ALGUNS ASPECTOS DA ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS OFFSHORE

Carlos Eduardo Genatios Sequera

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:

Agustin Juan Ferrante
(Presidente)

Nelson Favilla Ebecken

Edison Prates de Lima

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JULHO DE 1981

GENATIOS,CARLOS EDUARDO SEQUERA

Alguns Aspectos da Análise Dinâmica de Estruturas Offshore.

Rio de Janeiro,1981.

VI,198 p.,29.7 cm(COPPE-UFRJ,M.Sc. Engenharia Civil,1981)

Tese-Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE.

1.Estruturas Offshore I.COPPE-UFRJ II.Título (Série)

Aos meus pais,

Geny e Eduardo

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Agustín Juan Ferrante da COPPE pela orientação dada.

Agradeço também ao Professor Celso Fortoul, da Universidade Central de Venezuela pelo seu apoio.

RESUMO

O presente trabalho se encarrega de realizar a análise dinâmica determinística de estruturas offshore pelos métodos de:

- Resposta em Frequência
- Integração Direta no Tempo

Para isto, o estudo é realizado procurando identificar os problemas básicos, com o intento de fazer simplificações que permitam obter uma maior eficiência computacional.

Foi implementado um programa para a análise da Resposta em Frequência, introduzindo uma série de simplificações cujo efeito foi estudado. Ao mesmo tempo foi desenvolvido outro programa de Integração Direta no Tempo, o qual permite realizar várias comparações.

Utilizando tais programas, foram estudadas uma série de estruturas típicas. Os resultados juntamente com as conclusões correspondentes são apresentadas ao final do trabalho.

ABSTRACT

The present work deals with the Deterministic Dynamic Analysis of Offshore Structures, by the

- Frequency Response Method
- Direct Integration Method

A study was done trying to identify the basic problems in order to make certain simplifications. These produced a better computacional efficiency.

A computational program was developed for the Frequency Response Analysis, it included certain idealizations whose effects were also studied. At the same time a program for the Direct Integration Analysis was also developed in order to compare the results.

Using these programs a group of typical structures were analysed. The results and conclusions are presented at the end.

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO..... 1

1.1 - Surgimento da Indústria Petrolífera Off-Shore..... 1

1.2 - Análises Dinâmicas das Estruturas Off-Shore..... 13

CAPÍTULO II - TEORIA DE ONDAS..... 16

2.1 - Introdução..... 16

2.2 - Evolução Histórica das Teorias de Ondas..... 18

2.3 - Teorias de Ondas Mais Utilizadas na Atualidade..... 27

2.4 - Alguns Desenvolvimentos Teóricos da Teoria Utilizadas (Airy)..... 33

2.4.1 - Problema do Valor de Contorno..... 36

2.4.2 - Solução de Airy..... 39

2.4.2.1 - Linearização do Problema..... 39

2.4.2.1.1 - Expansão da Condição de Impermeabilidade..... 40

2.4.2.1.2 - Expansão da Condição Dinâmica..... 41

2.4.2.1.3 - Expansão da Condição Cinemática..... 42

2.4.2.1.4 - Expansão da Equação de Laplace..... 43

2.4.2.2 - Resolução do Problema Simplificado..... 43

2.4.3 - Fórmulas a Serem utilizadas..... 52

Pág.

CAPÍTULO III - CÁLCULO DAS FORÇAS PELA AÇÃO DO MAR..... 55

3.1 - Introdução..... 55

3.2 - Esquema Utilizado no Cálculo das Forças (Fórmulas de Morison)..... 58

3.2.1 - Fórmula Original de Morison..... 60

3.2.2 - Fórmula de Morison para Cilíndro Flexível..... 64

3.2.3 - Fórmula de Morison para Cilíndros em Qualquer Posição..... 66

3.2.4 - Fórmula de Morison que Engloba Efeitos de Movimentos da Estrutura, para Cilíndros em Qualquer Direção..... 68

3.3 - Linearização dos Termos de Velocidades na Fórmula de Morison..... 68

3.4 - Formas de Implementação da Fórmula de Morison, para as Análises a Serem Realizadas..... 72

3.4.1 - Cargas com Domínio no Tempo..... 72

3.4.2 - Cargas com Domínio na Frequência..... 74

3.5 - Exemplo Comparativo do Efeito da Linearização do Termo de Velocidades..... 82

CAPÍTULO IV - MODELOS DE ANÁLISES..... 86

4.1 - Introdução..... 86

4.2 - Modelo Estrutural..... 87

Pág.

4.2.1 - Rigidez da Estrutura..... 89
4.2.2 - Massa da Estrutura..... 92
4.2.3 - Amortecimento da Estrutura..... 94
4.3 - Resposta em Frequência..... 96
4.3.1 - O Modelo do Mar..... 98
4.3.2 - Determinação das Ações Nodais..... 102
4.3.3 - Montagem da Matriz que Rege o Comportamento do Sistema..... 107
4.3.4 - Resposta da Estrutura..... 110
4.4 - Integração Direta..... 110
4.4.1 - Preparação Inicial do Sistema que Rege o Comportamento da Estrutura..... 112
4.4.2 - O Modelo do Mar..... 115
4.4.3 - Determinação das Ações Nodais..... 118
4.4.4 - Resposta da Estrutura..... 119
4.5 - Efeito da Massa Adicionada..... 120
4.6 - Representação do Solo..... 123
4.6.1 - Modelo de Fundação para as Estruturas de Gravidade..... 124
4.6.2 - Modelo de Fundação por Estacas..... 129

CAPÍTULO V - DESENVOLVIMENTOS COMPUTACIONAIS..... 132

5.1 - Introdução..... 132
5.2 - Análise na Frequência..... 133
5.2.1 - Leitura dos Dados..... 135

Pág.

5.2.2 - Geração das Cargas Devidas as Ondas..... 137
5.2.3 - Montagem da Matriz que Rege o Comportamento Dinâmico da Estrutura..... 141
5.2.4 - Resolução do Sistema de Equações..... 144
5.2.5 - Determinação das Solicitações dos Membros..... 145
5.2.6 - Impressão dos Resultados..... 145
5.3 - A Análise no Tempo..... 146
5.3.1 - Leitura dos Dados..... 148
5.3.2 - Montagem das Matrizes Características do Sistema. 149
5.3.3 - Triangularização da Matriz que Rege o Comportamento do Sistema..... 151
5.3.4 - Introdução das Condições Iniciais..... 151
5.3.5 - Atualização das Variáveis..... 152
5.3.6 - Geração de Cargas de Ondas..... 152
5.3.7 - Resolução do Sistema de Equações..... 156
5.3.8 - Determinação das Solicitações nos Membros..... 156
5.3.9 - Impressão dos Resultados..... 157

CAPÍTULO VI - ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS..... 158

6.1 - Exemplo I: "Caisson"..... 158
6.1.1 - Comparação entre Termo de Velocidades Quadráticos e Linearizado na Forma de Morison..... 162
6.1.2 - Comparação Entre o Método da Resposta em Frequência e de Integração Direta..... 164
6.1.3 - Quantificação do Efeito da Massa Adicionada..... 166

Pág.

6.1.4 - Efeito do Peso da Plataforma no Topo da Estrutura..... 166

6.2 - Exemplo II: Estrutura de Gravidade..... 170

6.3 - Exemplo III - Estrutura de Aço..... 179

CONCLUSÕES..... 186

BIBLIOGRAFIA..... 191

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - SURGIMENTO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA OFF-SHORE

O petróleo, uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, de cor variável entre negro e incolor, está constituído por uma massa de hidrocarburetos e outros compomentes minerais.

A utilização desta substância como fonte energética tem marcado uma época dentro da história do mundo. O petróleo é extraído do subsolo, utilizando diversos recursos e técnicas. Tradicionalmente tem sido tirado de depósitos subterrâneos naturais, situados em terra firme. Numa escala muito menor, o petróleo tem sido também extraído de depósitos situados debaixo do mar. Os primeiros poços de extração colocados no mar, foram construídos no fim do século passado, situados na Costa da Califórnia. Mais tarde, perfurações a pouca profundidade foram realizadas desde uns cinquentas anos, no Golfo do México, costas da Califórnia e Lago de Maracaibo (Venezuela).

A exploração off-shore está sendo realizada atualmente por uns 30 países, os quais tem logrado contribuir em uns 20% da produção mundial de petróleo e uns 10% da produção de gás natural. A exploração em profundidades de mais de 50 metros é bastante recente e apesar de ser muito cara (em comparação

com a produção em terra firme), seu crescimento tem sido vertiginoso nos últimos anos. Os custos de perfuração, instalação e operação são muitos elevados em comparação com as mesmas atividades realizadas em terra firme. As equipes de perfuração utilizadas no Mar do Norte tem valores compreendidos entre 60 e 100 milhões de dolares; também, o custo de operação nas águas relativamente tranquilas do Golfo do México tem uma plataforma fixa, superam o valor de 12 mil dolares diários, enquanto no Mar do Norte, com condições ambientais muito mais severas, o ponto médio oscila entre 40 e 50 mil dolares diários, chegando a alcançar valores de até 75 mil dolares diários. Também, as plataformas de perfuração e produção do Mar do Norte custam entre 200 e 300 milhões de dolares cada uma. No total, a inversão que será necessária para desenvolver um campo off-shore "se estima atualmente de 5 a 10 mil dolares por barril por dia de capacidade máxima de produção, elevando-se a 20 mil dolares, segundo o aumento da profundidade d'água. A maneira de comparação uma inversão de 7 mil dolares por barril é 25 vezes maior que o custo de desenvolvimento no Médio Oriente e de 12 a 15 vezes mais que os campos convencionais em terra na Venezuela" |[53]|.

A realização destas inversões tão grande é possível somente devido a duas razões: a crescente demanda mundial de consumo de petróleo e incremento violento que tem sofrido os preços do petróleo nos últimos 15 anos.

Estas duas razões vão muitas relacionadas entre elas, este trabalho tem intenção de separá-las com o fim de ana

lizá-la numa forma rápida e geral.

O conhecimento da existência do petróleo data de vários séculos antes da Era Cristã. Os Egípcios o utilizavam para embalsamar as mumias, os Chineses e Japoneses com fins medicinais, em Caldea era utilizado como asfalto 1000 anos antes de Cristo, os Árabes e Hebreus o usavam com fins curativos, no Irã é mencionada sua existência pelos historiadores Heródoto e Estabrón, assim mesmo em Rangún (Birmania) era conhecido desde a antiguidade, comentam que os Romanos o obtinha de aflorações naturais na Sicilia e o utilizavam para iluminação e com fins medicinais faz 2000 anos; Marco Polo também o registra em seus diários durante o século XIII, era obtido da zona de Bakú, na margem do Mar Caspio e utilizado com fins medicinais. Na Venezuela era conhecido pelos índios desde muito antes do descobrimento; era obtido de aflorações conhecidas como "menes" e era utilizado para reparar os botes e canoas e com funs medicinais.

Apesar de ser conhecido desde a antiguidade não foi senão nos meados do século XIX (1850) quando começou a ser utilizado como fonte de luz e calor. Alguns fatores retardaram o processo de exploração e utilização do petróleo, entre eles podem citar-se:

- Os importantes avanços tecnológicos que vinham se dando na potência mais importante daqueles dias (Grã-Bretanha), contava com uma fonte abundante e segura de energia como era o carbono (estes avanços dentro de uma sociedade onde as condições

econômicas, sociais e ideológicas eram favoráveis, deram origem a Revolução Industrial).

- O desconhecimento das grandes reservas potenciais de petróleo, que poderiam assegurar o fornecimento do mesmo por muitos anos.

- O consumo de energia era relativamente baixo, por esta razão em alguns casos as demandas eram cobertas por fontes diversas como os aceites animais e vegetais.

- Como fator determinante se pode citar que a maioria dos sítios onde haviam aflorações naturais de petróleo eram zonas muitos afastadas das cidades importante em geral, de acesso quase impossível para os meios de locomoção da época. De ter estado estes minerais mais próximos a cidades como Londres, Paris ou Roma resultaria lógico supor que a indústria petroleira se houvesse desenvolvido com anterioridade |[48]|.

O petróleo começou a ser utilizado como fonte de luz somente a partir dos anos 1860, nos Estados Unidos, logo que Benjamin Silliman, um professor da Universidade de Yale (Conneticut) escreveu um informe o qual continha uma análise sobre as propriedades do petróleo, assim um processo simples por meio do qual o petróleo podia ser destilado e utilizado como fonte de energia. A partir deste instante o petróleo começa progressivamente a ser utilizado como combustível de baixo custo, deslocando outras fontes de energia. A partir de 1900, os Esta-

dos Unidos começaram a aparecer como uma grande potencia mundial, tendo o petróleo como fonte principal de energia. Para esses momentos, tinham desenvolvido uma tecnologia petroleira e paralelamente viam descobrindo maiores depósitos naturais. Estes depósitos estão situados principalmente em países muito pouco desenvolvidos. Também a população do mundo começa a aumentar, alcançando taxas de crescimento alarmantes. Este fator também influiu no aumento das demandas energéticas. Depois da primeira guerra mundial, a economia dos principais países europeus vê-se muito deteriorada, portanto, os Estados Unidos passam a desempenhar um papel de maior importância na economia mundial, enchendo os mercados de produtos cuja fonte de energia a constituia o petróleo. Desta maneira, a demanda de hidrocarbonos vai aumentando, pelo que a produção também aumenta, em base os imensos recursos das nações subdesenvolvidas e em base da exploração inescrupulosa que desses recursos realizavam companhias transnacionais. É muito importante realçar que os Estados Unidos, através de grandes empresas se encarregaram de extrair os recursos das nações produtoras de petróleo, de maneira ilimitada, sem prestar a mais mínima atenção aos interesses desses países e interferindo constantemente em base exclusivamente a sua conveniência, nos processos internos dos mesmos. Nesta repartição também participaram várias nações europeias, as quais melhoraram sua difícil situação econômica na base dos recursos destes países. A maneira de ilustração desta situação, se narra o seguinte acontecimento, sucedido na Venezuela:

"No ano de 1885, o governo da Venezuela entrega uma concessão a uma filial de The New York and Bermúdez Company com sede na Filadelfia, para explorar o imenso lago asfáltico de Guanaco. Na negociação a companhia devia canalizar os rios Colorado e Guarapiche, mas ao não fazê-lo, o governo procedeu a anular a concessão em 1889; ainda assim, a companhia continuou explorando o poço pelos seguintes dez anos, pelo que o governo a demanda; nesse momento uma personagem chamada Matos tenta derrotar o governo, contando para isso com o apoio financeiro do General Asphalt. Neste intento não teve êxito, conseguindo-se posteriormente que esta companhia abandonasse o Lago de Guanaco. Apesar disto, o governo posterior, de Juan V. Gómez, outorga em 1910 e 1912 as imensas concessões a filiais do General Asphalt; a segunda negociação outorgava uma área de 27 milhões de hectares (270 mil km^2) para explorar os recursos petroleiros; esta área corresponde a uma quarta parte da Venezuela; o imposto a pagar era de BS 1 (US$ 0.23) por cada hectar ocupado (10.000 m^2) e de 5% do valor do produto explorado.

O crescimento da demanda mundial de petróleo se viu bastante incrementado durante a segunda guerra mundial, quando o petróleo constituiu a energia que moveu todos os equipamentos bélicos. Depois da guerra o petróleo foi de vital importância para a Europa que se esforçava em reconstruir suas indústrias; este petróleo procedia em especial do Médio Oriente. Dessa maneira, a demanda de hidrocarbonos aumenta continuamente até nossos dias, em especial nas nações da Europa, Japão e Estados Unidos.

Os benefícios obtidos pelos países produtores, pela exploração de seu petróleo desde o final do século passado e durante as primeiras sete décadas do presente, se mantiveram a níveis impresionantemente baixos. Um exemplo disso constituiu um documento oficial, publicado na Venezuela em 1936 pelo Ministério da Agricultura e cria o Congresso Nacional. "Desde julho de 1919 até junho de 1936 o fisco nacional recebeu das companhias petroleiras a soma de 612 milhões de bolívares (150 milhões de dolares), tendo alcançado a exploração no mesmo período a 1.262 milhões de barris, ou seja, 0.48 bolívares por barril (0.12 dolares por barril). Para esses momentos, o preço pro médio do barril foi de US$ 1.37, o qual representa uma quantia de 8.644 milhões de bolívares (2.160 milhões de dolares), ou seja, a parte paga ao fisco representava somente 7%".

De maneira similar, as condições de vida dos trabalhadores petroleiros se caracterizavam por ser muito pobres.

A alta dos preços do petróleo que se tem experimentado nos últimos anos, constitue um fator determinante na economia mundial. Uma série de sucessos vão associados a este processo, entre eles se podem citar:

A primeira e segunda guerras mundiais as quais afetam de forma brusca a distribuição geo-política do mundo, alterando significativamente o poderio econômico, político e béli co das nações o qual repercute no controle que exercem certas potências sobre outros países.

Em 1948 concluiu o mandato britânico na zona da Palestina e em meio a uma situação de violência, se estabeleceu o estado de Israel. Esta situação de violência |[51]| se deve principalmente aos Árabes povoadores do território Palestino, se negaram a aceitar essa partição de seu território no qual se destinava ao estado Árabe 11.000 km^2 (43.1%) e ao estado Judeu 14.500 km^2 (56.9%) apesar que em 1946 a população Árabe era de 1,203,780 (61.0%) e a Judeia 608,230 habitantes (30.8%) |[51]|. Esta complicada situação tem gerado vários confrontamentos bélicos os quais tiveram importantes consequências no mercado petroleiros mundial a partir de 1967.

Em 1951, o poder legislativo do Irã aprovou uma medida nacionalizando a Anglo-Iranian Oil Company. Esta medida foi retirada posteriormente, após um grave conflito no Irã.

No ano de 1956, o governo do Egito nacionaliza o Canal de Suez com o fim de administrá-lo por conta própria. Esta medida foi atacada pela Grã-Bretanha e França, as quais enviaram frotas militares para ocupar o Egito. Ao mesmo tempo, Israel invade o território egipcio, atacando também a Siria e Jordania. Esta agressão teve de ser retirada pela ação imediata da Assembléia Geral das Nações Unidas. Neste conflito, os Árabes começaram a utilizar o petróleo como arma para defender-se das agressões israelitas e para pressionar os países que lhe prestavam ajuda militar.

Em fevereiro de 1959, a Companhia Shell reduz os preços de cotização do petróleo Venezuelano. São aplicadas descontos ainda maiores que os preços do petróleo do Médio Oriente, enquanto que os dos Estados Unidos ficam invariáveis. Em 1960, os preços de cotização dos óleos do Golfo Pérsico, são reduzidos novamente até 10 centavos de dolar por barril.

Em setembro de 1960 funda-se a OPEP (Organização de Países Exportadores de Petróleo), e cujos membros fundadores são Iraque, Irã, Kuwait, Arabia Saudita e Venezuela. Entre seus objetivos básicos se tem a estabilização dos preços do petróleo e dos termos de intercâmbio; a participação ativa e direta dos países membros na propriedade e direção de suas indústrias petroleitas; unificação das políticas petroleiras e determinação de meios para salvaguardar seus interesses individuais e coletivamente. Em junho de 1962, se decide restaurar os preços de cotização que haviam sido diminuídos a partir de fevereiro de 1959. Na atualidade, a OPEP tem 13 membros sendo os restantes a Argentina, Equador, Emiratos, Arabes Unidos, Gabão, Nigéria, Libia, Indonésia e Qatar.

Em junho de 1967, Israel ataca Egito e a Siria, invadindo a Viega Cidade de Jerusalém, a Franja de Gaza, o deserto de Senai e a região de Golan. Esta invasão se conhece como a "Guerra dos Seis Dias". Como consequência desta invasão, em outubro de 1973, os exércitos egipcios cruzam o Canal de Suez e atacam as forças israelitas. Dez dias mais tarde, os países árabes produtores de petróleo, decidem reduzir os níveis de

produção e suspender todas as exportações petroleiras aos Estados Unidos e Holanda pelo apoio que estes países viam dando a Israel [49, 51]. A raíz destes acontecimentos pos-se em evidência a forte dependência dos países do Ocidente e Japão com respeito ao petróleo Árabe.

No ano de 1970, o governo da Libia solicita um aumento de 44 centavos de dolares por barril nos preços cotizados do petróleo Libio. Estas pretensões tiveram que ser satisfeitas, e quase de imediato, os demais países da OPEP procederam a aumentar suas demandas de preços. Para junho de 1971 o preço do escudo Árabe Liviano, utilizado como óleo de referência da OPEP subia de 1.80 a 2.18 dolares por barril. Em outubro de 1970, a Libia incrementa o preço cotado de seu petróleo a 3.45 dolares por barril e em janeiro de 1972 o preço cotado do óleo Árabe Liviano sobe a 2.90 dolares por barril. Em outubro de 1972, os países árabes assinam um acordo com as companhias no qual se fixam uma participação de 25% das ações das companhias operantes nestes países. Em setembro de 1973, o governo da Libia nacionaliza a 51% dos ativos de todas as companhias operantes nesse país. Para esses momentos, a inflação golpea a economia mundial, logo do conflito Árabe-Israel de 1973, em outubro desse mesmo ano, os membros da OPEP aumentam o valor do óleo a 5.12 dolares por barril, a partir de 1º de janeiro de 1974, o óleo sofria um novo aumento de 11.65 dólares por barril. Este preço foi estabelecido em base ao custo mínimo de outras fontes alternativas de energia, tais como a gasificação de carbono e o petróleo de esquistos. Em janeiro de 1974 a OPEP envia um comu-

nicado aos países industrializados com o fim de que estes tomassem as medidas necessárias para controlar a forma como as companhias petroleiras vinham incrementando os preços dos produtos refinados.

Os preços variavam continuamente, ao mesmo tempo, uma série de medidas tem sido tomadas com o fim de diminuir os preços do óleo a nível de país comprador e aumentar as ganancias dos países produtores. Apesar de tudo isto, o petróleo tem alcançado valores de cerca de 40 dolares por barril, os altos preços alcançados pelo petróleo atualmente, permitem a exploração de jazidas que a alguns anos se consideravam muito caros.

Tôda esta situação impulsa que se desenvolva cada vez mais a indústria off-shore. Seus objetivos primordiais são dois:

- o aumento das reservas mundiais de petróleo;

- constituir uma nova fonte de exploração e aproveitamento dos imensos recursos petroleiros situados debaixo das águas marinhas.

Para Venezuela, atualmente é ó sexto país produtor de petróleo (2.165 milhões de barris diários) a indústria off-shore é de vital importância. Neste país, a exploração em águas marinhas se vem realizando desde 1923 no interior do Lago de Maracaibo;no começo os poços eram perfurados desde platafor-

mas com profundidade de aproximadamente um metro; pouco a pouco, se foi perfurando em águas de maior profundidade em toda a região do lago, onde as condições ambientais são bastante tranquilas em comparação com as do Golfo do México ou Mar do Norte. Também se tem produzido petróleo por meio de plataformas situadas no Golfo da Paria e Golfo de Venezuela. Na atualidade, a atividade off-shore no país tem concentrado seus esforços em fazer uma avaliação dos recursos petrolíferos situados na plataforma Continental do país, com o fim de aumentar as reservas e elaborar uma política coerente para a futura exploração desses recursos. Desde muitos anos a Venezuela tem tido um desafio de desenvolver uma tecnologia que o permita explorar os recursos segundo sua própria conveniência. Este desafio não tem sido superado, todavia se mantem, sendo extensivo as necessidades da exploração off-shore. Uma das medidas necessárias que devem ser tomadas com o fim de superar esse desafio e a de promover a realização de trabalhos de investigações, os quais dentro de um marco organizativo bem estruturado e coerente com as necessidades do país, constituiram uma base indispensável (não suficiente) para lograr o desenvolvimento tecnológico. É importante ressaltar que estas investigações devem ser realizadas em estreita relação com as atividades de investigação desenvolvidas em outros países, a maneira de intercâmbio sem perder de vista o marco que caracteriza a atividade nacional.

1.2 - ANÁLISES DINÂMICAS DAS ESTRUTURAS OFF-SHORE

A medida que as demandas petroleiras mundiais tem aumentado, tem sido necessária a procura e exploração de petróleo a maiores profundidades a qual, desde o ponto de vista da engenharia estrutural, repercute diretamente nas dimensões das torres, impondo-se uma série de exigências que fazem necessárias uma rigorosa análise estrutural. Também, as estruturas se tornam cada vez mais flexíveis, isto a sua vez produz um aumento nos períodos naturais de vibração das estruturas. Ao aumentar os períodos naturais de vibração, estes se acercam aos períodos de ação dinâmica das cargas, a qual se traduz em efeitos de amplificação dinâmica na resposta da estrutura (que significa um aumento das forças internas).

Ademais os efeitos de amplificação dinâmica, existem outros problemas a serem analisados levando em conta o comportamento dinâmico, como podem ser a fadiga e as grandes oscilações da plataforma no topo da estrutura. Estudos sobre a fadiga permitem ter estimações em quanto a vida útil das estruturas, enquanto que das oscilações do topo da mesma, depende do que se podem realizar os trabalhos de operação para as que foi concebida da estrutura.

As cargas dinâmicas devidas as ondas pelo som em geral as de maior importância,devido principalmente a que produzem grandes esforços na estrutura,e porque ocorrem de maneira repetitiva e constante sendo um fator determinante para dis

tintos efeitos como por exemplo a fadiga [13].

