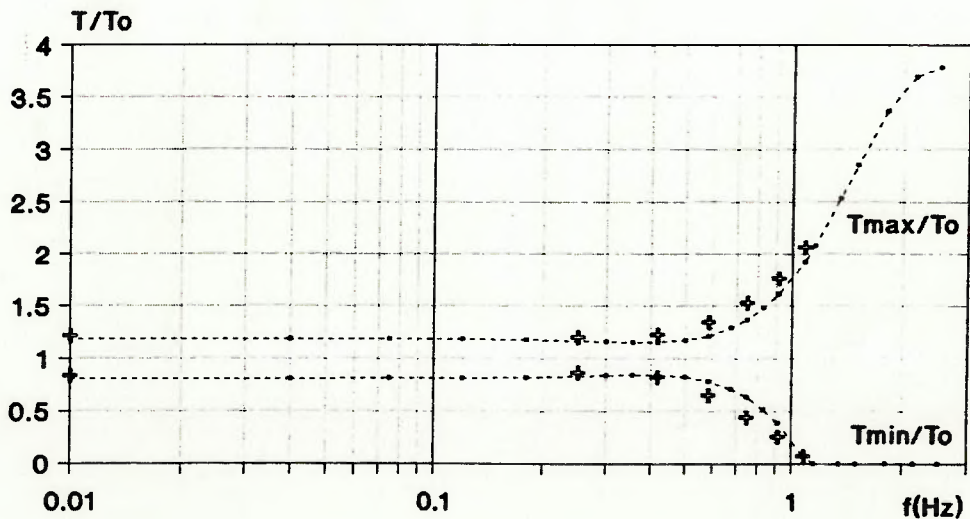
ENSAIO 68-LINHA 2-MOV.LINEAR INCLINADO
 D=0,390; li=18,278m; A=0,030m



ENSAIO 69-LINHA 2-MOV.LINEAR INCLINADO
 D=0,390; li=18,278m; A=0,042m



ENSAIO 70-LINHA 2-MOV.LINEAR INCLINADO
 D=0,520; li=18,278m; A=0,036m



----- Cadilac + Experimental

ENSAIO 71-LINHA 2-MOV.LINEAR INCLINADO
 D=0,520; li=18,278m; A=0,050m