Para analisar o problema do comportamento dinâmico de uma estrutura, existem grandes quantidades de métodos disponíveis na literatura, assim como estudos relacionados com a melhor utilização de cada um deles. Neste trabalho, se enfoca o problema dinâmico sob dois pontos de vista distintos, que por sua vez implicam dois métodos de formulação e resolução diferentes. O primeiro é um método com domínio no tempo e o segundo com domínio na frequência. Ambos esquemas se baseiam em certas hipóteses comuns e em certas considerações particulares. Tem também algumas diferenças nas formulações que traduzem o efeito de sucessão de ondas em cargas sobre a estrutura, e posteriormente, implicam também diferenças nos métodos de análise para a resolução dos sistemas e logo para a determinação das forças sobre a estrutura.

Para a descrição do comportamento do mar foi escolhida a teoria de Airy.

As razões destas escolhas são apresentadas no Capítulo II. Nesse capítulo, se apresenta também a maneira de informação, um resumo das formulações e soluções analíticas da teoria de Airy. Posteriormente, no Capítulo III é feita uma análise detalhada da fórmula de Morison, utilizada para a determinação das forças na estrutura. É também apresentado o efeito da linearização da fórmula de Morison, condição indispensável

para a realização de análise em frequência. No Capítulo IV são apresentados os modelos escolhidos, dando ênfase ao modelo estrutural selecionado e nos métodos de análise. Sem estar dentro dos objetivos fundamentais deste trabalho, são contemplados dentro do modelo, os efeitos da interação solo-estrutura e massa adicionada.

No Capítulo V são apresentados em forma detalhada os elementos que constituem os programas computacionais desenvolvidos para a realização do trabalho. Estes programas permitem avaliar os métodos realizando comparações entre os mesmos.

No Capítulo VI são apresentados três exemplos ilustrativos, os quais permitem comparar os resultados obtidos seguindo os dois métodos; também são apresentados para avaliar os efeitos das considerações de massa adicionada, comportamento do solo, etc., na resposta das estruturas.

Posteriormente são elaboradas as conclusões e recomendações, derivadas do estudo realizado dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO II

TEORIA DE ONDAS

2.1 - INTRODUÇÃO

Se em um dado momento se tomasse uma fotografia do mar, logo ao ser observada pareceria como se a superfície do mar fosse um conjunto desordenado de cristas que se seguem umas as outras, com tamanhos e separações muito variadas entre si.

Assim se o mar, a primeira vista carece de qualquer ordem, porém a medida que se observa, começam a aparecer certos efeitos periódicos. Assim, baseado nas observações, o homem tem ido desenrolando algumas idéias que progressivamente darão origem as teorias de ondas que conhecemos. Uma dessas observações que mais tarde passa a ser uma simplificação na generalidade das teorias de ondas é o fator que a maioria das ondas têm cristas de longitudes indefinidas. Este fator, permite modelar o movimento das ondas bidimensionalmente, e ao mesmo tempo, serve para ter uma primeira classificação:

- ondas de cristas compridas
- ondas de cristas curtas

As ondas de cristas compridas, são as que acaba-

mos de descrever, aquelas que ao ser seccionadas por planos perpendiculares a sua direção de propagação da crista apresentam perfís idênticos (Figura 2.1).

As ondas de cristas curtas, são aquelas que necessitam de um modelo tridimensional para simular seu comportamento e por isso aparecem complicações adicionais para desenvolver suas teorias (Figura 2.2).

Neste Capítulo, apresentam-se as maneiras distintas como os estudiosos de hidrodinâmica, através da história, entenderam e modelaram os movimentos das ondas. Posteriormente, é abordado o problema como comumente na atualidade, e por último, são apresentados alguns desenvolvimentos teóricos da teoria de ondas que foram escolhidas para a realização deste trabalho.

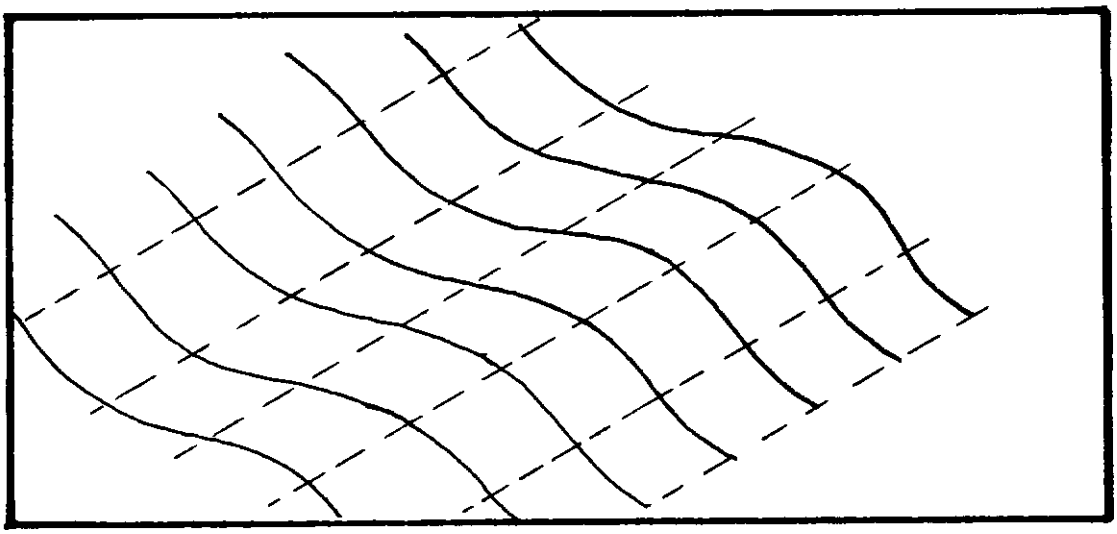


Fig. 2.1

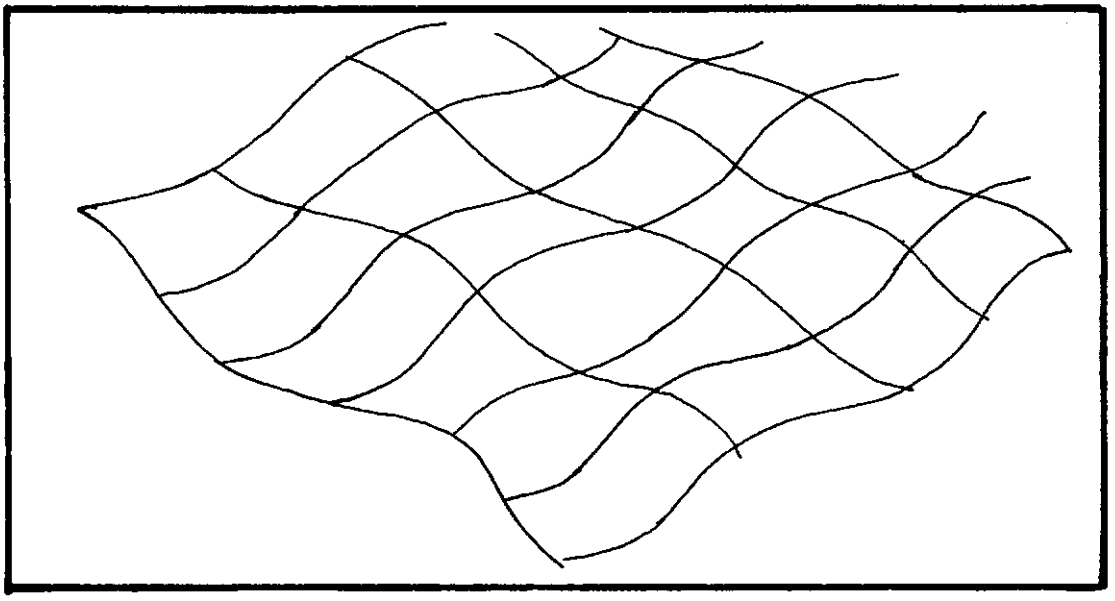


Fig. 2.2

2.2 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS TEORIAS DE ONDAS

O mar, através da histórica tem sido colecionador das curiosidades dos homens, que desde os tempos memoriáveis, dedicam sua atenção, seus estudos e em muito casos suas adorações. Do ponto de vista da engenharia, a navegação é uma das primeiras formas dos homens se relacionarem com a água. E assim como chegam até nossos dias sinais da presença da navegação desde as mais antigas civilizações, onde era utilizada para fins comerciais, de transportes e explorações. A constante que é o mar e a curiosidade dos homens por ele, tem originado como consequência diversas teorias para explicar o comportamento do mesmo. A dificuldade para transmitir os conhecimentos por via escrita antes da invenção da imprensa, obstrue a revisão através da história de um ponto particular como os estudos das teorias de ondas.

No decorrer do século XV, três sucessos importantes mudaram o rumo da ciência, depois de um largo período de letargo e de funesta influência religiosa, determinada pela idade média no mundo ocidental. Um desses sucessos foi precisamente a invenção da imprensa pelos europeus, o que permitiu maior divulgação dos acúmulos de conhecimentos que a partir deste momento começaram a crescer de novo. Outro fator foi a caida de Constantinopla, o que diminui a influência da igreja e acelerou um processo de intercâmbio de informações pela imigração dos estudiosos cristães para o Oeste da Europa. O terceiro fator foi o descobrimento da América, o que estimulou o interesse crescente por todo o mundo físico.

Estes fatores foram determinantes na troca de mentalidade que se vem gerando gradualmente no homem, o qual começa a buscar a causa e a razão das coisas nelas mesmas e os processos que as envolvem e não como a ação de fontes "divinas", aproximando-se um pouco mais a uma concessão materialista do universo, concessão esta que ficou diminuida logo da decadência da cultura grega. Assim, a ciência vai dando maior importância a observação como etapa fundamental do método científico e vai tirando importância a outras formas como a indução.

No mesmo período apareceu Leonardo da Vinci (1452-1519), que se caracterizou por haver excursionado em vários campos do saber como a anatomia, botânica, geologia, mecâ

nica, pintura, desenho, escultura, arquitetura e engenharia.Neste último campo, ele é tido como um dos iniciadores da aeronáutica, chegando também a realizar reflexões a cerca do movimento das ondas. Ao que refere-se neste ponto, chegou a escrever: |[5]|

"A velocidade da propagação das ondas (superficiais) sempre excede consideravelmente a que a água possue, porque a mesma geralmente não muda de posição; resultando como o trigo no campo, que apesar de permanecer fixo no solo, consegue baixo ação do vento, a forma de ondas que viajam através do campo".

Em geral, muitas das personalidades que dedicaram-se ao estudo das matemáticas também se extenderam ao campo da hidráulica, chegando alguns a reflexionar sobre o movimento das águas, mas somente depois do aparecimento do grande Isaac Newton (1642-1727) quando o problema das ondas, foi abordado de uma forma mais profunda. Newton foi o primeiro a anunciar uma teoria harmônica, ou seja, de movimento oscilatório para as ondas, enfoque sobre o qual basearam-se posteriormente as teorias lineares como a de Airy.

Newton comentou: |[5]|

"Se a água ascende e descende num canal e se constroí um pêndulo cuja distância entre os pontos de suspensão e o centro das oscilações é igual a metade da longitude (da onda) da água do canal: eu digo que a água ascenderá e descen-

derá ao mesmo tempo em que o pêndulo oscila".

Também deduzo que a velocidade das ondas da superfície da água, variam proporcionalmente a raíz quadrada da longitude das ondas. A respeito, Newton fez as seguintes observações: |[5]|

"Isso será verdadeiro se basearmos na suposição de que as partículas da água sobem e descem em uma linha reta, porque na realidade esta subida e descida se realizam ao redor de uma circunsferência, portanto um valor aproximado é dado ao tempo médio."

Os extensos estudos realizados por Newton foram uma grande contribuição para a ciência. Em tal momento da história e graças aos trabalhos de Copérnico, Galileu, Kepler e Newton (entre outros) o processo científico ficou mais fortalecido como a origem da apreciação da realidade, pelos homens. Este processo baseia-se na percepção (parte experimental) que apreende superficial e isoladamente os fenômenos e coisas, e logo passa a etapa de razoamento, que baseado no pensamento lógico permite captar a essência e as relações internas dos fenômenos. Surge assim o que conhecemos hoje em dia como as Ciências Naturais e em especial, como produto de trabalhos dos estudiosos antes citados, surge a física, a mecânica e a dinâmica.

O seguinte pesquisador que realizou estudos detalhados sobre o movimento das ondas, foi o matemático Joseph Lagrange (1736-1813), quem introduziu a função potencial Φ e a função de corrente ψ para o estudo do movimento dos fluídos. No que diz respeito a sucessão de ondas, Lagrange estudou o movimento de uma onda solitária de altura infinitesimal, em um canal de profundidade finita, seu nome todavia está associado a velocidade de propagação dessa onda:

$$V = \sqrt{g\ Y}$$

Enuncia também Lagrange: |[5]|

"A velocidade de propagação da onda será a mesma que se obterá de um peso que cai de uma altura igual a metade da profundidade da água em um canal".

O homem responsável pelo uso inicial destas teorias das ondas é Franz Von Gerstner (1756-1832), um engenheiro hidráulico, nascido em Komotau, Bohemia foi quem alcançou uma "considerável reputação pelo trabalho realizado. Gerstner publicou em 1804 uma obra, sobre os estudos do movimento das ondas. Sua formulação fundamentava o movimento da água em os efeitos dc inércia, pressão interna e peso do fluído. A base de sua teoria foi supor que existem debaixo da superfície livre, uma série contínua de linhas de pressão constante, as quais também indicam a direção do movimento em cada ponto. Estas linhas formam um perfil plano da amplitude relativa do movimento de cada

partícula. A solução apresentada por Gerstner buscava a avaliação hidrodinâmica da forma destes perfís, do movimento das partículas do fluído e da velocidade de propagação. Estes perfís demonstraram ser toroides fortes com ciclóides no limite. As órbitas das partículas eram circulares, diminuindo seu diâmetro com a profundidade e as velocidades de propagação eram da forma

$$V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

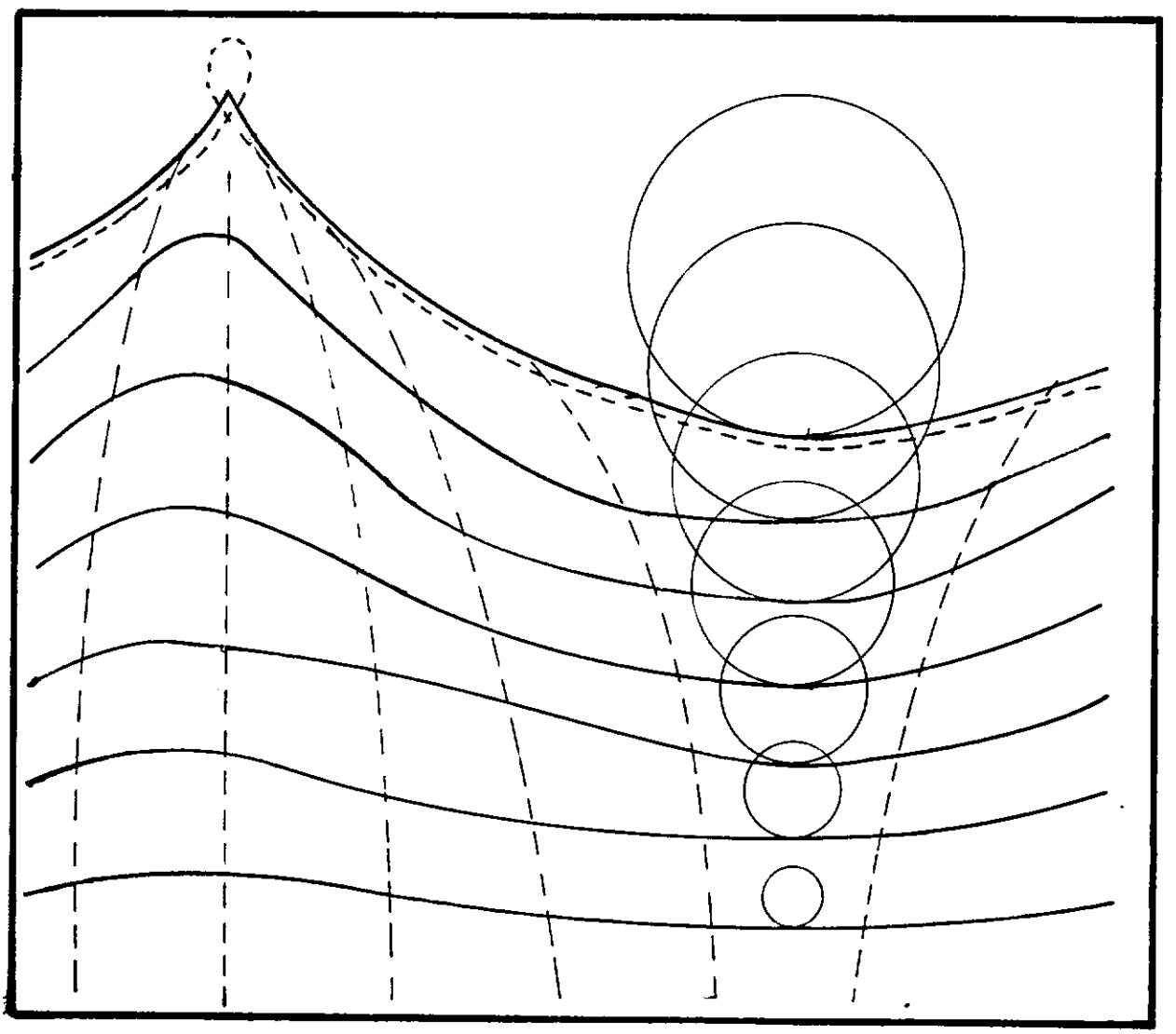


Fig. 2.3 - Solução de Gerstner

A solução de Gerstner não corresponde ao caso de um fluxo irrotacional, em seu lugar, foi utilizado um modelo de fluxo rotacional, o qual não podia ser desenvolvido a partir de um estado de repouso. Esta é a crítica fundamental que tem sido feita contra a teoria de Gerstner. Apesar deste fator, a solução cumpre rigorosamente as equações do problema formulado, sendo também uma aproximação muito parecida com a realidade.

No ano de 1825 foi publicado em Leipzig um trabalho sobre experimentos com sucessivas ondas, tal publicação foi feita pelos irmãos Ernst H. e Wilhelm E. Weber (1795-1878 e 1804-1891, respectivamente), e contêm uma recopilação detalhada de todo o escrito acerca das ondas até essa época e um amplo conjunto de observações ao respeito, realizadas pelos autores. Nos experimentos foram estudados fenômenos como a reflexão, interferência e movimento orbital das ondas. Estas análises não conduzem a resultados concretos, devido especialmente a falta de experiência e de correlação com a teoria existente, todavia quando foram especialmente detalhadas.

Um dos trabalhos mais extensos sobre sucessão de ondas da época, foi realizado por George Biddle Airy(1801-1892) inglês que teve destacado trabalho como astronomo e quem se dedicou ao ensino da matemática em Cambridge. Airy realizou estudos não somente em astronomia, assim em várias áreas da física e da matemáttica relacionadas com a primeira. Por exemplo,determina a variação da densidade da terra e da constante gravidade g com a altura,utilizando um péndulo,investigou também os efeitos

do sol e da lua nas marés terrestres. Logo, em seu artigo "Mares e Ondas" publicado na Enciclopédia Metropolitana em 1845, formula sua teoria de ondas de uso muito generalizada na atualidade. Neste artigo há uma revisão crítica aos trabalhos teóricos realizados por Newton, Bernoulli, Laplace, Lagrange e Cauchy e os trabalhos experimentais dos irmãos Weber e de Russell e logo construiu uma formulação hidrodinâmica que modela a mecânica das ondas de pequena amplitude em águas profundas e rasas, submetidas a distintas condições de contorno. Se deve a Airy a fórmula elementar

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi Y}{\lambda}}$$

onde Y é a profundidade da água e λ a amplitude da onda.

Contemporâneo com Airy temos a George Gabriel Stokes (1819-1903) quem nasceu na Irlanda e foi educado em Cambridge. Stokes permaneceu na Inglaterra, onde realizou inúmeros trabalhos no campo da física teórica, seus artigos e publicações versam sobre variadas especialidades, dando ênfase no campo de hidrodinâmica, chegando também a publicar sobre movimentos de ondas. Escreveu um trabalho intitulado "Sobre a Teoria das Ondas Oscilatórias", onde reformula a teoria de Gerstner, baseando-se desta vez em um esquema de fluxo irracional e utilizando uma função potencial de velocidade que permite uma formulação não-linear e modela de forma bastante apropriada o movimento das ondas para águas profundas. Inclue também este trabalho um

estudo acerca de ondas na interface de fluídos de densidade ligeiramente distintas.

Outro estudioso cuja influência chega ao campo das ondas foi o Francês Joseph Boussinesq (1842-1929) quem também realizou extensos trabalhos nos campos da elasticidade, mecânica dos solos, termodinâmica, hidrodinâmica e hidráulica, baseado em estudos matemáticos rigorosos. Apresentou na Academia das Ciências, em 1872 (na França) um trabalho de 700 páginas intitulado "Ensaio Sobre as Teorias das Águas em Movimento" o qual fica como um trabalho sobressalente na literatura de hidráulica. Esta extensa obra trata principalmente do fluxo em tubos e canais abertos. Na terceira seção do livro, trata em detalhe, distintos aspectos das ondas em canais abertos. Desenvolve a fórmula geral de celeridade.

$$C = \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta h}{4} + \frac{h^2}{6\Delta h} \cdot \frac{d^2\Delta h}{dx^2}\right) \cdot \sqrt{g\ h}$$

a qual é uma melhor aproximação da fórmula de Airy, incluindo para este caso o efeito da curvatura da superfície livre, demonstrando que diferentes partículas de uma mesma onda, podem ser propagadas com a mesma celeridade como se o perfil da superfície livre tiver uma forma estável particular.

No presente se conta com uma razoável quantidade de teorias de ondas baseadas nos avanços realizados pelos autores aqui mencionados.

Esses homens, em sua maioria foram estudiosos que não se limitaram a uma parcela restringida do saber (como poderia ser a hidrodinâmica neste caso), eles se esforçaram para ter uma visão mais ampla do universo que nos rodeia podendo assim entender (ou pelo menos intuir) os efeitos que sobre a sociedade acarretavam esses estudos realizados e às vezes, vincular de uma forma mais efetiva, os frutos destes trabalhos com o avanço da humanidade. Porém, na atualidade parece que tudo funciona diferente. Se bem é certo que o acúmulo de conhecimentos é muito maior em nossos dias, também é certo que há muitissimas facilidades de empreender trabalhos e estudos de caráter multidisciplinado nos quais o homem seja objeto e a finalidade de nossas investigações e esforços. Porém quase nunca é desta maneira, a alta especialização a que conduz a exagerada diversificação das atividades dos homens, faz que se perdam estas nobres finalidades e se substituam por outras, que convertam os homens em, escravos, sem consciência de seu destino.

2.3 - TEORIA DE ONDAS MAIS UTILIZADAS NA ATUALIDADE

As primeiras contribuições importantes no estudo das teorias de ondas foram feitas por Airy e por Stokes, ambos na metade do século XIX. No presente se conta com uma gama bastante mais extensa de teorias que modelam o movimento das ondas, as quais começaram a serem desenvolvidas com maior auge a partir de 1950, devido ao incremento de atividades de construção ao longo das costas e posteriormente mar adentro, os quais

exigem cálculos cada vez mais aproximados a realidade.

Pelo menos, uma dúzia de distintas teorias de onda pode ser consultada na literatura atual. Cada uma apresenta uma ordem de aplicação para a qual se aproxima melhor a realidade.

As teorias de uso mais generalizado na atualidade são |[1]|

- Airy
- Stokes
- Cnoidal

para o desenvolvimento do presente trabalho, foi escolhida a teoria de ondas de Airy baseado no acontecimento fundamental que esta teoria analítica apresenta uma solução fechada e linear, condição indispensável para a posterior resolução do problema dinâmico de ondas-estrutura baixo esquema de resposta na frequência, pelo que de uma análise mais detalhada se realizará posteriormente a partir do ponto 2.4. As outras teorias (Stokes e Cnoidal) escapam do alçance deste estudo, porém de maneira informativa se incluem alguns pontos importantes de cada uma, em forma resumida.

A teoria de Stokes apresenta uma diferença fundamental como a de Airy, a qual consiste em que sua formulação é marcadamente não linear. As condições de contorno na superfície

livre não se linearizam (passo que se toma para o desenvolvimento de Airy) pelo que as equações de solução tomam formas bastante mais complexas. Esta teoria de Stokes é deduzida a partir de uma função potencial que inclue vários termos e tem a seguinte forma:

$$\phi = \phi^1 + \phi^2 + \phi^3 + \phi^4 + \phi^5 + \ldots + \phi^n$$

onde cada uma das funções ϕ^i por sua vez funções potenciais que dão uma solução mais aproximada a medida que são tomados mais termos. Por exemplo, a solução de Stokes V está deduzida a partir de uma série de potências de cinco termos. Na teoria de Stokes, o primeiro termo da série de potências em uma solução das equações linearizadas. A solução que se obtém a partir desta teoria, produz resultados bastante razoáveis para níveis profundos de água (ou seja, quando a comprimento da onda é maior que o dobro da profundidade d'água a partir do nível de águas tranquilas, ou seja $\lambda > 2\ d$).

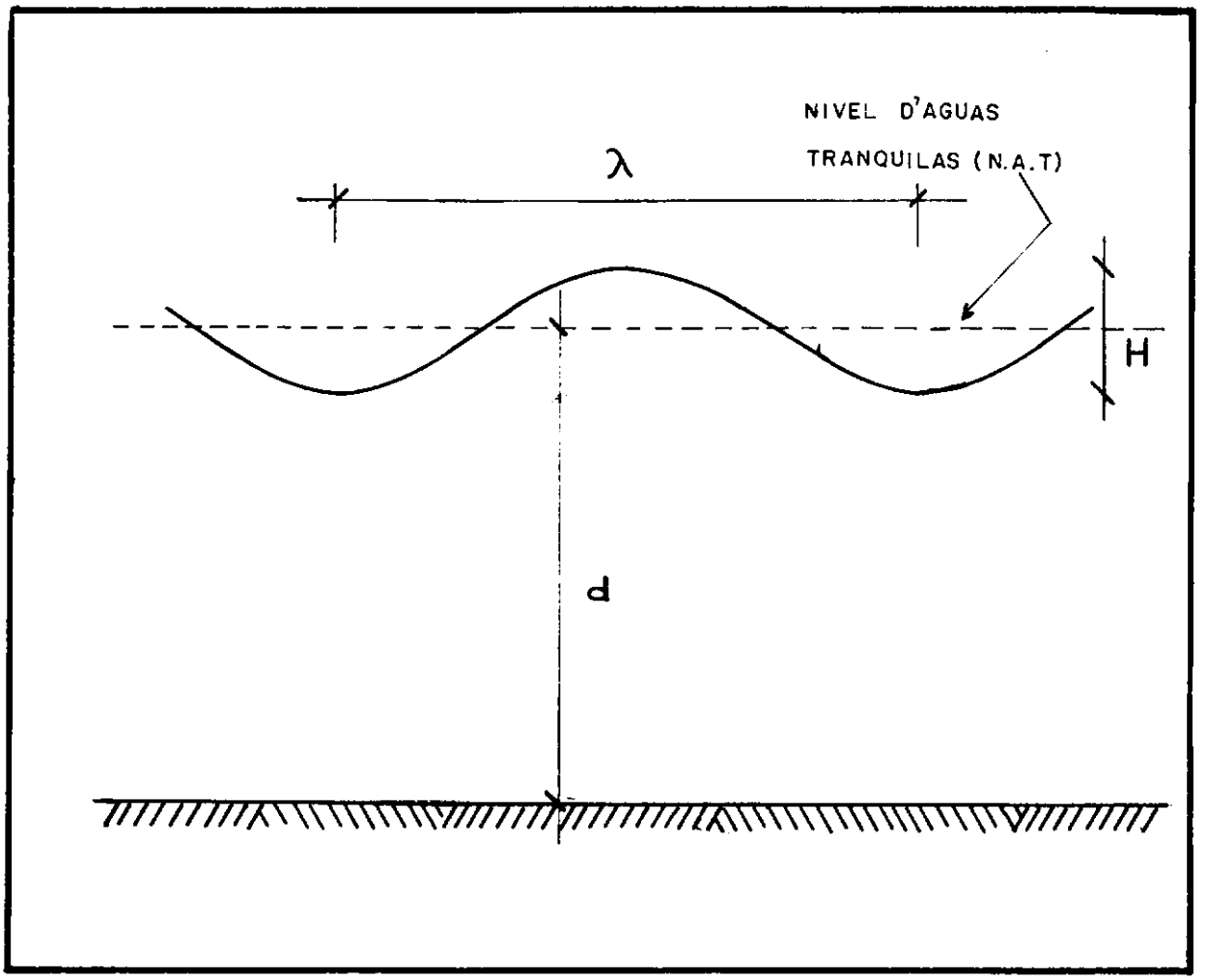


Fig. 2.4 - Descrição do mar

onde λ = longitude da onda
d = profundidade média do mar
N.A.T. = nível de águas tranquilas
H = altura da onda

A teoria Cnoidal, também é deduzida a partir de uma formulação não-linear, e de forma semelhante a teoria de Stokes, a solução se aproxima por meio de uma série de potencias, difere principalmente da teoria anterior no fato que o primeiro termo da série e uma solução das equações não lineares. Esta teoria produz uma aproximação bastante razoável para

níveis baixos de água. (águas pouco profundas).

Um esquema dos distintos perfís obtidos pelas aproximações de cada teoria permite visualizar algumas diferenças (Fig. 2.5). |[1]|

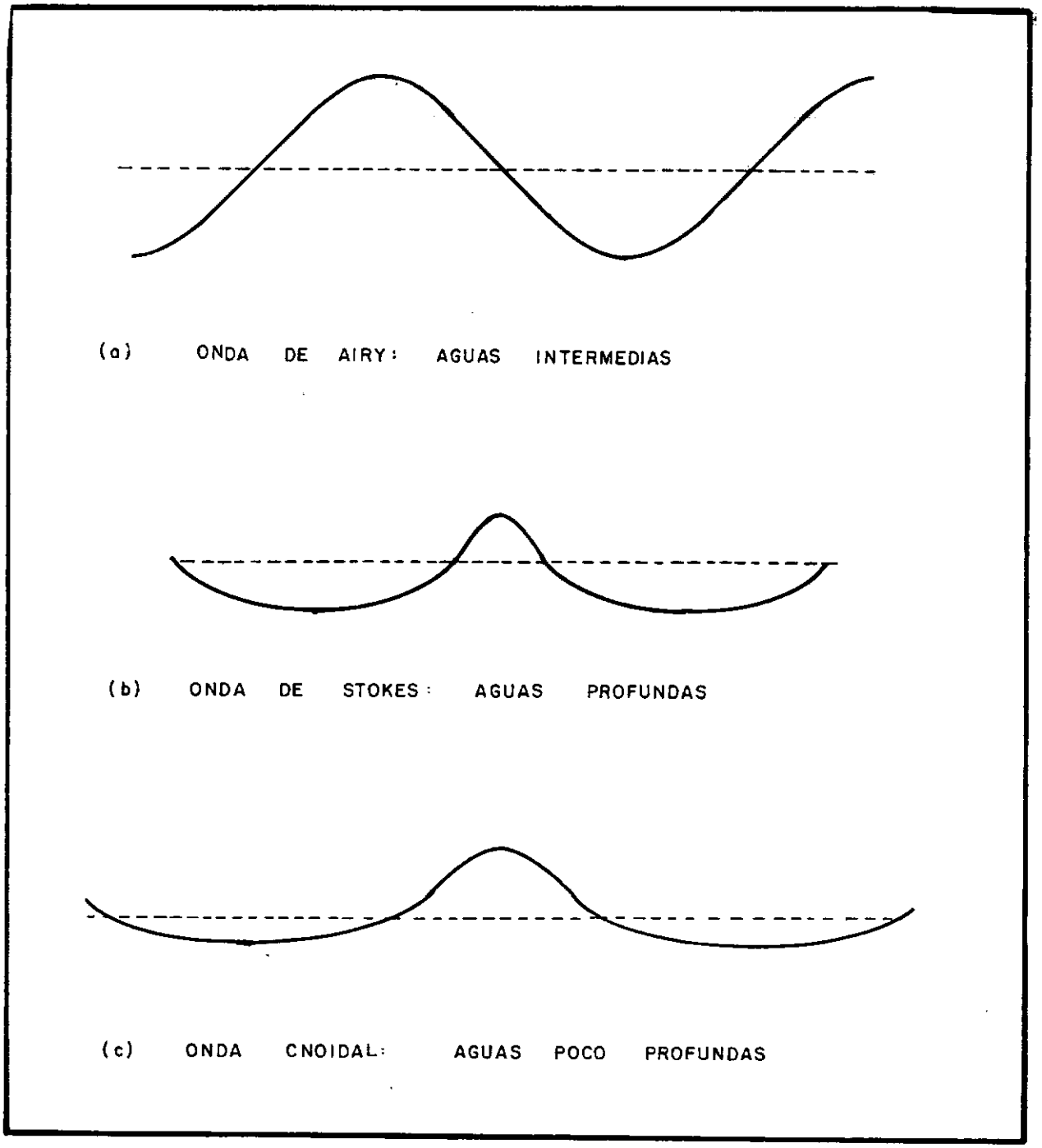


Fig. 2.5 - Distintas aproximações da superfície do mar

Os domínios da aplicação destas teorias podem-se observar no seguinte gráfico (Fig. 2.6) no qual são utilizados os parâmetros: |[8]|

H = altura da onda

T = período da onda

d = profundidade da água

H_B = altura a partir da qual rebenta a onda

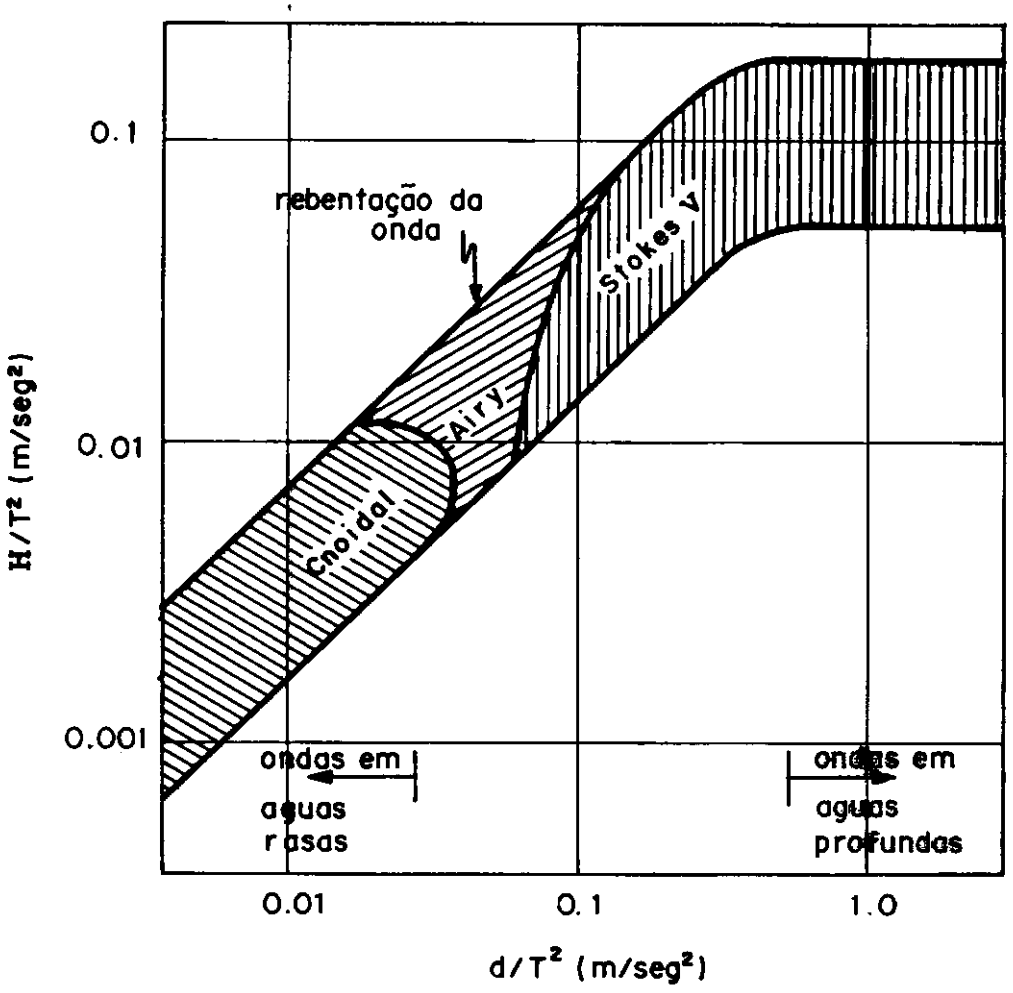


Fig. 2.6 - Aplicações das teorias de sucessivas ondas

2.4 - ALGUNS DESENVOLVIMENTOS TEÓRICOS DA TEORIA UTILIZADA (AIRY)

Para a determinação das forças produzidas pelas ondas se utiliza o esquema desenvolvido por Airy. Esta teoria foi escolhida, devida a sua condição de linearidade, condição esta que permite elaborar um modelo de solicitações em frequência (solicitações devidas a sucessivas ondas), a qual trás como consequência que a resposta da estrutura encaixe dentro de um esquema de resposta em frequência.

A teoria desenvolvida por Airy se encontra exposta de maneira exaustiva e detalhada na literatura, porém e só para coleção e informação, e sem ser objetivo primordial deste trabalho, são apresentados aqui, desenvolvimentos teóricos que levam a sua formulação.

O modelo escolhido para a representação das ondas, se baseia em suposições de caráter prático. A primeira suposição é a de aceitar que a crista da onda se extende infinitamente na direção normal a definida pela propagação da onda.

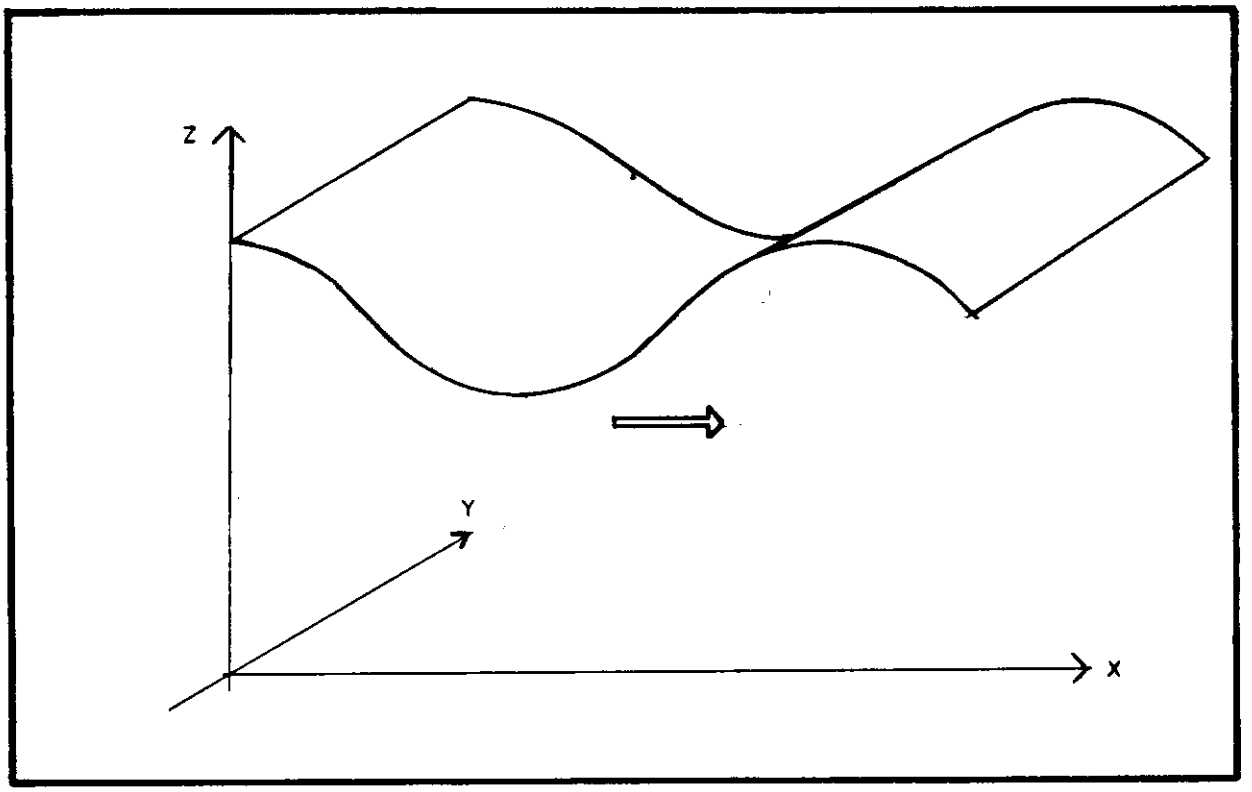


Fig. 2.7 - Modelo de crista larga

onde:

x = direção de propagação da onda

y = direção normal a propagação

z = direção vertical a partir do fundo do mar

Este tipo de onda recebe o nome de "Onda de Crista Larga".

Esta suposição permite representar a onda mediante em modelo bidimensional, definido pela direção de propagação (eixo) e pela direção vertical.

Pode-se destacar que de não ser feita esta suposição, o modelo de onda terá que ser tridimensional, complicando desnecessariamente o cálculo.

Para o desenvolvimento das hipóteses básicas que governam o comportamento do fluído, se define o plano X Z, onde

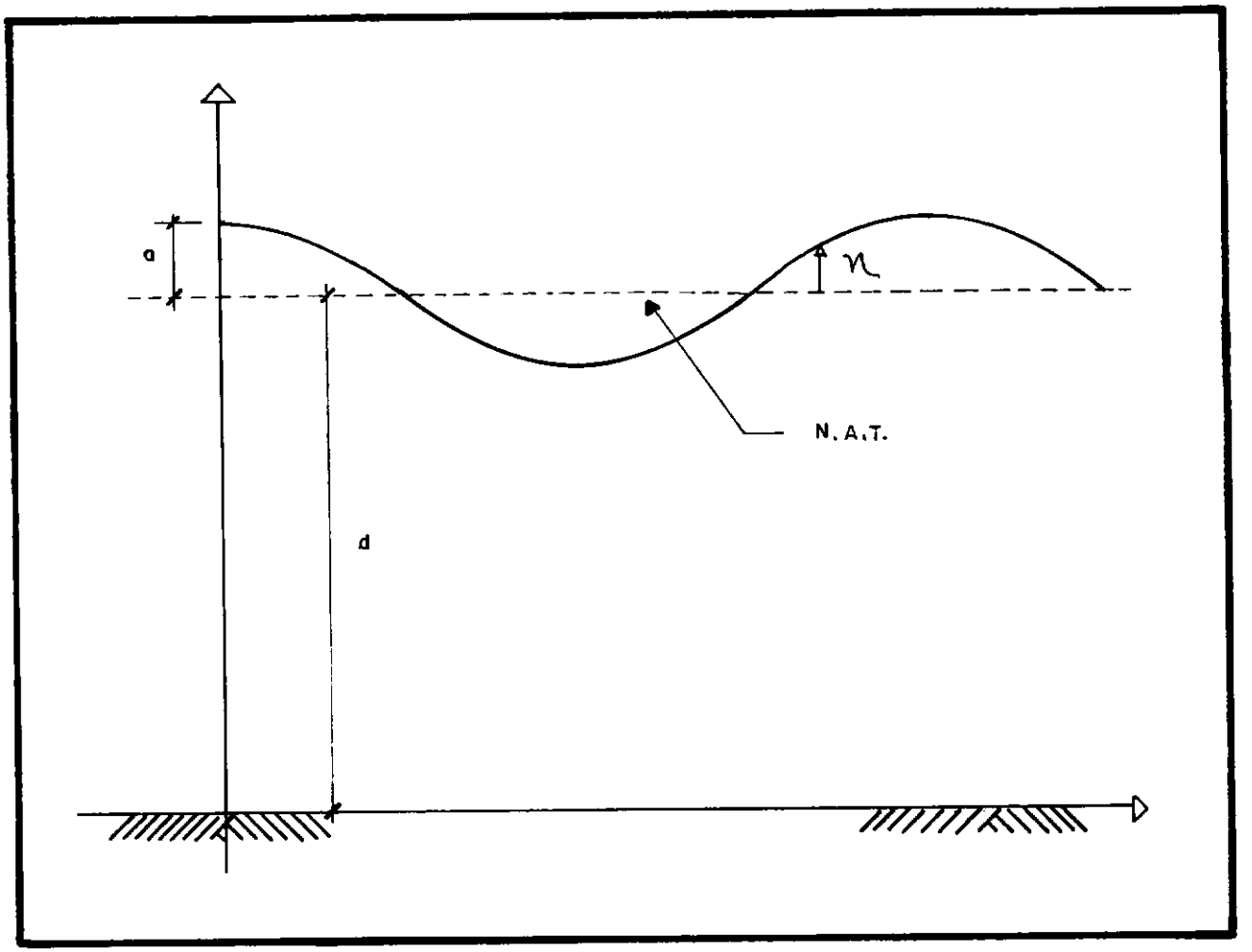


Fig. 2.8

u, v, w - são as velocidades das direções x,y,z respectivamente ($v = 0$)

d - é a profundidade da água, a partir do nível de águas tranquilas

η - é a elevação da água sobre o nível de águas tranquilas

2.4.1 - Problema do Valor de Contorno

O problema é desenvolvido como um meio contínuo que cumpre com a condição do fluído ideal e irrotacional no interior do mesmo. Este hipótese é expressa pela equação de Laplace

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (2.1)$$

ou também

$$\nabla^2 \phi = 0$$

onde ϕ é uma função potencial que modela esta solução, de acordo com o princípio de vorticidade.

A função potencial fornece os seguintes resultados:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \qquad (2.2)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{2.3}$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{2.4}$$

para este caso v = 0, ficando a equação (1) da seguinte forma

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{2.5}$$

Uma vez conhecida a equação governante, se passa a analisar as condições de contorno do modelo, cuja evaluação conduz a um tipo de solução.

A primeira condição de contorno aparece ao considerar que a fronteira de médio contínuo é impermeável ao passo do fluído. Particularizando, vemos que o fundo (z = - d) representa o solo, que por sua vez não permite o passo do fluído. Esta condição de contorno será

$$w = 0 \quad \text{para } z = -d$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -d \tag{2.6}$$

As segunda e terceira condições aparecem logo depois de analisar o que sucede na superfície livre do fluído (ou seja, a outra fronteira do meio).

Primeiro tem-se condição dinâmica, que resulta da aplicação da equação de Bernoulli na superfície livre, a qual permite levar em conta o fator da pressão na superfície livre do fluído deve ser igual a pressão atmosférica e cuja expressão matemática é:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 + g\, \eta = 0 \quad \text{para } z = \eta \qquad (2.7)$$

Esta condição apresenta o inconveniente principal de incluir um termo não-linear, que dificulta em especial a aplicação desta equação.

A terceira condição é a denominada cinemática, que descreve o movimento de uma partícula situada na superfície livre, a qual não terá velocidade na direção perpendicular ao contorno. Matematicamente, chega-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = \eta \qquad (2.8)$$

Com as equações (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8) se determina um problema de valor do contorno (PVC) o qual por sua vez será abordado e resoluto seguindo distintos esquemas e aproximações.

2.4.2 - Solução de Airy

Como se expôs anteriormente, a solução aceitada a neste caso, foi apresentada por Airy, a qual foi desenvolvida por meio da linearização do problema, e tomando como condição necessária para sua validez que a altura da onda será relativamente pequena frente a profundidade e a longitude da mesma, ou seja:

$$\frac{h}{d} << 1 \tag{2.9}$$

$$\frac{h}{\lambda} << 1 \tag{2.10}$$

(ver Fig. 2.4).

2.4.2.1 - Linearização do Problema

A linearização deste problema baseia-se em assumir que:

$$\phi\Big|_{z=0} \simeq \phi\Big|_{z=\eta}$$

o qual se cumpre se as condições (2.9) e (2.10) foram levadas em conta.

Esta linearização pode ser visualizada se se tem expansões ou séries de Taylor das equações que definem o PVC e

logo se desprezam os termos de ordem superior a um, ou seja, aos não-lineares.

As expressões de Taylor têm a forma

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x.f'(x) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x) + \ldots$$

e neste caso se tem:

$$\phi\Big|_{z=\eta} = \phi\Big|_{z=0} + \eta \left.\frac{\partial \phi}{\partial z}\right|_{z=0} + \frac{1}{2!} \eta^2 \left.\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}\right|_{z=0} + \ldots$$

desprezando os termos de ordem maior a um, tem-se:

$$\phi\Big|_{z=\eta} = \phi\Big|_{z=0} + \eta \left.\frac{\partial \phi}{\partial z}\right|_{z=0}$$

onde $\eta \frac{\partial \phi}{\partial z}$ tende a ser igual a zero a medida que z tende a zero, aproximando-se então a suposição de:

$$\phi\Big|_{z=\eta} = \phi\Big|_{z=0}$$

2.4.2.1.1 - Expansão da Condição de Impermeabilidade

Esta condição é direta na sua aplicação já que não inclue termos de ordem superior a um, nem admite translação de

eixos de referência, dá então

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad \text{para } z = -d \tag{2.11}$$

2.4.2.1.2 - Expansão da Condição Dinâmica

Para esta expansão se translada o valor da função potencial desde a superfície desconhecida ($z = \eta$), até a geometricamente determinada ($z = 0$) e se desenvolvem alguns de seus termos:

$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial t}\right|_{z=\eta} = \left.\frac{\partial \phi}{\partial t}\right|_{z=0} + \eta \left.\frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial z}\right|_{z=0} + \frac{\eta^2}{2} \left.\frac{\partial^3 \phi}{\partial z^2 \partial t}\right|_{z=0} + \ldots \tag{2.12}$$

$$|\nabla \phi|^2 = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 \tag{2.13}$$

$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial x}\right|_{z=\eta} = \left.\frac{\partial \phi}{\partial x}\right|_{z=0} + \eta \left.\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z}\right|_{z=0} + \frac{\eta^2}{2} \left.\frac{\partial^3 \phi}{\partial x \partial z^2}\right|_{z=0} + \ldots \tag{2.14}$$

da equação (2.13) tem-se

$$\left.\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2\right|_{z=\eta} = \left.\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2\right|_{z=0} + 2 \left.\frac{\partial \phi}{\partial x}\right. \eta \left.\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z}\right|_{z=0} + \eta^2 \left.\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z}\right)^2\right|_{z=0} \tag{2.15}$$

$$\left.\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2\right|_{z=\eta} = \left.\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2\right|_{z=0} + 2 \left.\frac{\partial \phi}{\partial z}\right. \eta \left.\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}\right|_{z=0} + \eta^2 \left.\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}\right)\right|_{z=0} \tag{2.16}$$

A partir deste momento, considera-se conveniente simplificar a anotação da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi_t$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} = \eta_z$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} = \phi_{zx}$$

Introduzindo (2.12), (2.15) e (2.16) na equação (2.7) com a nova notação e despreciando os termos de ordem maior que um, teremos:

$$\phi_t + g\,\eta = 0 \qquad (2.17)$$

2.4.2.1.3 - Expansão da Condição Cinemática

Analogamente a como foi desenvolvida a simplificação da condição dinâmica, se translada a equação (2.8) desde $z = \eta$ até $z = 0$, tem-se

$$\eta_t + \phi_x \cdot \eta_x - \phi_z = 0 \quad \text{para } z = \eta$$

que ao ser translada e simplificada, tem-se

$$\eta_t - \phi_z = 0 \qquad (2.18)$$

2.4.2.1.4 - Expansão da Equação de Laplace

A equação (2.5) terá a seguinte forma

$$\nabla^2 \phi = 0$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

2.4.2.2 - Resolução do Problema Simplificado

O problema se concentra agora em aplicar essas condições de contorno simplificada e conseguir umas funções que satisfaçam ao PVC simplificado. Para isso começa-se a eliminar a variável η, partindo da equação (2.17)

$$\eta = - \frac{\phi_t}{g}$$

permanecendo o problema definido pelas seguintes equações

$$\nabla^2 \phi = 0 \qquad \text{em } A \qquad (2.5)$$

$$\phi_z = 0 \qquad \text{em } z = - d \qquad (2.6)$$

$$\phi_{tt} + g \phi_z = 0 \qquad \text{em } z = 0 \qquad (2.19)$$

Para resolver o sistema, utiliza-se o método de separação de variáveis, pelo que assume-se:

$$\phi(x, z, t) = H(x)\ F(t)\ G(z) = H\ F\ G \qquad (2.20)$$

Entranto na equação (2.5)

$$G_{zz}\ H\ F + H_{xx}\ F\ G = 0 \qquad (2.21)$$

Dividindo (2.21) pelo produto F G H e supondo que estas são diferentes de zero para cada ponto do fluído, se tem

$$\frac{G_{zz}}{G} + \frac{H_{xx}}{H} = 0$$

e também

$$\frac{G_{zz}}{G} = -\frac{H_{xx}}{H} = k^2 \qquad (2.22)$$

passo que se toma para resolver o problema pelos métodos acostumados, passando-se as equações

$$\frac{G_{zz}}{G} = k^2 \qquad (2.23)$$

$$\frac{H_{xx}}{H} = -k^2 \qquad (2.24)$$

Resolvendo (23) se tem

$$G(z) = A\, e^{kz} + B\, e^{-kz} \qquad (2.25)$$

Avaliando a condição de contorno representada pela equação (2.6) tem-se

$$\frac{dG(z)}{dz} = k\, A\, e^{-kd} - k\, B\, e^{kd} = 0$$

ou seja

$$A\, e^{-kd} - k\, B\, e^{kd} = 0 \qquad (2.26)$$

onde:

$$A\, e^{-kd} = B\, e^{kd} = \frac{D}{2} \qquad (2.27)$$

Multiplicando os termos de (2.25) por $e^{-kd} \cdot e^{kd}$ tem-se

$$G(z) = A\, e^{-kd}\, e^{k(z+d)} + B\, e^{kd}\, e^{-k(z+d)} \qquad (2.28)$$

substituindo (2.27) em (2.28),

$$G(z) = D \cosh|k(z+d)| \qquad (2.29)$$

onde D é uma constante, pelo que a função ϕ será da forma

$$\phi(x, z, t) = F(t)\, H(x)\, D \cosh|k(z+d)| \qquad (2.30)$$

Entrando agora na condição de contorno (2.19), se pode ver que para z = 0

$$F''(t)\, H(x)\, D \cosh|k(z+d)| + g\, F(t)\, H(x)\, D\, k \operatorname{senh}|k(z+d)| = 0$$

equação que ao ser simplificada dá

$$F''(t)/F(t) = - g\, k \tanh(kd)$$

Por outra parte, se tem que para qualquer valor de "z", o quociente F"(t)/F(t) deve satisfazer a relação

$$F''(t)/F(t) = - g\, k \tanh k(z + d),$$

e sendo que F"(t)/F(t) não depende de "z", se deduz que F"(t)/F(t) terá o valor de uma constante, pelo que chega-se a relação

$$\omega^2 = g\, k \tanh(kd) \qquad (2.31)$$

onde:

ω = frequência natural da onda em estudo
g = constante de gravidade
d = profundidade da água

desta forma, pode ser calculada a constante k, solução da equação (2.31), que deverá ser resolvida por processos iterativos.

Chega-se então a

$$F'' + \omega^2 F = 0 \qquad (2.32)$$

cuja solução é da forma

$$F(t) = A_1 e^{i\omega t} + B_2 e^{-i\omega t}$$

Por ser solução que descreve suficientemente o problema, se toma

$$F(t) = A_1 e^{i\omega t} \qquad (2.33)$$

Substituindo (2.29) e (2.33) na equação (2.20) se tem:

$$\phi(x, z, t) = H(x).D \cosh k(z+d) e^{i\omega t} \qquad (2.34)$$

onde a constante A_1 será incluída em D (também constante).

Aplicando a condição (2.17) a (2.34), se tem

$$H(x).D \cosh k(z+d)\, i\omega\, e^{i\omega t} = - g \eta$$

para $z = 0$

$$H(x).D.\cosh(kd)\, i\omega\, e^{i\omega t} = - g \eta \qquad (2.35)$$

onde ao ser introduzida a expressão de Euler

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i\,\mathrm{sen}(\omega t) \tag{2.36}$$

se terá

$$H(x)\, D \cosh(kd) i\omega(\cos\omega t + i\,\mathrm{sen}\omega t) = -\, g\, \eta \tag{2.37}$$

Regressando a expressão (2.24)

$$H_{xx} + k^2 H = 0 \tag{2.38}$$

Se obtem uma solução para H(x) do tipo

$$H(x) = A_2\, e^{ikx} + B_2\, e^{-ikx}$$

onde se toma

$$H(x) = B_2\, e^{-ikx} \tag{2.39}$$

Substituindo em (2.37) e separando η se terá:

$$\eta = -\,\frac{D\omega\cosh(kd)\, i\; e^{i\omega t}\; e^{-kix}}{g}$$

onde a constante B_2 será incluída em D.

Aplicando a expressão (2.36), obtem-se

$$\eta = - \frac{Di\omega}{g} \cosh(kd) |\cos(\omega t - kx) + i\,\mathrm{sen}(\omega t - kx)| \qquad (2.40)$$

Esta equação pode ser utilizada para determinar a máxima elevação da onda em relação a $z = 0$, para o qual se substituem $x = 0$, $t = 0$ e $\eta = a$.

obtendo-se

$$a = \frac{D\omega}{g} \cosh(kd) \qquad (2.41)$$

desta expressão se toma o valor de D

$$D = \frac{ag}{\cosh(kd)} \qquad (2.42)$$

Valor este que ao ser substituído em (2.34) junto com a expressão (2.39) se terá

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh (kd)} e^{i\omega t} e^{-kix} \qquad (2.43)$$

Expressão esta que será simplificada ao serem aplicada a fórmula de Euler

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh k(z+d)\cos(kx-\omega t)}{\cosh(kd)} \qquad (2.44)$$

onde:

ω = frequência natural da onda

k = constante da onda, expressão (2.31)

desta expressão (2.44) se podem determinar os campos de velocidades e acelerações, assim como o perfil generalizado pela onda

$$\eta = - a \operatorname{sen}(kx-\omega t) \tag{2.45}$$

Estas expressões (2.44) e (2.45) podem ser transformadas, efetuando uma translação de eixos em uma distância de $- \pi/2$, tal que

$$x' = x - \pi/2$$

ficando

$$\cos(kx' - \omega t) = \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

Chegando assim as expressões geralmente utilizadas

$$\phi = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh (k + d)} \operatorname{sen}(kx-\omega t) \tag{2.46}$$

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) \tag{2.47}$$

velocidades:

$$u = a\omega \frac{\cosh k(z+d)}{\operatorname{senh}(kd)} \cos(kx - \omega t) \qquad (2.48)$$

$$w = a\omega \frac{\operatorname{senh} k(z+d)}{\operatorname{senh}(kd)} \operatorname{sen}(kx - \omega t) \qquad (2.49)$$

acelerações:

$$\dot{u} = a\omega^2 \frac{\cosh k(z+d)}{\operatorname{senh}(kd)} \operatorname{sen}(kx - \omega t) \qquad (2.50)$$

$$\dot{w} = - a\omega^2 \frac{\operatorname{senh} k(z+d)}{\operatorname{sen} h(kd)} \cos(kx - \omega t) \qquad (2.51)$$

Estas fórmulas podem ser simplificadas para os seguintes casos:

águas profundas:

$$\frac{d}{\lambda} > \frac{1}{2}$$

$$u = a\omega e^{kz} \cos(kx-\omega t)$$

$$w = a\omega e^{kz} \operatorname{sen}(kx-\omega t)$$

$$\dot{u} = a\omega^2 e^{kz} \operatorname{sen}(kx-\omega t)$$

$$\dot{w} = a\omega^2 e^{kz} \cos(kx-\omega t)$$

Para águas tranquilas:

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{20}$$

$$u = \frac{a\omega}{kd} \cos(kx - \omega t)$$

$$w = a\omega(1 + \frac{z}{d})\operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

$$\dot{u} = \frac{a\omega^2}{kd} \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

$$\dot{w} = - a\omega^2(1 + \frac{z}{d}) \cos(kx - \omega t)$$

2.4.3 - Fórmulas a Serem Utilizadas

Neste trabalho, definiram-se os componentes u, v e w para as velocidades e $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{w}$ para as acelerações, para isso foi necessário definir os eixos globais (x, y, z) e os eixos do plano de ação da onda (x_ω , z_ω) onde estes se caracterizam por:

- o eixo z_ω coincide com o eixo vertical z do sistema global

- o eixo x_ω forma um ângulo Θ com o eixo x do sistema global (Fig. 2.9)

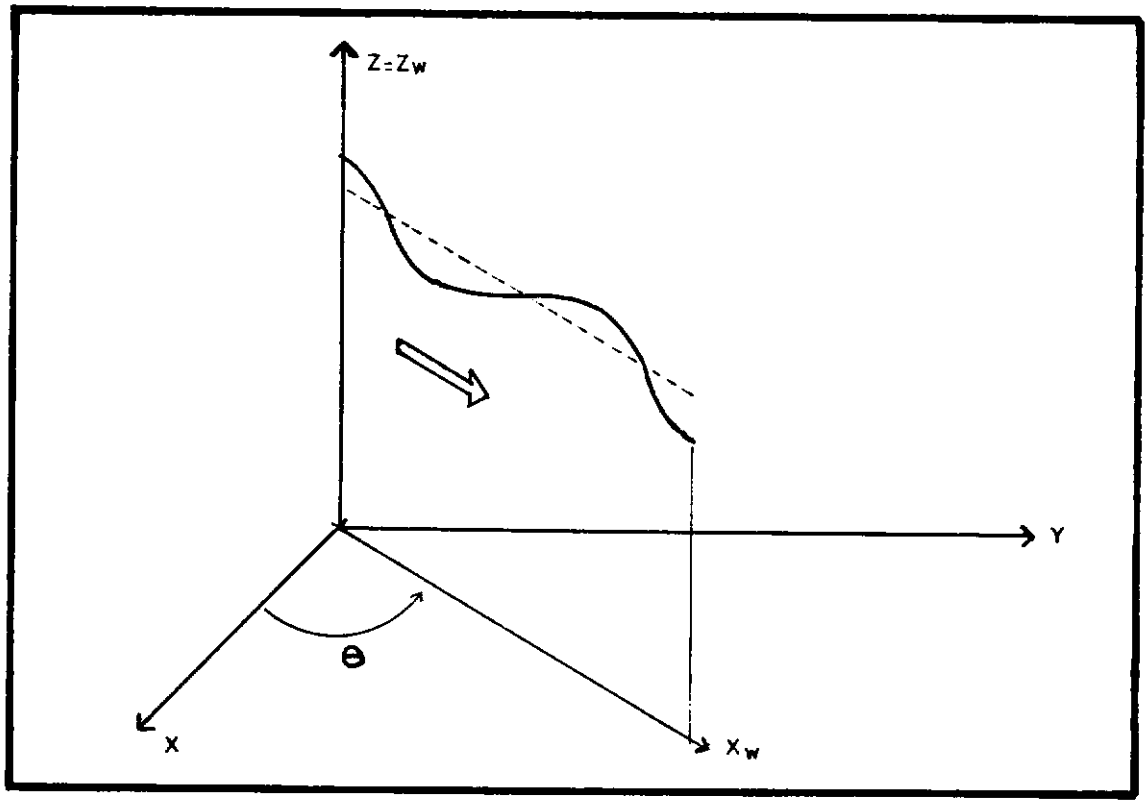


Fig. 2.9

As fórmulas que serão utilizadas ao longo do presente tranalho serão:

Velocidades:

$$u = a\omega \frac{\cosh|k(z_\omega+d)|}{\operatorname{senh}(kd)} .\cos(kx_\omega-\omega t).\cos\ \theta \qquad (2.52)$$

$$v = a\omega \frac{\cosh|k(z_\omega+d)|}{\operatorname{senh}(kd)} .\cos(kx_\omega-\omega t).\operatorname{sen}\ \theta \qquad (2.53)$$

$$w = a\omega \frac{\operatorname{senh}|k(z_\omega+d)|}{\operatorname{senh}(kd)} .\operatorname{sen}(kx_\omega-\omega t) \qquad (2.54)$$

acelerações

$$\dot{u} = a\omega^2 \frac{\cosh|k(z_\omega+d)|}{\operatorname{senh}(kd)} .\operatorname{sen}(kx_\omega-\omega t).\cos\ \theta \qquad (2.55)$$

$$\dot{v} = a\omega^2 \frac{\cosh|k(z_\omega+d)|}{\operatorname{senh}(kd)} .\operatorname{sen}(kx_\omega-\omega t).\ \operatorname{sen}\ \theta \qquad (2.56)$$

$$\dot{w} = -a\omega^2 \frac{\operatorname{senh}|k(z_\omega+d)|}{\operatorname{senh}(kd)} .\cos(kx_\omega-\omega t) \qquad (2.57)$$

CAPÍTULO III

CÁLCULO DAS FORÇAS PELA AÇÃO DO MAR

O objetivo deste capítulo é apresentar os fundamentos teóricos para os estudos do tipo de solicitações utilizadas ao longo do presente trabalho.

3.1 - INTRODUÇÃO

Devido as condições ambientais as quais deve-se sobrepor uma estrutura off-shore surge a necessidade de estudar detalhadamente as solicitações de carga, especialmente as que derivam da interação médio-estrutura.

Em geral, as cargas estruturais que atuam sobre uma plataforma off-shore podem-se classificar nos seguintes tipos:

- cargas de serviço
- cargas ambientais
- cargas acidentais

As cargas de serviço, são as resultantes das atividades que a nível normal se realizam na estrutura, e visto de outra forma as resultantes da existência da mesma estrutura e de sua utilização a níveis normais. Estas cargas incluem o peso próprio da plataforma, o equipamento e materiais armazena

dos a bordo, as resultantes das pressões hidrostáticas atuantes e das operações realizadas tais como a extração de petróleo. Estas cargas podem ser classificadas em estáticas e dinâmicas. O primeiro grupo pode-se dividir por sua vez em cargas estáticas permanentes, cargas estáticas móveis e cargas estáticas variáveis. Cargas estáticas permanentes como o peso próprio da plataforma e do equipamento e material que ficam permanentemente no mesmo local, sem mudar de posição ao longo do tempo. Cargas móveis são aquelas que podem ser colocadas em distintas posições a bordo, tais como os materiais e outra parte dos equipamentos. As cargas estáticas variáveis podem trocar de grandezas e direções, como no caso das pressões estáticas da água e peso de abastecimento para pessoal. Estas trocas, porém ocorrem muito lentamente. As cargas dinâmicas, por outro lado, trocam de magnitude, posição e direção de uma forma, tal que conduzem a movimentos e solicitações internas na estrutura bastante maiores que os que obteriam se o efeito da carga se estudada separadamente, como estático (este efeito se faz mais notável a medida que as estruturas se situam em profundidades cada vez maiores). Estes tipos de cargas, a nível de serviço, são derivadas do uso de maquinária vibratória, helicópteros, chegada e saída de barcos.

As cargas ambientais são os resultados direto e indireto da ação do meio circundante, ficando incluídas neste grupo, cargas devidas a vento, ondas, correntes, terremotos e nos casos em que podem apresentar, gelo e neve. Quase todas estas cargas são do tipo dinâmico. As cargas dinâmicas devidas

a sucessão das ondas são, em geral, as de maior importância, devido a duas razões fundamentais: a primeira é porque produzem grandes esforços na estrutura e a segunda é porque ocorrem muitas vezes de maneira repetitiva pelo que é necessário tomar precauções especiais no que respeita a fadiga. Estas cargas de sucessão das ondas serão objeto de um estudo minucioso ao longo deste trabalho.

As cargas acidentais são de natureza esporadica, causadas por impactos, explosões, fogo e situações de sismo excepcionais. Em geral, a estrutura off-shore é desenhada solo para impedir um colapso repentino e permitir evacuar a tripulação.

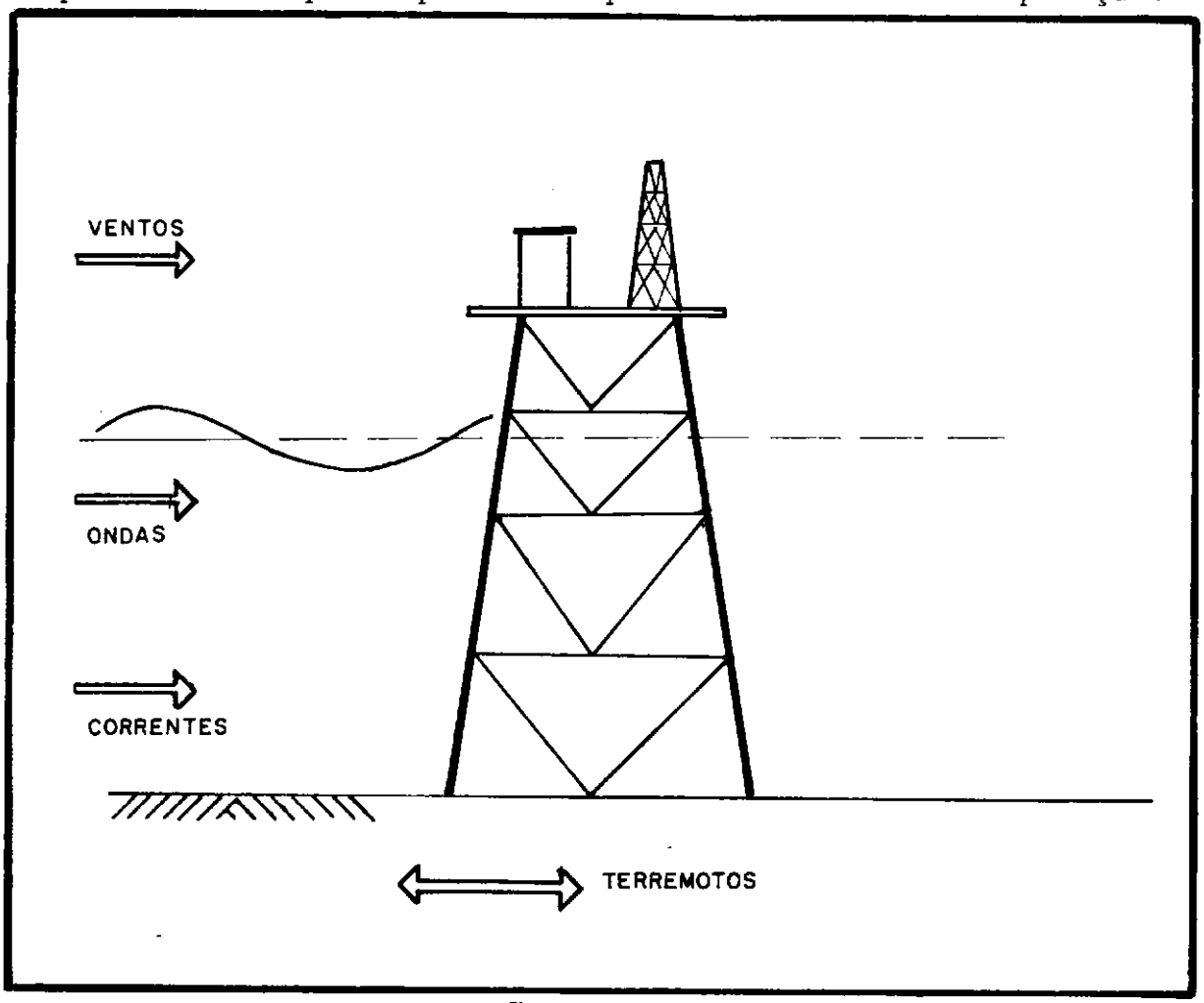


Fig. 3.1 - Solicitações sobre a estrutura

Neste capítulo serão analisadas as distintas forças que surgem da interação ondas-estruturas, as quais como foi anunciado anteriormente, houve a conveniente utilização de um modelo dinâmico, que permita variações através do tempo, o qual será explicado e implementado em capítulos posteriores.

3.2 - ESQUEMA UTILIZADO NO CÁLCULO DAS FORÇAS (FÓRMULAS DE MORISON)

As estruturas off-shore apresentam em geral uma importante característica, e é que os membros que as compõem têm uma dimensão predominante, ou seja, que são membros estruturais esbeltos. Neste caso, em sua quase totalidade, possuem formas cilíndricas. Esta se deve em geral a dois fatores:

1) Devido a troca de direção das ações das ondas, a seção circular resulta ser a mais adequada para resistir as solicitações internas já que este tipo de seção possue propriedades idênticas em qualquer direção (como por exemplo, momento de inércia) (Fig. 3.2).

2) A seção circular é a que apresenta menores efeitos de choque e de arraste contra um fluído que se move em direções variáveis (Fig. 3.3).

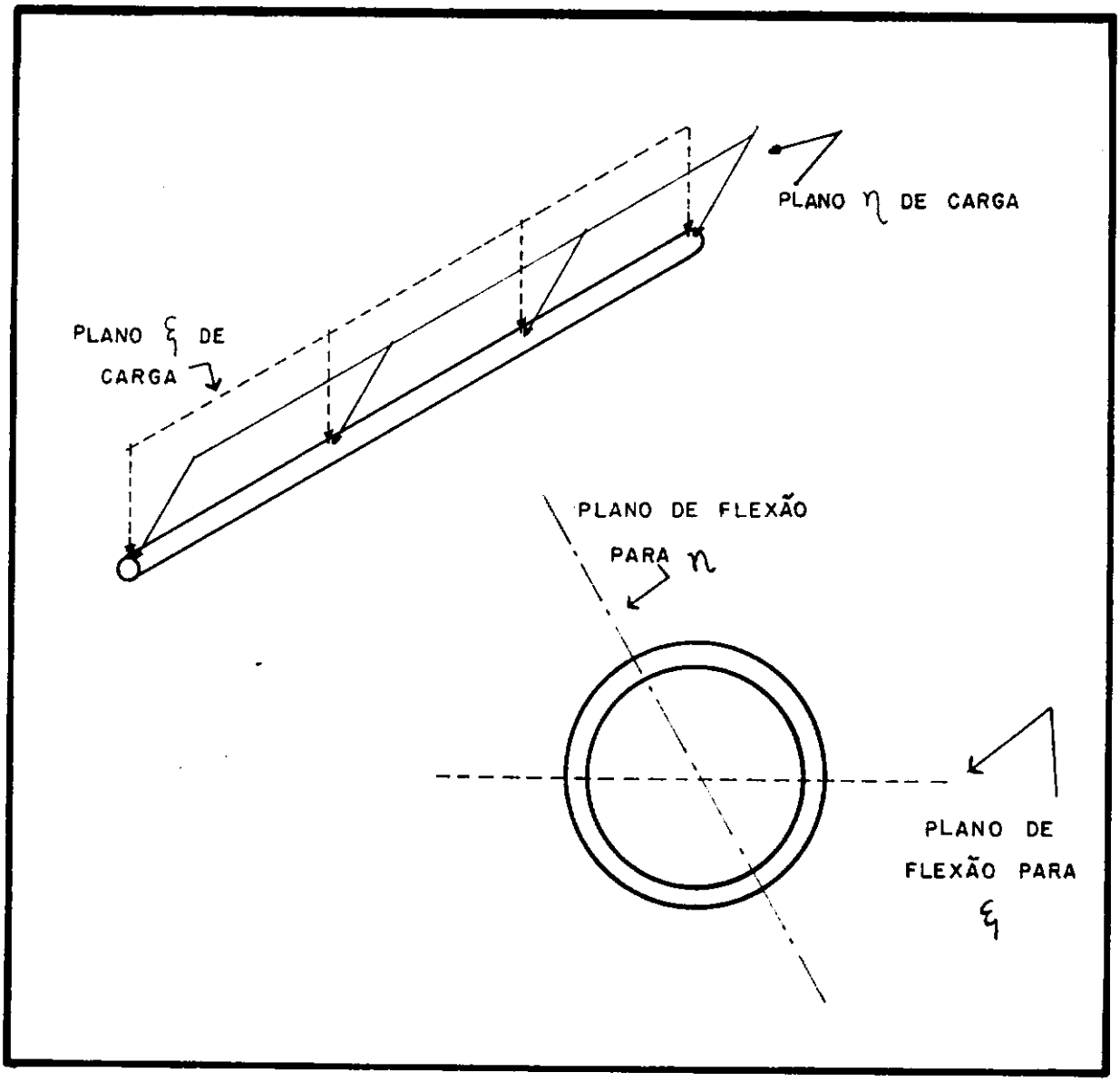


Fig. 3.2 - Solicitações em distintos planos do membro

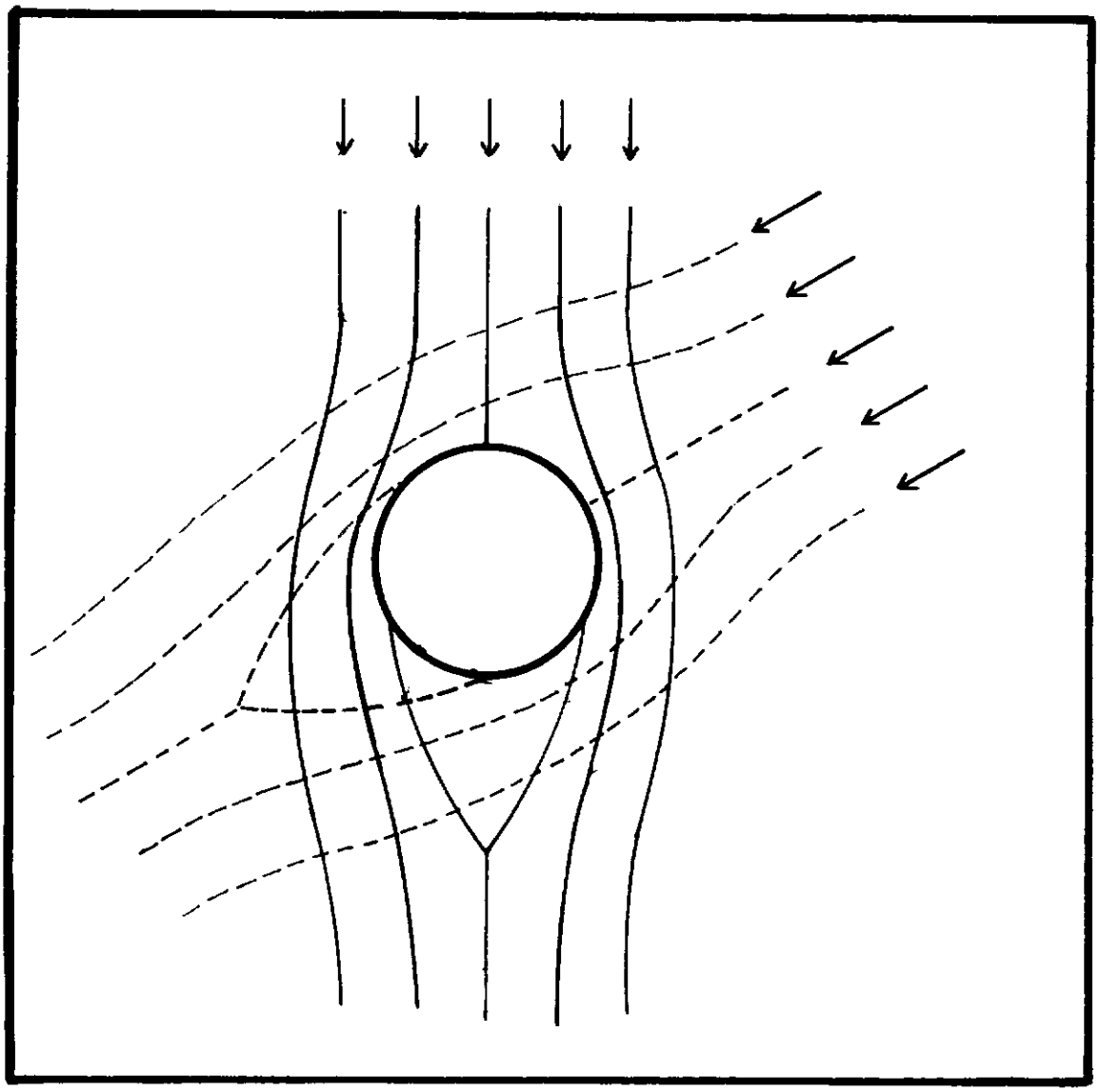


Fig. 3.3 - Fluxo atuando em direções variáveis

3.2.1 - Fórmula Original de Morison

Para a determinação das cargas de ondas sobre os componentes estruturais será necessário discriminar entre dois possíveis casos: [3]

1) O caso em que a onda não é modificada pela presença do membro.

2) O caso em que o membro, devido as duas dimensões, altera

significativamente a configuração inicial da onda.

O limite que diferencia ambos os casos é a relação

$$D = \lambda/5 \tag{3.1}$$

onde: D = diâmetro do membro

λ = longitude da onda

Se $D < \lambda/5$ se encontra no primeiro caso, enquanto que $D > \lambda/5$ se encontra no segundo.

O primeiro caso, é mais geral e a forma parte dos objetivos deste trabalho, enquanto que o segundo é um caso muito mais particular,o qual faz necessário um estudo minucioso e detalhado que escapa dos objetivos deste trabalho.

Uma vez cumprida esta limitação, define-se a necessidade de determinar as forças que produz o mar, sobre o membro cilíndrico submergido. Para isto, Morison e Col |7| apresentaram 1950 uma formula que serve para determinar as forças resultantes das ações das ondas, sobre um cilindro vertical e imóvel. A fórmula apresentada por Morison, é uma formula empírica, baseada nos ensaios experimentais e que expressa de uma maneira bastante acertada o que ocorre na realidade.

$$F = \rho \frac{D}{2} C_D |V|V + \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M \dot{V} \tag{3.2}$$

onde:

ρ = densidade relativa da água

D = diâmetro do membro estrutural

C_D = coeficiente de arrastro (associado a velocidade)

C_M = coeficiente de inércia (associado a aceleração)

V = velocidade do fluído

$\dot{V}$ = aceleração do fluído

O primeiro termo corresponde a força de arraste que exerce o fluído em movimento contra as paredes laterais do cilíndro.

O segundo termo corresponde a força do tipo inércia, que produz o fluído em movimento ao encontrar-se com o membro.

Para a determinação dos coeficientes C_M e C_D, foram realizadas grande quantidades de estudos por vários autores.

Estes coeficientes C_M e C_D dependem do valor do número de Reynolds

$$R_e = \frac{u.D}{\nu}$$

onde

Re: número de Reynolds

D : diâmetro do membro

u : velocidade do fluído

ν : viscosidade cinemática do fluído

Com base nas experiências mais importantes cujo objetivo principal tem sido a determinação de C_D e C_M [43], na prática são geralmente usados os seguintes valores:

Para C_D:

1 - Regime sub-crítico: $Re < 10^5$ C_D é aproximadamente igual a 1.2.

2 - Regime de transição: $10^5 < Re < 4 \times 10^5$ C_D varia linearmente com o número de Reynolds entre 1.2 e 0.7.

3 - Regime super-crítico: $Re > 4 \times 10^5$ C_D é aproximadamente igual a 0.7.

Para C_M:

1 - $Re < 2.5 \times 10^5$ C_M constante e igual a 2.0

2 - $2.5 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$ $C_M = 2.5 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$

3 - $Re < 5 \times 10^5$ C_M constante e igual a 1.5

A formula (3.2) está referida a um caso muito particular em que o cilíndro tem seu eixo colocado na direção z (Fig. 3.4)

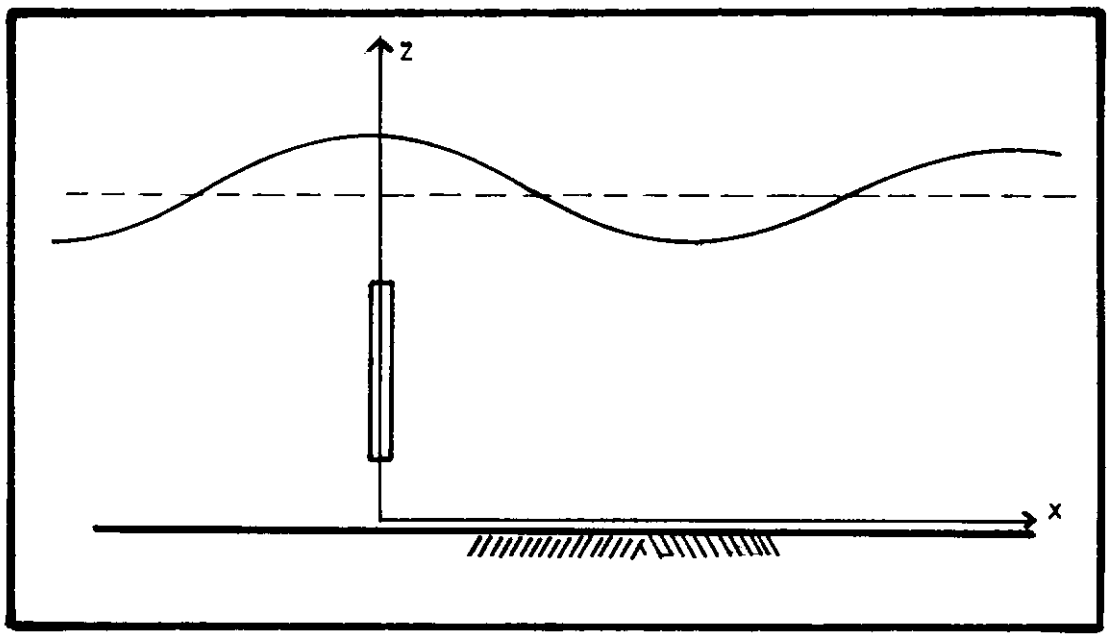


Fig. 3.4 - Posição original do cilindro de Morison

enquanto que a onda se move em direção vertical. Também é importante notar que não se leva em conta aqui um possível movimento do cilindro, o qual resulta de especial interesse quando se analisa o comportamento dinâmico da estrutura.

3.2.2 - Fórmula de Morison Para Cilíndros Flexíveis

A formula original (3.2) tem como eixo de referência (z) o eixo de cilíndro, e mede as velocidades e acelerações a partir desse eixo de referência (Fig. 3.4). Se agora o

cilíndro tem uma velocidade $\dot{X}$ e uma aceleração $\ddot{X}$ relativos ao eixo de referência z, e em seu movimento (X) se mantem sempre orientado em uma forma paralela ao eixo z, se tem que as velocidades e acelerações que entram na formula (3.2) são as relativas entre o fluído (V, $\dot{V}$) e o cilindro ($\dot{X}$, $\ddot{X}$). Por estar ambas referidas ao eixo z e por ser de interesse manter um sistema de referência (x, y, z) global, que não mude durante as análises, fica expressa a equação de Morison da seguinte maneira |[14]|.

$$F = \rho \frac{D}{2} C_D |(V-\dot{X})|(V-\dot{X}) + \rho \frac{\pi D^2}{4} |C_M \dot{V} - (C_M - 1)\ddot{X}| \qquad (3.3)$$

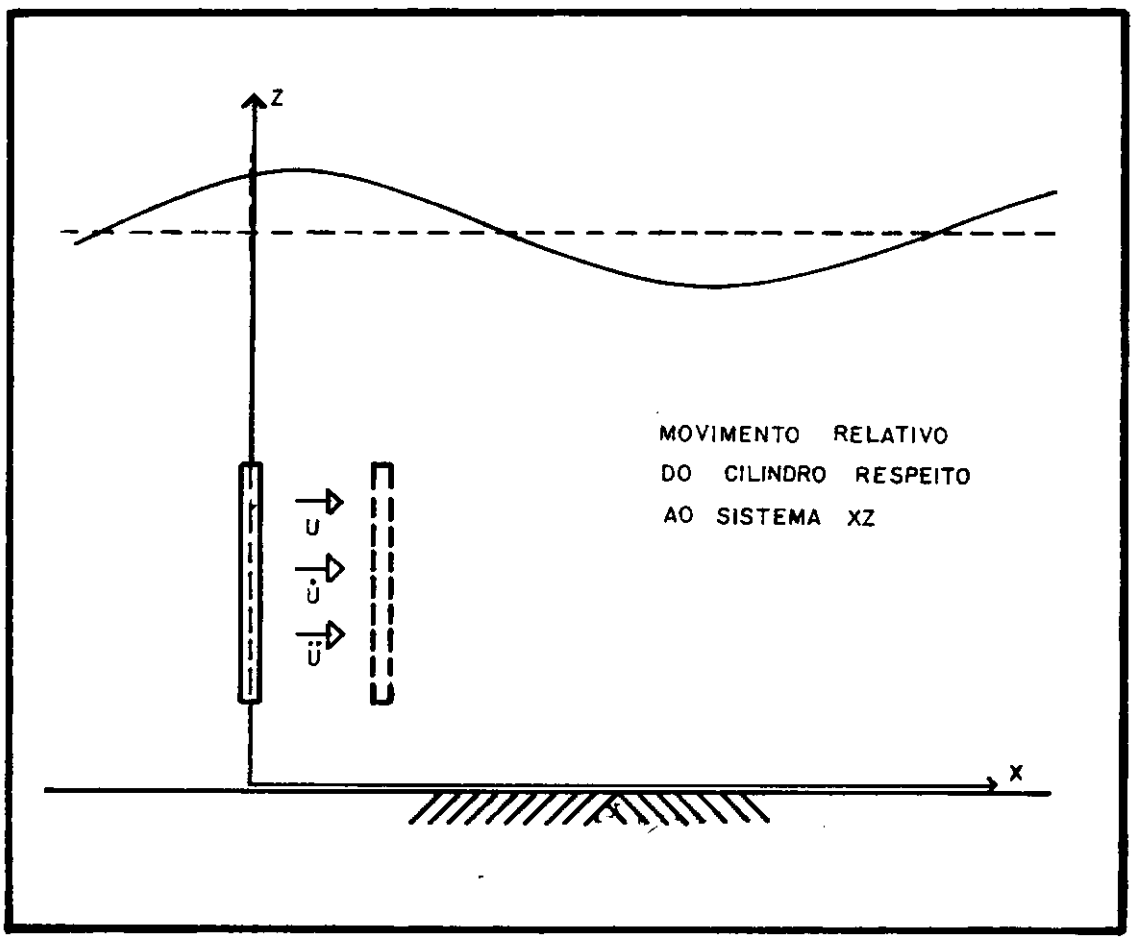


Fig. 3.5

3.2.3 - Fórmula de Morison para Cilíndros em Qualquer Posição

A maioria dos membros que compõem uma estrutura não estão colocados em uma posição vertical, pelo que será necessário tomar algumas considerações para aplicar a fórmula de Morison.

Ao serem analisadas (3.2) pode-se observar que as velocidades e acelerações que refere-se Morison atuam em forma normal ao cilíndro em questão. No outro caso, por estar o cilíndro orientado numa direção arbitrária, as velocidades e acelerações do fluído atuante, não são necessariamente normais ao membro. Baseando-se na normalidade das velocidades e acelerações do fluído em (3.2), esta equação pode ser rescontruída, levando em conta somente as componentes das velocidades e acelerações que são normais aos membros [3] e [28].

$$\vec{F} = \rho \frac{D}{2} C_D |\vec{V}_n| \vec{V}_n + \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M \dot{\vec{V}}_n \qquad (3.4)$$

O problema passa a ser agora, a determinação das velocidades e acelerações normais ao membro. Para isso, começa-se a definir os seguintes vetores:

$$\vec{C} = C_x \hat{i} + C_y \hat{j} + C_z \hat{k} \qquad (3.5)$$

$$\vec{V} = U \hat{i} + V \hat{j} + W \hat{k} \qquad (3.6)$$

$$\dot{\vec{V}} = \dot{U} \hat{i} + \dot{V} \hat{j} + \dot{W} \hat{k} \qquad (3.7)$$

onde $\vec{C}$ representa o vetor direção do membro e $\vec{V}$ e $\dot{\vec{V}}$ representam os vetores de velocidade e aceleração da partícula de fluído em contato com o membro e cujos componentes são tomados das fórmulas (2.52) a (2.57).

O vetor velocidade normal $\vec{V}_n$ fica determinado por este dobro produto vetorial [3]

$$\vec{V}_n = \vec{C} \times |\vec{V} \times \vec{C}| \tag{3.8}$$

Do mesmo modo, o vetor aceleração normal $\dot{\vec{V}}_n$

$$\dot{\vec{V}}_n = \vec{C} \times |\dot{\vec{V}} \times \vec{C}| \tag{3.9}$$

Estas expressões, desenvolvidas dão origem a:

$$\vec{V}_n = \begin{Bmatrix} U_n \\ V_n \\ W_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U - (U.C_x + V.C_y + W.C_z).C_x \\ V - (U.C_x + V.C_y + W.C_z).C_y \\ W - (U.C_x + V.C_y + W.C_z).C_z \end{Bmatrix} \tag{3.10}$$

$$\dot{\vec{V}}_n = \begin{Bmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{V}_n \\ \dot{W}_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{U} - (\dot{U}.C_x + \dot{V}.C_y + \dot{W}.C_z).C_x \\ \dot{V} - (\dot{U}.C_x + \dot{V}.C_y + \dot{W}.C_z).C_y \\ \dot{W} - (\dot{U}.C_x + \dot{V}.C_y + \dot{W}.C_z).C_z \end{Bmatrix} \tag{3.11}$$

Os módulos de ambos vetores:

$$|\vec{V}_n| = |U + V^2 + W^2 - (U.C_x + V.C_y + W.C_z)^2|^{1/2} \qquad (3.12)$$

$$|\dot{\vec{V}}_n| = |\dot{U}^2 + \dot{V}^2 + \dot{W}^2 - (\dot{U}.C_x + \dot{V}.C_y + \dot{W}.C_z)^2|^{1/2} \qquad (3.13)$$

Estas fórmulas são utilizadas para (3.4).

3.2.4 - Fórmula de Morison que Engloba Efeitos de Movimentos da Estrutura, Para Cilindros em Qualquer Direção

Uma vez estudados ambos efeitos por separado nas equações (3.3) e (3.4) resulta imediata a reconstrução da fórmula de Morison (3.2) levando em conta os dois efeitos:

$$\vec{F} = \rho \frac{D}{2} C_D |(\vec{V}_n - \dot{\vec{X}}_n)| . (\vec{V}_n - \dot{\vec{X}}_n) + \rho \frac{\pi D^2}{4} |C_M \dot{\vec{V}}_n - (C_M - 1) \ddot{\vec{X}}_n| \qquad (3.14)$$

Esta formula (3.14) será a base das utilizadas para realizar as análises das estruturas.

3.3 - LINEARIZAÇÃO DOS TERMOS DE VELOCIDADES NA FÓRMULA DE MORISON

Uma vez enunciada a formula de Morison em sua expressão completa (3.14) se procede a analisar em detalhe a parte correspondente as forças de arraste, a qual apresenta uma característica muito importante, que é o termo quadrático das velocidades relativas entre o fluído e a estrutura.

Na maioria dos casos em que se utiliza a fórmula (3.14) se lineariza o termo quadrático |[6] e [19]|.

A fórmula original da força de arraste é a seguinte (tomada de 3.14).

$$\vec{F}_D = \rho \frac{D}{2} C_D |(\vec{V}_n - \dot{\vec{X}}_n)| . (\vec{V}_n - \dot{\vec{X}}_n) \qquad (3.15)$$

Na primeira consideração, se deprecia o termo da velocidade correspondente a estrutura |[19]| (por considerar-se que seu efeito é relativamente depreciável). Logo se toma a parte quadrática da equação, incorporando-se o coeficiente de arrastre C_D, se constitui assim um termo que é linearizado, dando origem a um coeficiente de arrastre equivalente, linear (C_{D_e}), o qual se otimiza para minimizar os erros da linearização.

$$C_D . |\vec{V}_n| . \vec{V}_n = C_D . |\vec{V}_n| . \vec{V}_n + (C_{D_e} . \vec{V}_n - C_{D_e} . \vec{V}_n) \qquad (3.16)$$

reagrupando

$$C_D . |\vec{V}_n| . \vec{V}_n = C_{D_e} . \vec{V}_n + (C_D . |\vec{V}_n| . \vec{V}_n - C_{D_e} . \vec{V}_n)$$

onde

$$e = C_D . |\vec{V}_n| . \vec{V}_n - C_{D_e} . \vec{V}_n \qquad (3.17)$$

é o erro cometido, que é minimizado originando um coeficiente C_{D_e} otimizado.

Minimizando o erro por mínimos quadrados, se tem que [19]

$$C_{D_e} = C_D \cdot \sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot V_{d.t.} \qquad (3.18)$$

onde $V_{d.t.}$ corresponde ao valor da derivação típica (standard, ou seja σ) das velocidades.

Para a teoria de Airy (utilizada neste trabalho), tem-se que [6]

$$V_{d.t.} = \left|\frac{1}{\sqrt{2}}\right| a.\omega \frac{\cosh(kz)}{\operatorname{senh}(kd)} \qquad (3.19)$$

O termo

$$a.\omega.\frac{\cosh(kz)}{\operatorname{senh}(kd)}$$

corresponde a amplitude (valor máximo) da velocidade que atua em direção normal a um cilíndro em posição vertical (ver Fig. 3.5).

onde:

a = amplitude da onda

ω = frequência da onda

k = constante característica da onda

z = profundidade do ponto referido

d = profundidade média do mar

(Ver Fig. 2.8)

No caso de um cilindro orientado em uma direção arbitrária, se tem que

$$V_{d.t.} = \left|\frac{1}{\sqrt{2}}\right| \cdot |\vec{V}_n| \qquad (3.20)$$

onde:

$|\vec{V}_n|$: é o valor da amplitude da velocidade atuante na direção normal ao cilindro.

De (3.18) tem-se que:

$$C_{D_e} = C_D \cdot \sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot V_{d.t.}$$

$$C_{D_e} = C_D \cdot \left|\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right| \cdot |\vec{V}_n| \qquad (3.21)$$

de onde obtem-se a fórmula de Morison linearizada que fica então como segue:

$$\vec{F} = \rho \frac{D}{2} C_{D_e} . \vec{V}_n + \rho \frac{\pi D^2}{4} . | C_M . \vec{V}_n - (C_M - 1) . \ddot{\vec{X}}_n | \qquad (3.22)$$

Esta fórmula (3.22) resulta de especial interesse, já que de não serem linearizado o termo da força de arraste, ficaria impossível formular a ação da força de Morison através do tempo, como uma expressão harmônica simples, condição indispensável para poder realizar a análise pelo método do domínio na frequência.

3.4 - FORMAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA FÓRMULA DE MORISON, PARA AS ANÁLISES A SEREM REALIZADAS

Como havia sido expressado anteriormente, o problema de análise dinâmico é abordado abaixo os pontos de vistas:

- com domínio na frequência
- com domínio no tempo

Por isto é necessário formular as solicitações, tendo como base os domínios correspondentes.

3.4.1 - Cargas com Domínio no Tempo

Para esta análise no tempo, será necessário determinar as cargas atuantes em cada um dos instantes requeridos. Com essa idéia, é discretizado cada período de tempo da onda em um número de intervalos, de uma maneira tal que será conveniente economicamente e que permita que sejam alçancados re-

sultados verdadeiros (ou seja, que haja boa convergência).

Por estar a fórmula de Morison (3.14) originalmente formulada no tempo, o método de análises com domínio no tempo, permite a utilização dessa fórmula, sem necessidade de linearizar o termo da velocidade na força de arraste (3.15). Na aplicação deste método de análise dinâmica foram consideradas ambas possibilidades, ou seja, com o termo quadrático de velocidades e com o termo de velocidades linearizados. Este fator permite fazer comparações de resultados e posteriormente, algumas recomendações em quanto a utilização de ambos métodos.

As fórmulas utilizadas para a determinação das intensidades de carga nos membros da estrutura são então (domínio no tempo):

a) termo quadrático da velocidade:

$$\vec{F} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \rho \frac{D}{2} C_D |\vec{V}_n| \begin{Bmatrix} U_n \\ V_n \\ W_n \end{Bmatrix} + \rho \frac{D^2}{4} \pi C_M \begin{Bmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{V}_n \\ \dot{W}_n \end{Bmatrix} \qquad (3.23)$$

b) termo de velocidade linearizada

$$\vec{F} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \rho \frac{D}{2} C_{D_e} \begin{Bmatrix} U_n \\ V_n \\ W_n \end{Bmatrix} + \rho \frac{D^2}{4} \pi C_M \begin{Bmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{V}_n \\ \dot{W}_n \end{Bmatrix} \qquad (3.24)$$

Note-se que o termo de aceleração correspondente a estrutura ($\ddot{\vec{X}}_n$) que apareca na fórmula (3.14), não está nas equações (3.23) nem (3.24), a qual se deve a que esse termo seja tratado de uma forma mais particular no ponto 4.5 intitulado "Efeito da Massa Adicionada".

3.4.2 - Cargas com Domínio na Frequência

A definição das cargas atuantes no problema de análise dinâmica em frequência, é mais rigoroso e exigente que o da análise no tempo. As cargas atuantes devem representar uma equação harmônica simples, que atuando no tempo deverá ter uma expressão do tipo:

$$F(t) = P \cos(\omega t + \psi) \qquad (3.25)$$

onde:

F(t) = força atuante no tempo

P = valor máximo da carga

ω = frequência da expressão harmônica

t = tempo variável

ψ = ângulo de desfasagem

(Fig. 3.6).

Estas expressões de carga ao serem adaptadas para atuar no domínio da frequência terão expressões do tipo:

$$F(\omega) = P.|\cos(\psi) + i\,\mathrm{sen}(\psi)| \qquad (3.26)$$

onde:

$F(\omega)$ = força dependente da frequência

P = módulo da carga

ψ = ângulo de desfasagem

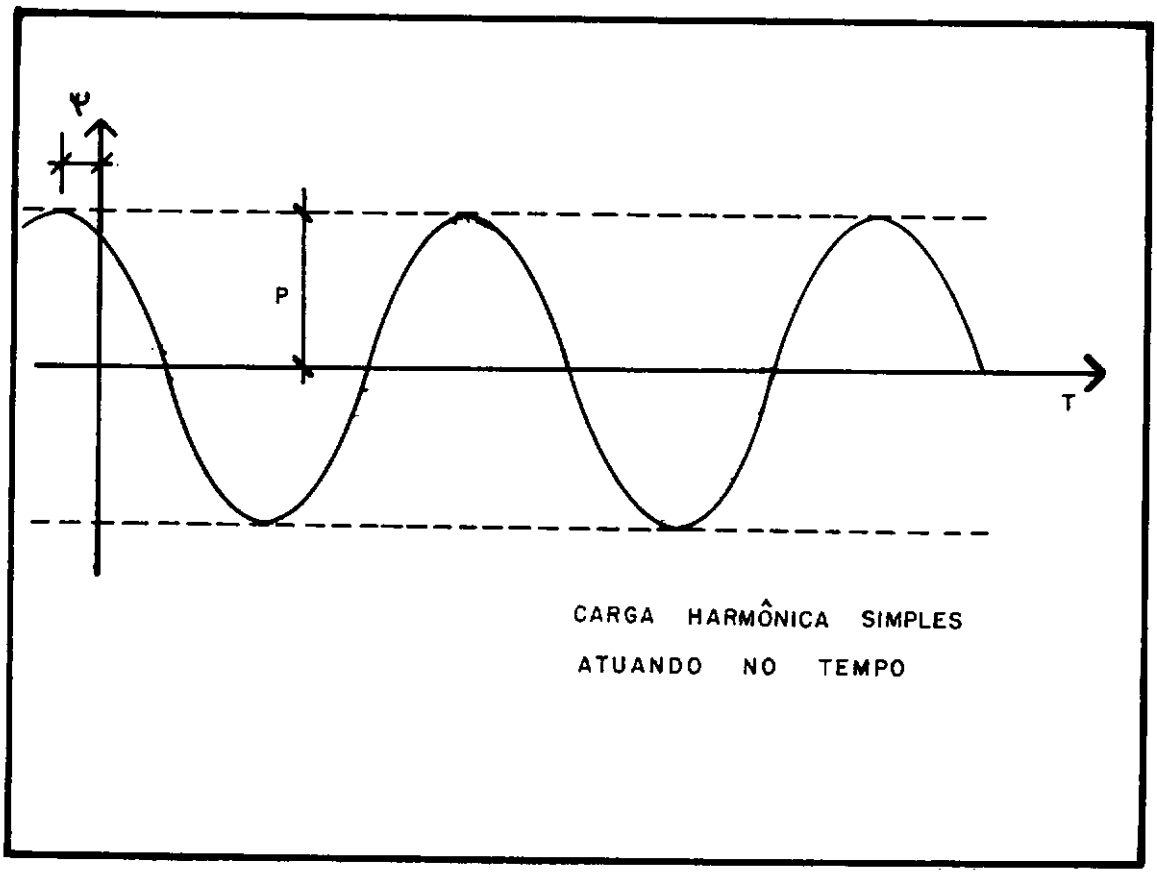

Ψ
P
T
CARGA HARMÔNICA SIMPLES
ATUANDO NO TEMPO

Fig. 3.6

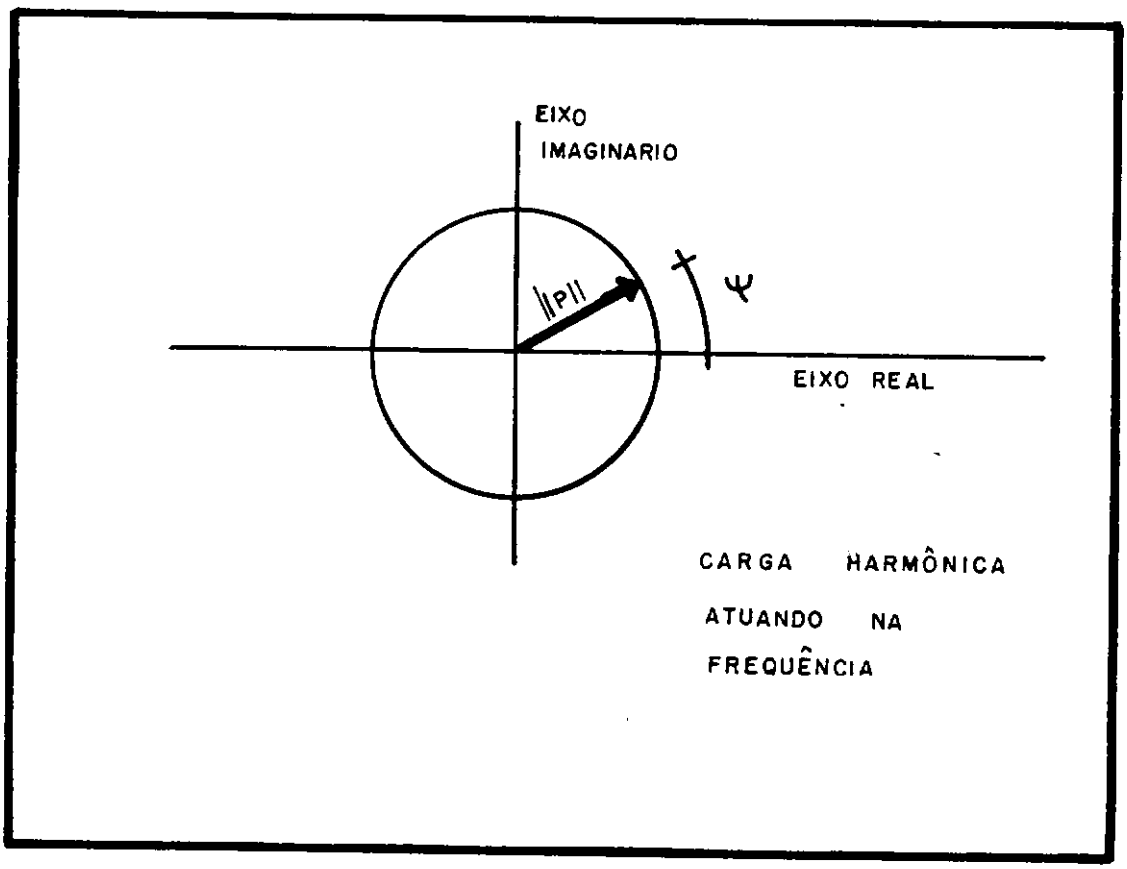

EIXO
IMAGINARIO
||P||
Ψ
EIXO REAL
CARGA HARMÔNICA
ATUANDO NA
FREQUÊNCIA

Fig. 3.7

Para construir uma expressão do tipo (3.26), parte-se da fórmula de Morison linearizada (3.22) na qual não se coloca o termo de aceleração correspondente a estrutura ($\ddot{\vec{X}}_n$).

O efeito desse termo de aceleração se leva em conta em outra parte da análise dinâmica, pelo que é o objeto do ponto 4.4 intitulado "Efeito da Massa Adicionada".

Se partimos da seguinte expressão

$$\vec{F} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \rho \frac{D}{2} C_{D_e} \begin{Bmatrix} U_n \\ V_n \\ W_n \end{Bmatrix} + \rho \frac{D^2}{4} \pi C_M \begin{Bmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{V}_n \\ \dot{W}_n \end{Bmatrix} \qquad (3.27)$$

E num princípio, igual a expressão (3.24).

Partindo da teoria de Airy, determinam-se os valores de $\vec{V}_n$ e $\dot{\vec{V}}_n$ da seguinte maneira:

de (3.10, 3.11) e (2.52 a 2.57) tem-se:

Equação (2.52)

$$U = a.\omega. \frac{\cosh|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\cos(kx_w - \omega t).\cos\Theta$$

Equação (2.53)

$$V = a.\omega. \frac{\cosh|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\cos(kx_w - \omega t).\operatorname{sen}\ \Theta$$

Equação (2.54)

$$W = a.\omega. \frac{\operatorname{senh}|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\operatorname{sen}(kx_w - \omega t)$$

onde, de (3.10)

$$U_n = a.\omega. \frac{\cosh|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\cos(kx_w - \omega t).\cos\ \Theta$$

$$- a.\omega. \frac{\cosh|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\cos(kx_w - \omega t).\cos\Theta.C_x^2$$

$$- a.\omega. \frac{\cosh|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\cos(kx_w - \omega t).\operatorname{sen}\Theta.C_y.C_x$$

$$- a.\omega. \frac{\operatorname{senh}|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|} .\operatorname{sen}(kx_w - \omega t).C_z.C_y \qquad (3.28)$$

agrupando pode-se expressar

$U_n = U_n(x_w, t)$ da seguinte forma:

$$U_n = Al_x.\cos(kx_w - \omega t) + Bl_x.\operatorname{sen}(kx_w - \omega t) \qquad (3.29)$$

onde:

$$Al_x = a.\omega.\ \frac{\cosh|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|}\ |\cos\Theta.(1-C_x^2)-\operatorname{sen}\Theta.C_x.C_y| \qquad (3.30)$$

$$Bl_x = -a.\omega\ \frac{\operatorname{senh}|k(z+d)|}{\operatorname{senh}|kd|}\ |C_x.C_z| \qquad (3.31)$$

Por meio de um procedimento análogo, chega-se a seguinte expressão para a aceleração

$$\dot{U}_n = Al_x.\omega.\operatorname{sen}(kx_w-\omega t)-Bl_x.\omega.\cos(kx_w-\omega t) \qquad (3.32)$$

onde Al_x e Bl_x correspondem a (3.30) e (3.31).

Tomando a componente na direção x da equação (3.27)

$$F_x = |\rho\ \frac{D}{2}\ C_{D_e}|U_n + |\rho\ \frac{D^2}{4}\ \pi\ C_M|\dot{U}_n \qquad (3.33)$$

se:

$$E_D = \rho\ \frac{D}{2}\ C_{D_e} \qquad (3.34)$$

$$E_I = \rho\ \frac{D^2}{4}\ \pi\ C_M \qquad (3.35)$$

Se pode expressar (3.33) como

$$F_x = E_D.U_n + E_I.\dot{U}_n \qquad (3.36)$$

Tomando (3.29) e (3.32)

$$F_x = E_D|A1_x \cos(kx_w-\omega t) + B1_x.\operatorname{sen}(kx-\omega t)|$$

$$+ E_I|A1_x.\omega.\operatorname{sen}(kx_w-\omega t) - B1_x.\cos(kx_w-\omega t)| \qquad (3.37)$$

Esta expressão pode-se reagrupar da seguinte maneira:

$$F_x = A2_x.\cos(kx_w-\omega t) - B2_x.\operatorname{sen}(kx_w-\omega t) \qquad (3.38)$$

onde

$$A2_x = E_D.A1_x - E_I.\omega.B1_x \qquad (3.39)$$

$$B2_x = - E_D.B1_x - E_I.\omega.A1_x \qquad (3.40)$$

baseado na relação trigonométrica

$$\cos(a + b) = \cos a.\cos b - \operatorname{sen} a.\operatorname{sen} b \qquad (3.41)$$

chega-se a

$$F_x = P \cos|(kx_w - \omega t) + \psi| \qquad (3.42)$$

onde

$$P = \sqrt{(A2_x)^2 + (B2_x)^2} \tag{3.43}$$

$$tg(\psi) = \left(\frac{B2_x}{A2_x}\right) \tag{3.44}$$

Esta expressão (3.42) formulada a partir de (3.27) corresponde a imagem no tempo da fórmula complexa, fórmula complexa que constitue a solução deste problema, e deve ser do tipo de (3.26). Assim, transformando (3.42) por meio da equação de Euler

$$e^{ia} = \cos a + i \operatorname{sen} a \tag{3.45}$$

Teremos as seguintes transformações:

Parte real:

$$F_x = P \cos|(kx_w + \psi) - \omega t|$$

Número complexo:

$$F_x = P\{\cos|(kx_w + \psi)-\omega t| + i\operatorname{sen}|(kx_w + \psi)-\omega t|\} \tag{3.46}$$

Número complexo

$$F_x = P\, e^{i|(kx_w+\psi)-\omega t)|}$$

$$F_x = P\, e^{i(kx_w+\psi)} \cdot e^{i(-\omega t)} \tag{3.47}$$

Esta expressão, ao operar-se dentro da equação que rege o comportamento dinâmico, abaixo uma formulação em frequência (Capítulo 4), permanece atuando somente no domínio da frequência e não no domínio do tempo, resultando a seguinte expressão:

$$F_x = P\, e^{i(kx_w + \psi)} \tag{3.48}$$

como se utiliza mais usualmente

$$F_x = P\left|\cos(kx_w + \psi) + i\ \mathrm{sen}(kx_w + \psi)\right| \tag{3.49}$$

Para concluir, logo ao realizar deduções análogas nas direções y, z, tem-se uma expressão final

$$\vec{F} = \left\{ \begin{array}{l} P_x\left|\cos(kx_w + \psi_x) + i\ \mathrm{sen}(kx_w + \psi_x)\right| \\ P_y\left|\cos(kx_w + \psi_y) + i\ \mathrm{sen}(kx_w + \psi_y)\right| \\ P_z\left|\cos(kx_w + \psi_z) + i\ \mathrm{sen}(kx_w + \psi_z)\right| \end{array} \right\} \tag{3.50}$$

3.5 - EXEMPLO COMPARATIVO DO EFEITO DA LINEARIZAÇÃO DO TERMO DE VELOCIDADES

Com a idéia de comparar as diferenças nos resultados obtidos pela aplicação da fórmula de Morison, tendo sido elaborado um exemplo singelo, que permite visualizar a magnitude das diferenças.

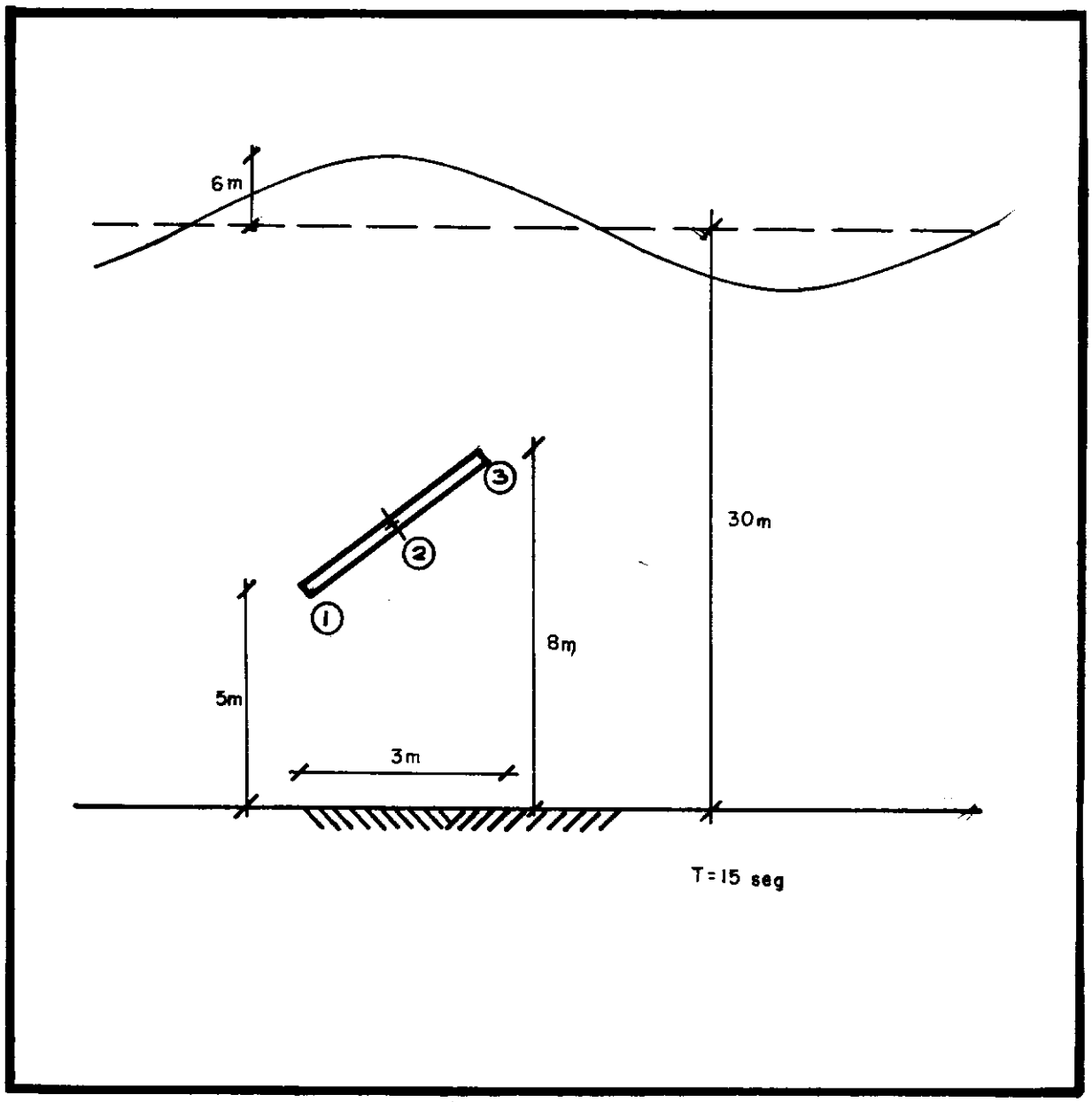


Fig. 3.8 - Exemplo

Dados do mar:

Amplitude	6 m
Frequência	0.4189 rad/seg
Período	15 seg.
Densidade relativa da água	102.0 $K.s^2/m^4$
Profundidade	30 m

Coeficiente inércia 1.5

Coeficiente arraste 1.0

A solicitação na gráfica é a força normal ao membro no ponto intermediário 2.

Em base aos resultados obtidos se elabora o seguinte gráfico no qual podem podem-se visualizar as diferenças.

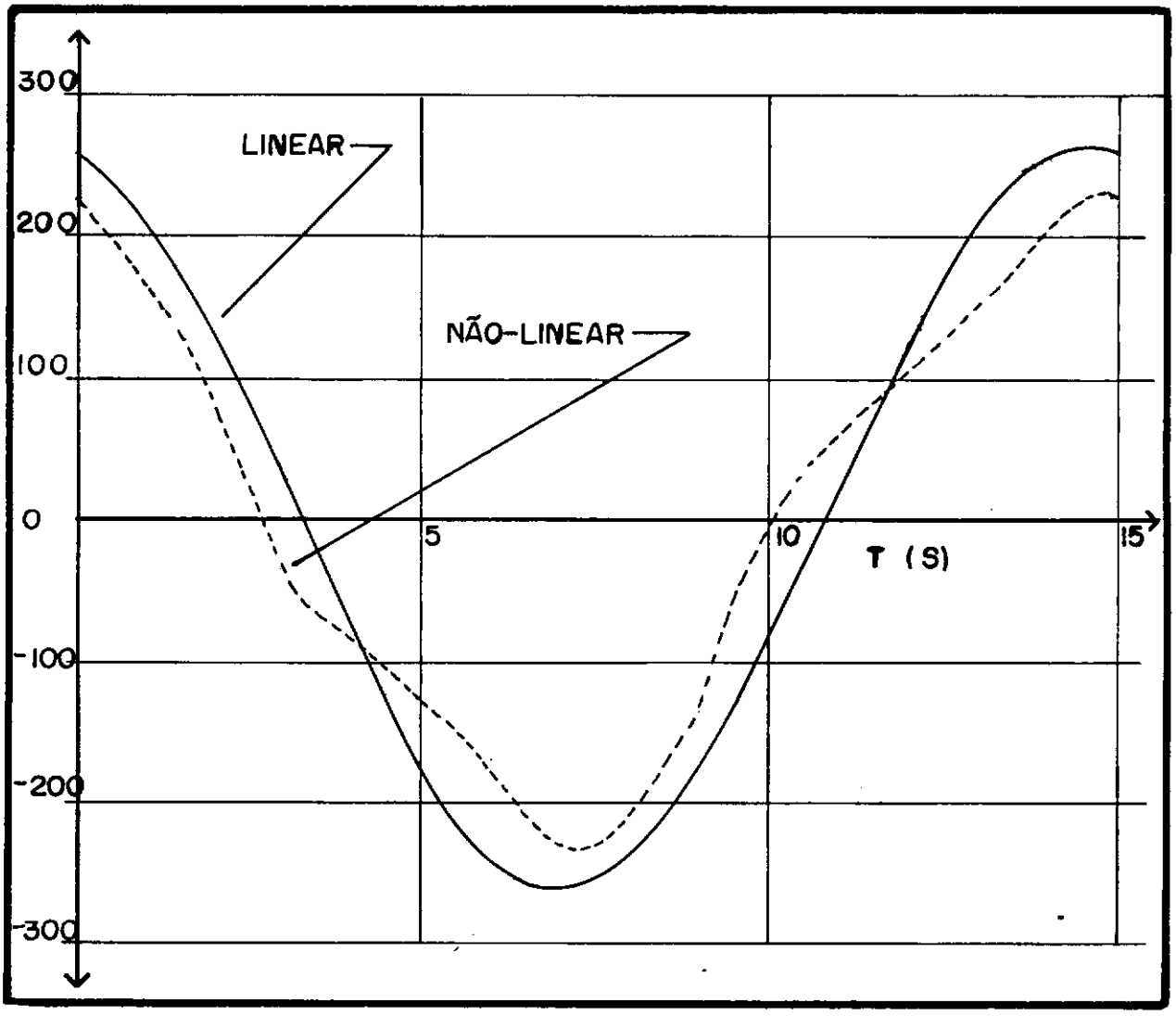


Fig. 3.9 - Resultados Comparativos

TEMPO (s)	LINEARIZADO	QUADRÁTICO
1.5	178.6628	136.8394
3.0	31.7691	- 35.3971
4.5	- 127.2594	- 104.7387
6.0	- 237.6791	- 171.9684
7.5	- 257.3135	- 225.8539
9.0	- 178.6624	- 136.8395
10.5	- 31.7692	35.3970
12.0	127.2594	104.7387
13.5	237.6792	171.9685
15.0	257.3135	225.8539

Em base a estes resultados, pode-se concluir que para casos como o analisado, o efeito da linearização é de aplicação muito recomendável, o que simplifica significativamente as expressões de forças por sucessivas ondas, enquanto que os erros cometidos sem ser realmente depreciáveis são de menor importância já que outros erros maiores são cometidos na realização deste tipo de análise. Também é importante notar que o efeito destes erros é ao lado da segurança.

CAPÍTULO IV

MODELOS DE ANÁLISES

4.1 - INTRODUÇÃO

O comportamento dos corpos sob a ação das forças, é um dos problemas que tradicionalmente tem interessado ao homem. O engenheiro, têm-se encarregado entre outras coisas, de entender este problema e de elaborar uma formulação que pudesse resolver uma generalidade de problemas similares a este. Alguns problemas deste tipo tem sido resolvidos por meio de modelos matemáticos que dão uma solução para o corpo como um todo. Um exemplo deste, pode ser um problema de flexão de placa, cuja solução estaria dada por uma série de Fourier, a qual fornece um valor exato da flexão para um ponto qualquer da placa.

Se a forma da placa é muito irregular e se as cargas atuantes são também irregulares, será impossível obter uma solução fechada, que determine os valores exatos da solução em todos os pontos. Começa-se então a pensar na possibilidade de obter soluções para alguns pontos do corpo. A idéia agora é obter informações acerca do corpo completo (o todo) em base ao entendimento da solução de partes do mesmo.

Após esta concepção surge o método dos elementos finitos. Sua interpretação poderia ser visualização física de um corpo ou estrutura como um conjunto de elementos ensamblados

entre si, e interconectados por meio de pontos nodais [34].

O desenvolvimento deste método nos últimos anos tem sido impressionante, assim como sua utilização para resolver distintos problemas de engenharia.

No presente trabalho, os elementos utilizados são idealizados como unidimensionais e assim, discretizam a estrutura como um conjunto destes elementos. Se constroi desta maneira o modelo estrutural tridimensional que é de uso muito generalizado.

Este Capítulo encarrega-se de descrever o modelo escolhido para a simulação do comportamento da estrutura, assim como os métodos selecionados para a realização de análise estrutural dinâmica correspondente.

4.2 - MODELO ESTRUTURAL

As estruturas utilizadas para a busca e a exploração petroleira off-shore são em geral de dois tipos:

- estruturas de aço, compostas por membros principais e um grande número de elementos mas pequenos, com uma plataforma situada na parte superior, que é o lugar onde são realizadas as operações. Este tipo de estrutura são as de uso mais comum na atualidade.

- Estruturas de gravidade, compostas por uma imensa base de concreto situada no fundo do mar e por pernas ou colunas, de diâmetros variáveis (geralmente em número de três ou quatro), que sustentam em seu topo uma plataforma bastante rígida onde realizam-se todas as operações.

O modelo escolhido para a idealização destas estruturas, baseia-se nas formulações dos elementos finitos. Ademais, tem sido adotadas as hipóteses básicas da linearidade geométrica e de linearidade do material.

A equação que rege o comportamento do sistema estrutural é:

$$\underset{\sim}{M}\,\ddot{\underset{\sim}{X}}(t) + \underset{\sim}{C}\,\dot{\underset{\sim}{X}}(t) + \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{X}(t) = \underset{\sim}{P}(t) \qquad (4.1)$$

onde:

$\underset{\sim}{M}$ = matriz de massa do sistema

$\underset{\sim}{C}$ = matriz de amortecimento do sistema

$\underset{\sim}{X}(t)$ = vetor de deslocamento de lugar dos modos da estrutura (dependente do tempo)

$\underset{\sim}{P}(t)$ = vetor de cargas devidas a ondas, atuantes sobre os nós da estrutura (dependente do tempo).

Os elementos do sistema são elementos de viga, os quais, fixos uns aos outros em seus extremos constituem a estrutura.

4.2.1 - Rigidez da Estrutura

A rigidez da estrutura é representada adequadamente pela montagem das rigidez de cada membro da viga em uma matriz global. As matrizes correspondentes a cada elemento de viga inclue os efeitos de deformações por força axial e por corte. |[21]|

As propriedades geométricas de cada viga são calculadas em base ao diâmetro (DIAM), a espessura (ESP) e a longitude (L), tais propriedades são:

$$A = \pi * ESP * (DIAM-ESP)$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{64} * |DIAM^4-(DIAM-2ESP)^4|$$

$$I_x = 2I_z$$

E = Módulo de elasticidade do material

G = Módulo de corte do material

Para as deformações por corte tem-se que:

$$\Phi = 1 + \frac{12\ EI_y}{GL^2 A_z}$$

$$\Omega = 1 + \frac{12\ EI_z}{GL^2\ A_y}$$

onde,

A_y = área de corte na direção y

A_x = área de corte na direção x

A matriz de rigidez por elementos será exposta na Fig. 4.1.

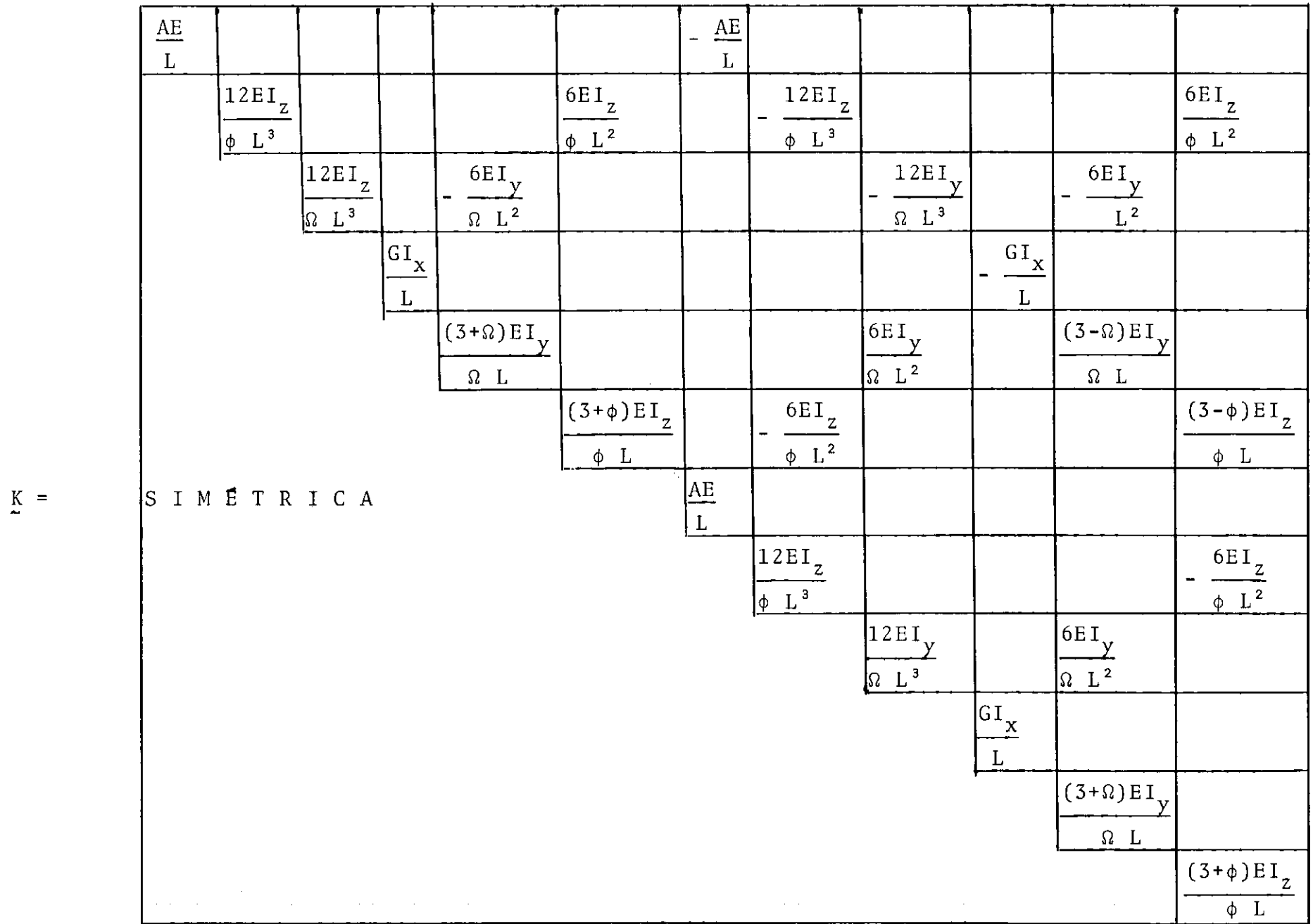


Fig. 4.1 - Matriz de rigidez de uma viga

4.2.2 - Massa de Estrutura

Para considerar o efeito de massa, são levadas em conta as contribuições de cada um dos membros, assim como a massa d'água ao redor do membro (que produz efeitos de inércia) e também o peso total da plataforma (incluindo equipamento, peso próprio, etc.)

Para levar em conta a quantidade de massa dos membros, será escolhido um modelo de massas consistentes $|^{21}|$. Esta matriz de massa de cada membro, resulta da discretização das massas de acordo com o procedimento estático utilizado para calcular as forças $|^{11}|$, ou seja, mediante a contribuição das massas a cada grau de liberdade utilizando as funções de interpolação de uma viga. A matriz de massa para cada elemento será então especificada na Figura 4.2, onde:

ρ = peso específico do material (kg/m^3)

$\underset{\sim}{M} = \rho AL.$

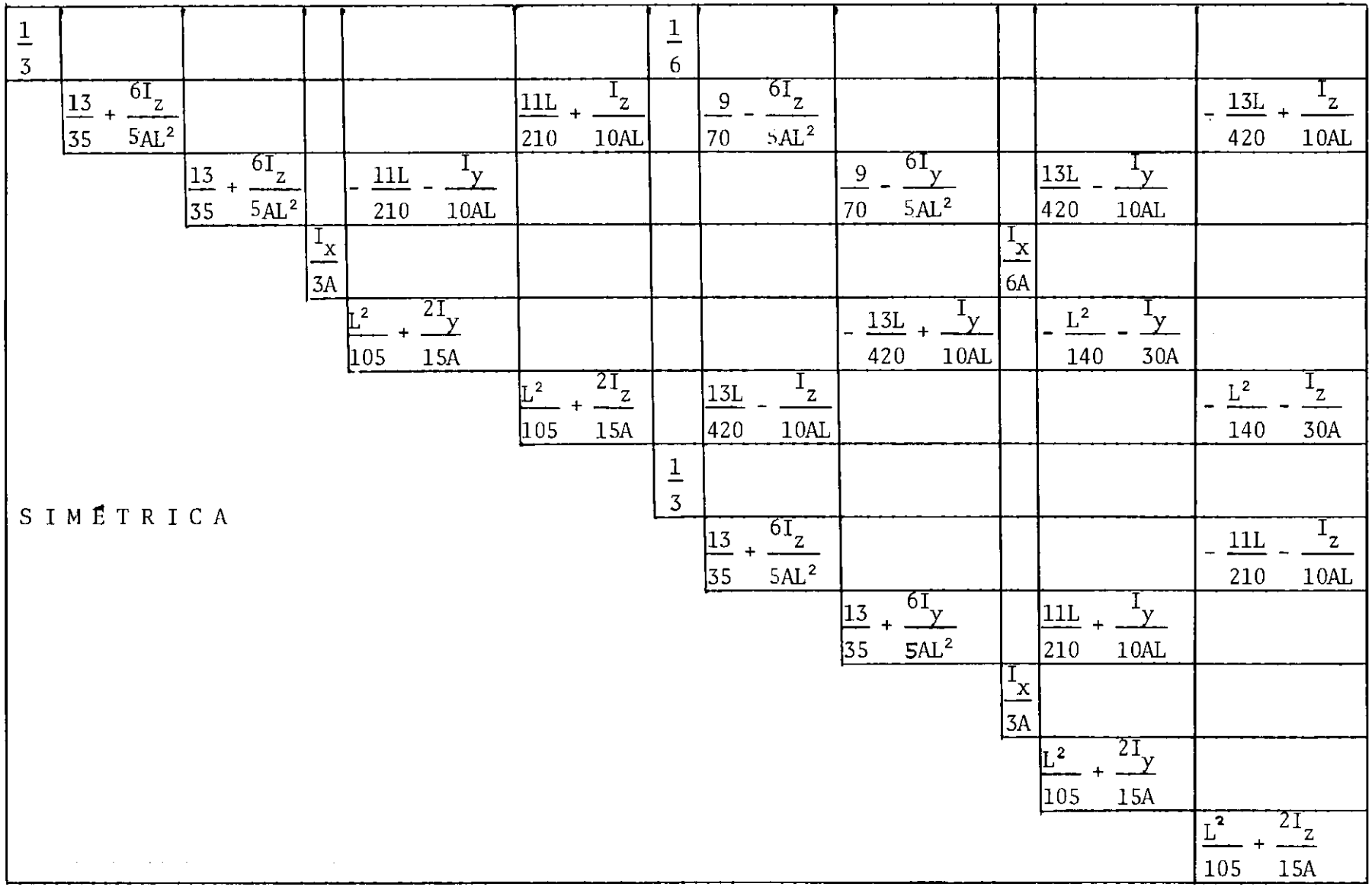


Fig. 4.2 - Matriz de massa de uma viga

A massa ao redor do membro em movimento, é um efeito bastante importante para este tipo de estruturas, portanto é tratado de uma maneira mais detalhada na seção 4.5.

A massa correspondente ao peso total da plataforma, no topo da estrutura, deve ser levada em consideração em forma muito cuidadosa. Esta massa, pode alterar a maneira significativa os períodos naturais de vibração da estrutura. Seu efeito na estrutura é levado em conta como massas concentradas que atuam nos pontos nodais da plataforma no topo da estrutura. Desta maneira, esta massa será associada somente aos graus de liberdade translacionais.

4.2.3 - Amortecimento da Estrutura

O amortecimento de uma estrutura, é um fenômeno bastante complexo o qual constitui uma área de muita incerteza, já que o efeito de seu comportamento é de difícil simulação.

O amortecimento estrutural, deve-se a fricção interna dentro da mesma estrutura e é proporcional a deflexão da estrutura [11, 15].

Também existe um efeito importante que é o amortecimento viscoso, o qual é proporcional a velocidade da estrutura e deve-se a presência de um fluído nos arredores da estrutura. Em nosso caso, o fluído de que trata-se é água.

Para quantificar o efeito do amortecimento e introduzí-lo na equação (4.1), pelo geral soma-se o amortecimento estrutural ao amortecimento viscoso. Esta suposição é feita devido principalmente a pouca influência que se tem do amortecimento na equação de movimento (4.1) |[15]|. Em geral, os valores do amortecimento estão entre 1% e 5% do amortecimento crítico |[3, 11, 15]|. Nos exemplos a serem realizados neste trabalho estes valores limites do amortecimento são respeitados.

O amortecimento utilizado é do tipo proposto por Rayleigh |[3, 11, 15, 18, 20]| o qual é do tipo:

$$\underset{\sim}{C} = \alpha \underset{\sim}{K} + \beta \underset{\sim}{M} \qquad (4.2)$$

onde:

α e β = são coeficientes que podem ser utilizados para determinar a porcentagem do amortecimento crítico em um par qualquer de modos de vibração livre da estrutura.

Para determinar α e β é necessário conhecer os valores de duas frequências de vibração quaisquer da estrutura.

As equações para determinar os valores de α e β são |[18]|:

$$\beta + \alpha \omega_1^2 = 2\omega_1 \xi_1 \qquad (4.3)$$

$$\beta + \alpha\ \omega_2^2 = 2\omega_2\ \xi_2$$

onde:

ω_1 e ω_2 = são os valores das frequências de vibração da estrutura.

ξ_1 e ξ_2 = são as porcentagens do amortecimento crítico associados aos modos de vibração escolhidos.

4.3 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A teoria de ondas proposta por Airy, descreve o comportamento do mar através de uma formulação eminentemente linear. A fórmula de Morison traduz o efeito do mar em cargas atuantes sobre a estrutura. Esta fórmula de Morison, logo de algumas considerações numéricas (seção 3.3), também têm efeitos lineares. As cargas atuantes sobre a estrutura são portanto cargas harmônicas simples, de frequência ω e do tipo:

$$\underset{\sim}{F}(t) = \underset{\sim}{P}\ \cos(\omega t + \psi) \qquad (4.4)$$

onde $\underset{\sim}{P}\ \cos(\omega t + \psi)$ corresponde a parte real do vetor complexo

$$\underset{\sim}{F} = \underset{\sim}{P}\ e^{i(\omega t + \psi)} \qquad (4.5)$$

onde:

$$\underset{\sim}{F} = \left| \underset{\sim}{P} \cos(\psi) + i\ P\ \text{sen}(\psi) \right| .\ e^{i\omega t} \qquad (4.6)$$

$$\underset{\sim}{F} = \underset{\sim}{R}\ e^{i\omega t} \qquad (4.7)$$

Os sistemas estruturais com comportamento linear (modelo escolhido neste caso) tem a propriedade de produzir como resposta um movimento harmônico, quando são submetidos a cargas de comportamento harmônico. Assim mesmo, a resposta terá a mesma frequência da excitação [17, 20, 25, 30].

A resposta será dada pela parte real de: [25]

$$\underset{\sim}{X}(t) = \underset{\sim}{X}\ e^{i\omega t} \qquad (4.8)$$

onde $\underset{\sim}{X}$ é um vetor complexo.

A relação será dada por:

$$\underset{\sim}{R} = \left| \underset{\sim}{K} - \omega^2 \underset{\sim}{M} + i\omega\ \underset{\sim}{C} \right| \underset{\sim}{X} \qquad (4.9)$$

onde:

$\underset{\sim}{K}$ = matriz de rigidez do sistema

$\underset{\sim}{M}$ = matriz da massa do sistema

$\underset{\sim}{C}$ = matriz de amortecimento do sistema

i = unidade imaginária ($i = \sqrt{-1}$)

Este método que permite a obtenção de uma resposta em frequência da estrutura é bastante prático e de formulação computacional relativamente fácil. Permite, ademais, resolver o sistema mediante uma solução matemática fechada, ou seja, uma solução exata sem mais aproximações que as do modelo estrutural proposto.

Para a boa compreensão do modelo estrutural que está sendo utilizado é indispensável entender o comportamento do mar e a interação existente entre o mar e a estrutura, da qual resultam as cargas atuantes sobre a estrutura.

4.3.1 - O Modelo do Mar

Como foi explicado no Capítulo II, o comportamento do mar tem sido descrito por meio da teoria de Airy. Este descreve um campo de acelerações e velocidades que posteriormente gera as cargas sobre a estrutura.

Para o cálculo das cargas de sucessão de ondas atuantes sobre os membros da estrutura, será necessário determinar qual das seguintes posições ocupa o membro:

a) completamente molhado
b) completamente seco
c) parcialmente molhado

Para determinar estas posições relativas, se aplica, neste caso a simplificação proposta por Airy para a superfície do mar. Esta consiste em supor que a profundidade do mar é muito maior que a amplitude da onda. Desta maneira, deprecia-se a amplitude da onda e supõe-se que a linha que determina se o membro é interceptado ou não pela onda, é o nível de águas tranquilas (N.A.T.) (Fig. 4.3).

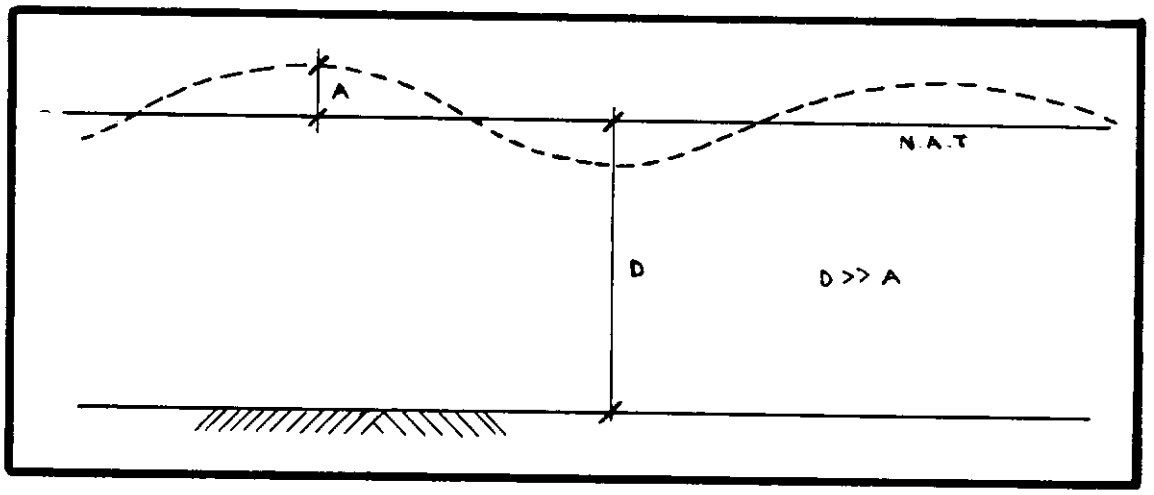


Fig. 4.3 - Efeito de linearização da superfície do mar

É importante notar que esta linearização da condição de contorno da superfície do mar é indispensável para se ter uma formulação linear do comportamento do mar. Esta consideração leva a uma aproximação na análise. O erro que se comete com esta consideração, é avaliado em um exemplo particular que é apresentado mais adiante.

a) Membro completamente molhado

O membro completamente molhado, é aquele que se encontra por debaixo do N.A.T. As solicitações se determinam na base da aplicação da fórmula de Morison linearizada (Eq. 3.27) nos extremos e no ponto médio do membro (Fig. 4.4).

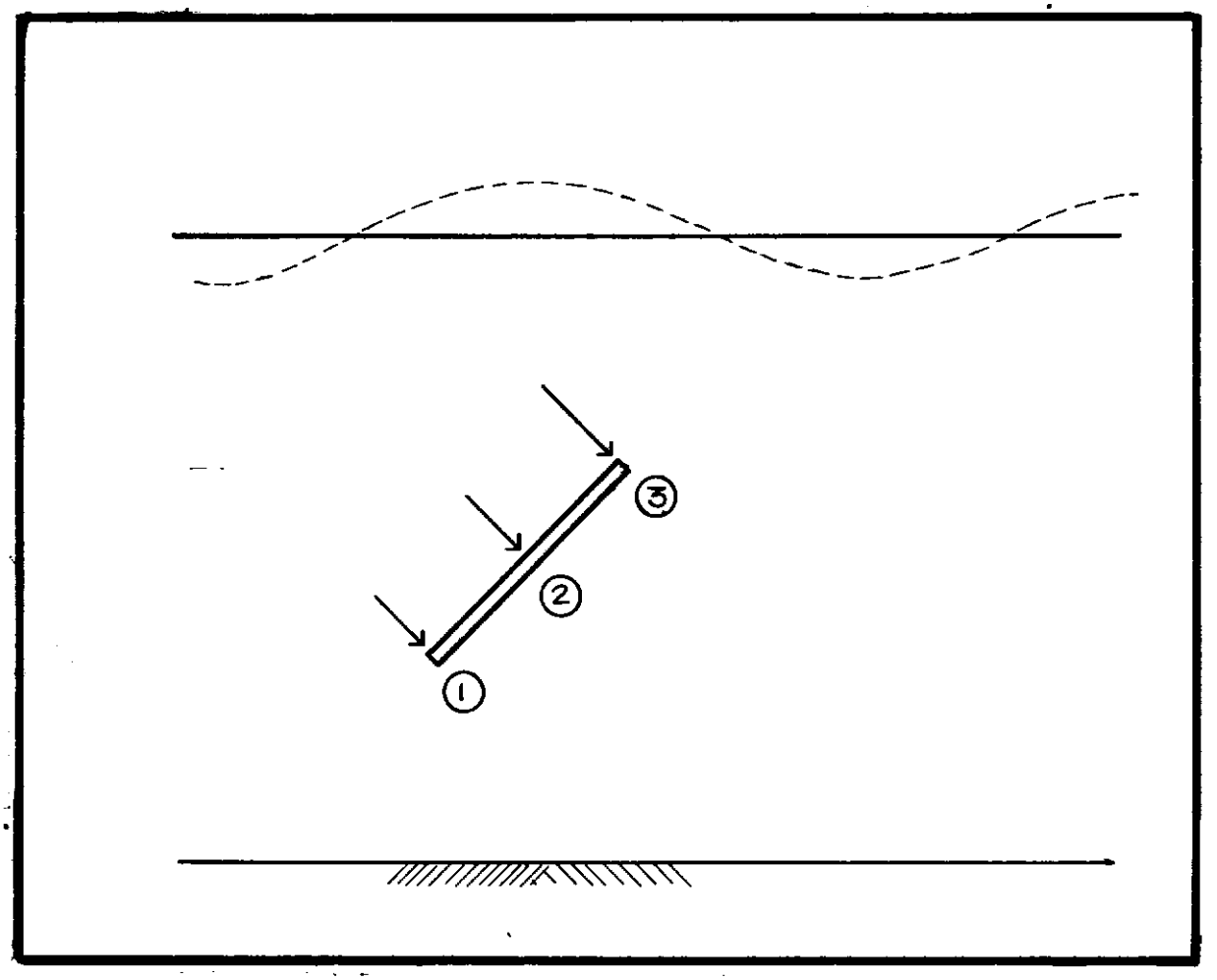


Fig. 4.4 - Membro completamente submergido (molhado)

Os resultados da aplicação da equação (3.7) são expressados logo por números complexos (Eq. 3.50), cuja parte real atua como carga harmônica.

b) Membro completamente seco

Este caso ocorre quando ambos extremos do membro ficam por cima de N.A.T. Neste caso, o mar não produz cargas sobre o membro (Fig. 4.5)

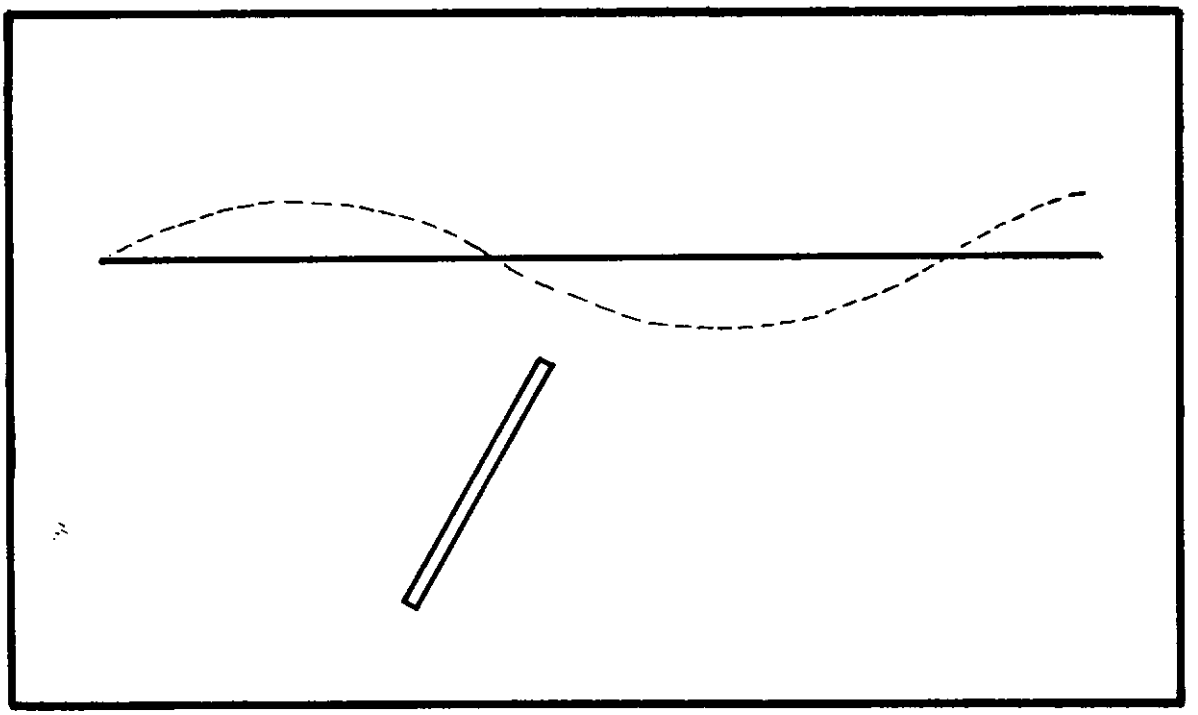


Fig. 4.5 - Membro completamente seco

c) Membro parcialmente molhado

Este caso ocorre quando o membro é intersectado pelo N.A.T. Quando este ocorre, a fórmula de Morison (3.27) é aplicada em três pontos do membro (Fig. 4.6):

- no extremo submergido

- no ponto de interseção do membro com o nível de águas tranquilas (N.A.T.)

- no ponto médio entre o extremo submergido e o ponto situado no N.A.T.

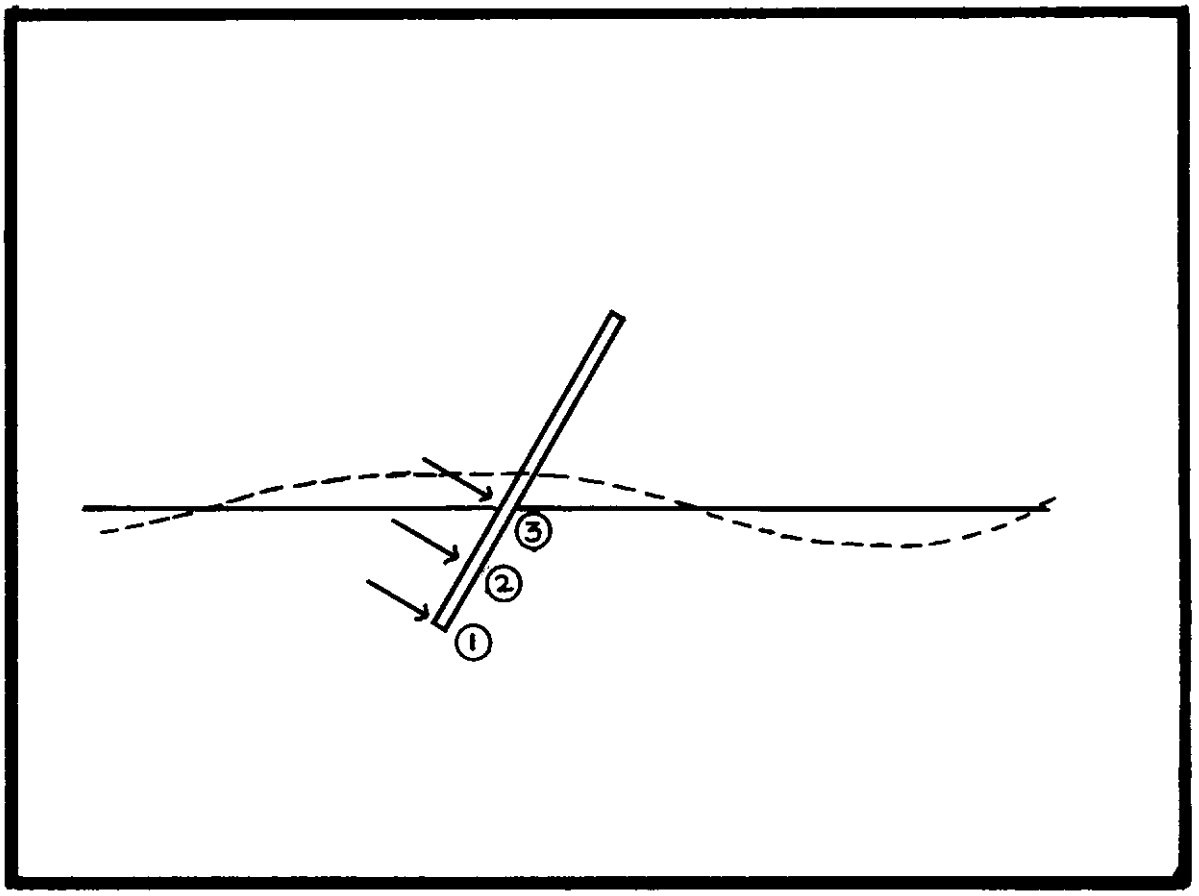


Fig. 4.6 - Membro parcialmente molhado

4.3.2 - Determinação das Ações Nodais

Uma vez definida a posição do membro e dos pontos do mesmo a serem analisados, se passa a determinar o campo de velocidades e acelerações para, posteriormente calcular o

valor das forças por unidade de comprimento atuantes em cada um dos pontos do membro que estão sendo analisados. O valor destas formas se formula como na equação (3.50), onde cada força tem uma componente real y outra imaginária. Estas forças estão expressadas tendo-se como referência os eixos de coordenadas globais.

A etapa seguinte consiste em transformar as intensidades de força em cargas nodais equivalentes atuantes nos nós da estrutura. Para isso é necessário, primeiro que nada, transforme as intensidades de carga ao sistema de coordenadas locais de cada membro. Esta transformação se tem mediante a operação

$$\underset{\sim}{F}_{loc} = \underset{\sim}{R} \cdot \underset{\sim}{F}_{glob} \qquad (4.10)$$

onde:

$\underset{\sim}{F}_{loc}$ = forças expressadas em coordenadas locais

$\underset{\sim}{R}$ = matriz de rotação do membro

$\underset{\sim}{F}_{glob}$ = forças expressadas em coordenadas globais

Esta transformação é feita tanto para a parte real como para a parte imaginária da força atuante sobre o membro.

As forças expressadas em coordenadas locais, serão somente de dois componentes,no plano xy local e no plano xz

local já que a fórmula de Morison calcula forças atuantes normais ao membro (ver Fig. 4.7).

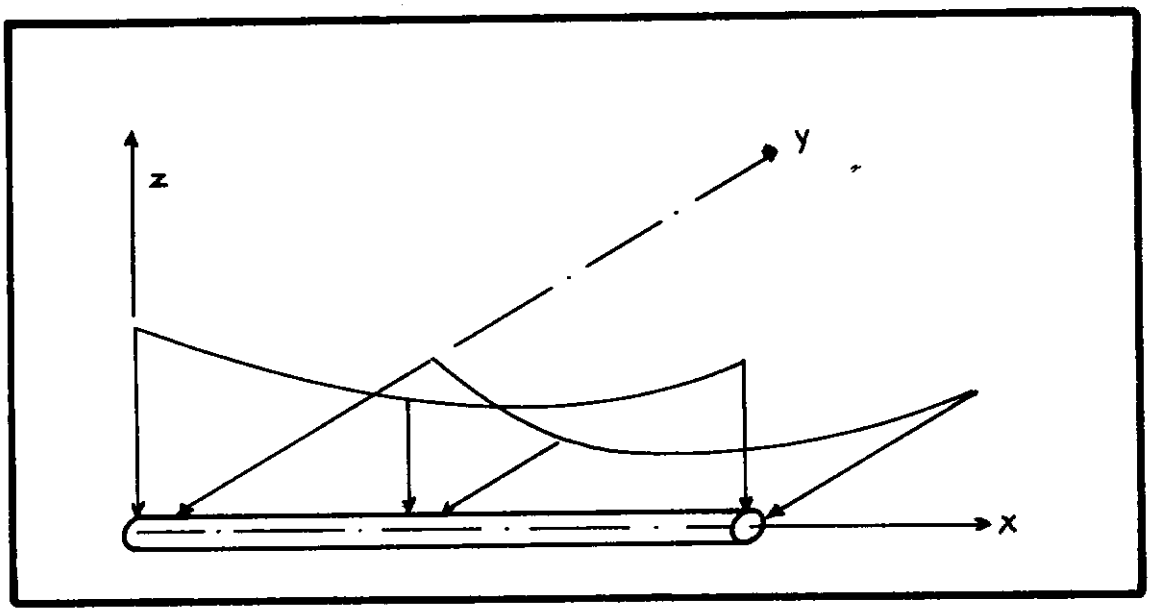


Fig. 4.7 - Forças atuantes referidas aos eixos locais

Para a determinação das ações nodais, se supõe uma variação parabólica de 2º grau. A equação desta parábola será definida a partir dos três valores correspondentes as forças atuantes do membro.

As forças nodais equivalentes serão definidas pela equação. (Fig. 4.8) [31]

$$R_i = \int_0^L q(x).f_i(x)\ dx \qquad (4.11)$$

onde:

$q(x)$ = equação da parábola de cargas

$f_i(x)$ = funções da interpolação qie descrevem o comportamento de uma viga

F_i = ação nodal equivalente

L = longitude do membro

i = ação nodal que está sendo determinada

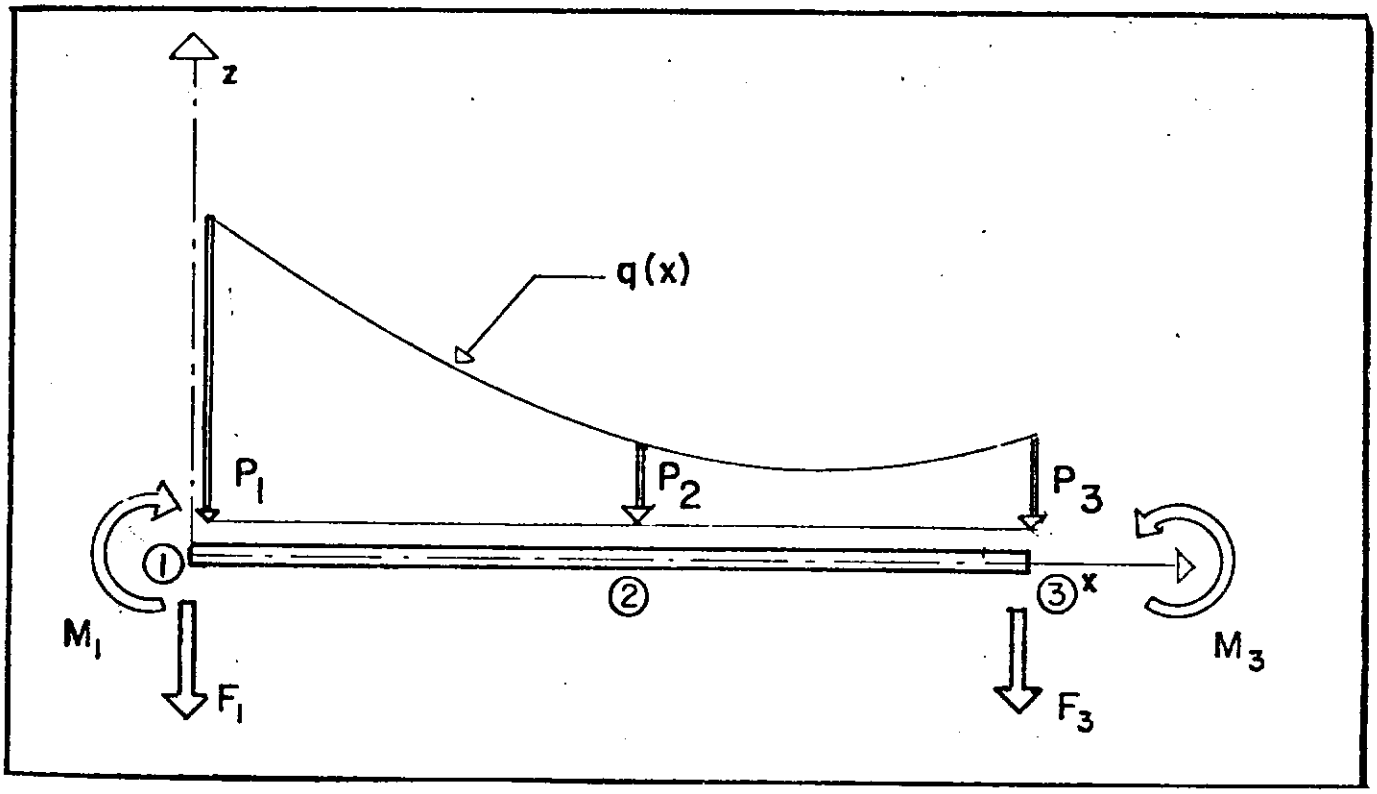


Fig. 4.8 - Ações nodais correspondentes a uma viga

onde:

F_1, F_2, M_1 e M_2 = são os valores das ações nodais equivalentes, atuantes nos extremos dos membros correspondentes aos valores de R_i na equação (4.11).

Neste caso, as funções da forma são:

- para o corte em i (F_1)

$(2x^3 - 3Lx^2 + L^3)/L^3$

- para o momento em i (M_1)

$|(L - x)L)|^2.x$

- para o corte em j (F_2)

$(3Lx^2 - 2x^3)/L^3$

- para o momento em j (M_2)

$(x - L).(x/L)^2$

As cargas nodais que se obtem por este processo são rotadas aos eixos globais de referência e logo sua contribuição é agregada ao vetor de cargas totais atuantes sobre a estrutura. Este processo é realizado tanto para a parte real como a parte imaginária do vetor de cargas.

4.3.3 - Montagem da Matriz que Rege o Comportamento do Sistema

Uma vez definidas as cargas atuantes sobre a estrutura, o passo seguinte consiste em determinar a matriz que rege o comportamento da estrutura. Esta matriz está definida pela equação (4.9).

O processo para a montagem da matriz global do sistema, será ilustrado na Figura 4.9.

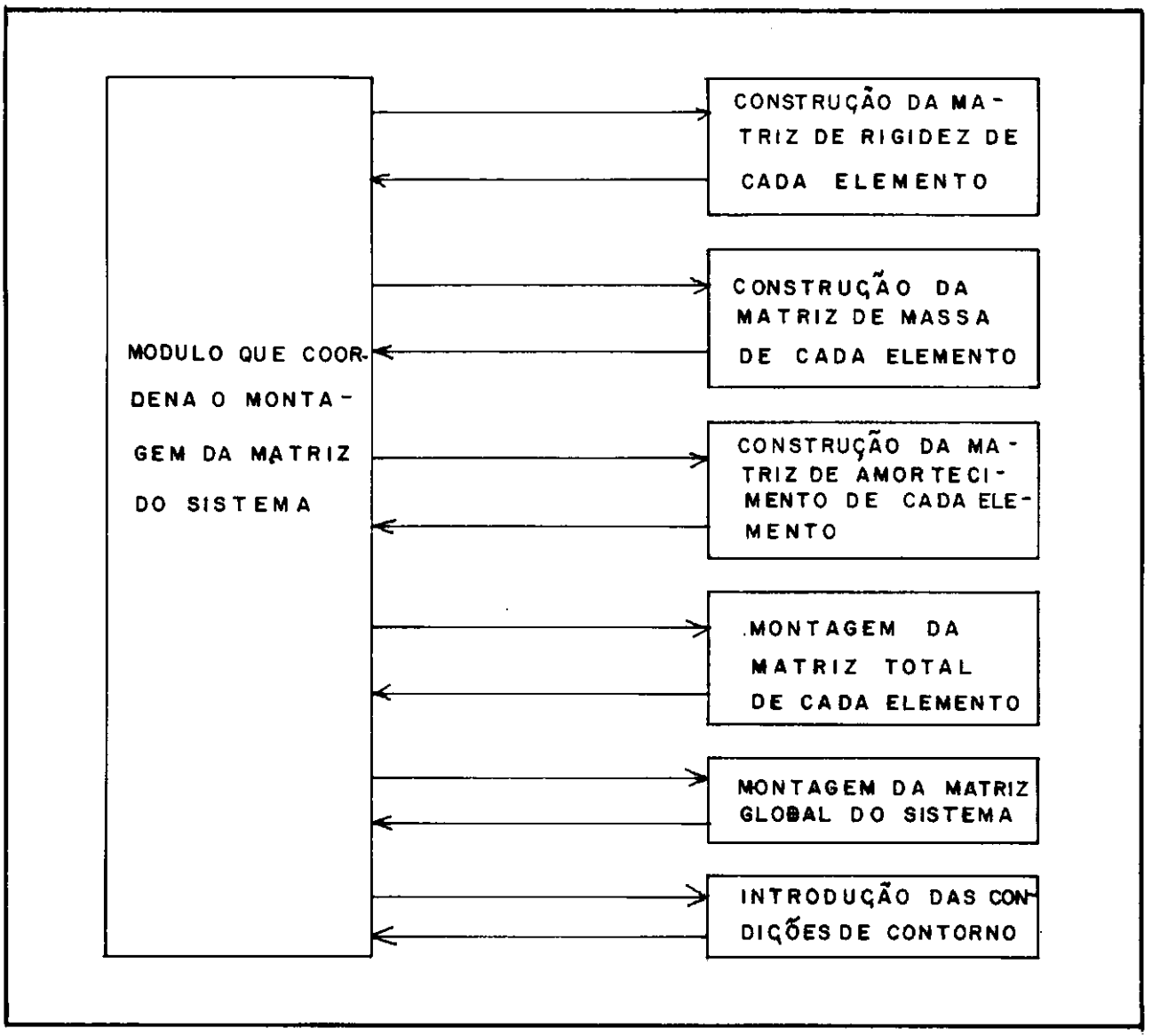


Fig. 4.9 - Processo de montagem da matriz global do sistema

A primeira etapa consiste em construir a matriz de rigidez de cada elemento, a qual foi descrita no ponto 4.2 (Fig. 4.1). Logo, esta matriz deve ser voltada ao eixo de coordenadas globais, segundo a operação

$$\underset{\sim}{ELST}_{glob} = \underset{\sim}{ROT}^{T} \cdot \underset{\sim}{ELST}_{loc} \cdot \underset{\sim}{ROT} \qquad (4.12)$$

onde:

$\underset{\sim}{ELST}_{loc}$ = matriz de rigidez do elemento referido aos eixos locais

$\underset{\sim}{ROT}$ = matriz de rotação do sistema

$\underset{\sim}{ELST}_{glob}$ = matriz de rigidez do elemento referido aos eixos globais

Na segunda etapa o mesmo processo é realizado para a matriz de massa do elemento, ou seja:

$$\underset{\sim}{ELMS}_{glob} = \underset{\sim}{ROT}^{T} \cdot \underset{\sim}{ELMS}_{loc} \cdot \underset{\sim}{ROT} \qquad (4.13)$$

onde:

$\underset{\sim}{ELMS}$ = matriz de massa do elemento correspondente a Figura 4.2.

Na terceira etapa, é construída a matriz de amortecimento, para isso utiliza-se o amortecimento de Rayleigh

[18, 20], construindo-se a matriz de amortecimento para cada elemento como segue:

$$\underset{\sim}{C} = \alpha.\underset{\sim}{ELST} + \beta.\underset{\sim}{ELMS} \qquad (4.14)$$

onde:

α e β = são os coeficientes que definem o tipo de amortecimento e que são explicados na seção 4.2 deste capítulo.

A quarta etapa consiste em realizar a montagem da matriz que rege o comportamento total do membro.

$$\underset{\sim}{TEQ} = |\underset{\sim}{ELST} - \omega^2\underset{\sim}{ELMS} + i\omega\underset{\sim}{C}| \qquad (4.15)$$

onde:

ω = frequência da ação da carga atuante.

A quinta etapa consiste em levar a contribuição de cada elemento para a montagem da matriz que rege o comportamento global da estrutura ($\underset{\sim}{TK}$).

A última etapa consiste em introduzir dentro da matriz $\underset{\sim}{TK}$ do sistema, as restrições de deslocamentos da estrutura.

4.3.4 - Resposta da Estrutura

Uma vez determinadas as cargas atuantes e a matriz que rege o comportamento da estrutura, a etapa seguinte é a resolução do sistema. Esta solução nos dá o valor dos deslocamentos nodais da estrutura, ou seja, a resposta dinâmica da estrutura. Depois de conhecer os deslocamentos nodais, calculam-se as reações nodais e as forças nos membros. Tudo isto constitue a resposta da estrutura a excitação. Esta resposta será do tipo harmônico-simples, ou seja, curvas senoidais de frequência igual a da excitação e de amplitude e ângulo de fase definidos na base dos valores da parte real e da imaginária da resposta.

4.4 - INTEGRAÇÃO DIRETA

Alguns dos métodos normalmente utilizados para resolver a equação que rege o comportamento dinâmico de uma estrutura (4.1) são os métodos de integração direta. Estes métodos se encarregam de integrar os sistemas de equações sem necessidade de realizar transformações de coordenadas de referência. Esta integração é feita por meio de uma relação linear que associa os parâmetros nodais (deslocamentos, velocidades e acelerações) no instante t_{n+1} com os parâmetros nodais no instante t_n. A relação linear será função do intervalo de tempo ($\Delta t = t_{n+1} - t_n$) e das propriedades físicas do sistema |[25]|. Portanto, é necessário discretizar o tempo nos intervalos Δt. Em cada instante de tempo analisado, é revisado o

equilíbrio da estrutura. Neste trabalho, é utilizado o método proposto por Newmark para a resolução do problema dinâmico |[16, 18]|. Este método é utilizado muito extensamente |[11]| e permite obter a resposta de uma estrutura a qualquer tipo de carga variante no tempo. Esta resposta está baseada nos valores dos parâmetros nodais (deslocamentos, velocidades e acelerações) no instante inicial t = 0, os quais devem ser conhecidos com anterioridade. O método começa por assumir uma variação linear nas acelerações para o intervalo t_n, t_{n+1}, para logo deduzir os valores das velocidades e deslocamentos no instante de tempo t_{n+1} |[18]|.

Este método tem sido implementado computacionalmente, com a finalidade de comparar seus resultados com os obtidos pela utilização do método de resposta em frequência.

Na Figura (4.10) apresenta-se um esquema de funcionamento do processo passo a passo a seguir para obter-se a resposta da estrutura.

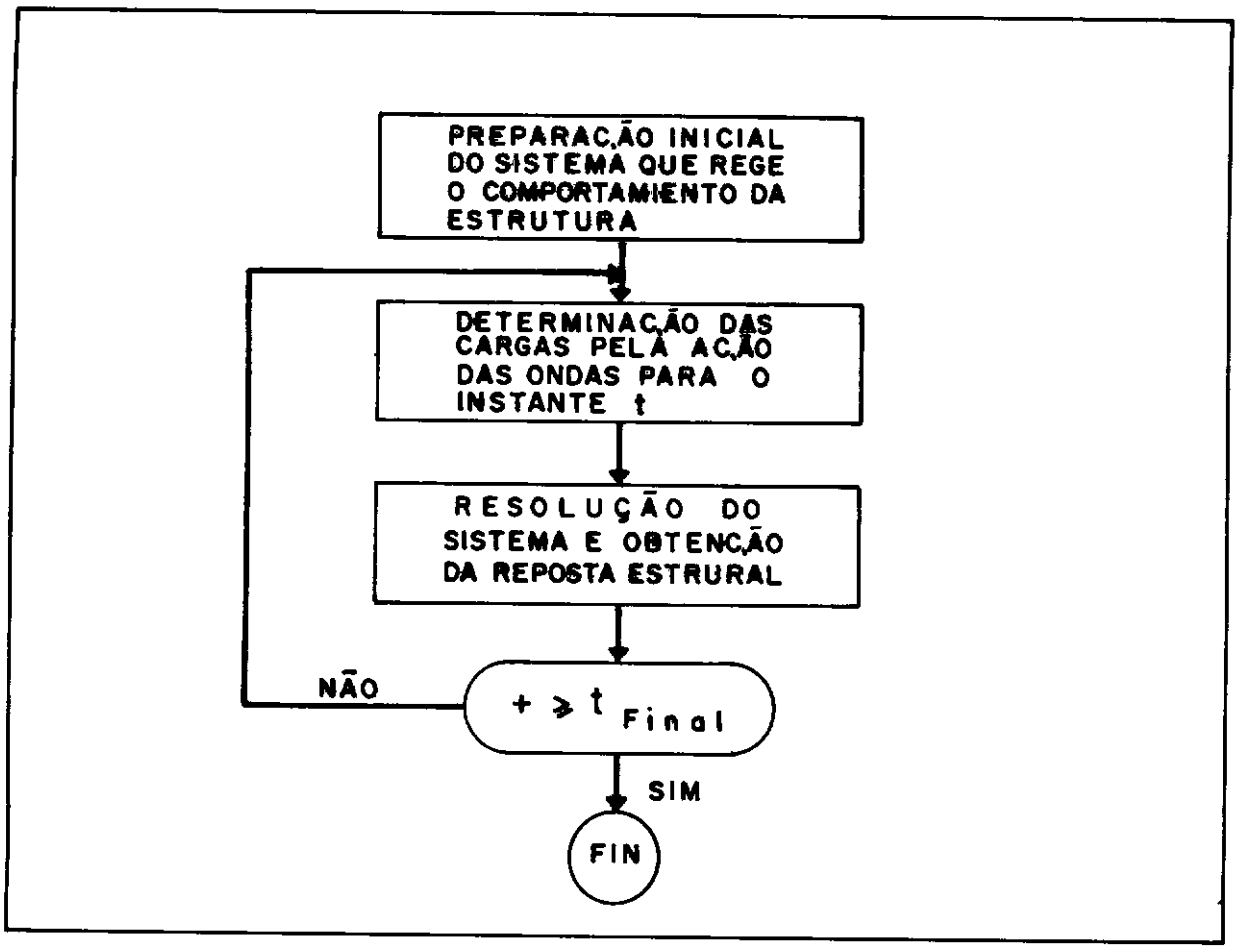


Fig. 4.10 - Esquema do funcionamento de análises por integração direta

4.4.1 - Preparação Inicial do Sistema que Rege o Comportamento da Estrutura

As matrizes que regem o comportamento do sistema são as matrizes de rigidez ($\underset{\sim}{K}$), a matriz de massa ($\underset{\sim}{M}$) e uma matriz de "rigidez equivalente" ($\underset{\sim}{Teq}$) que é característica do método de Newmark. O processo seguido para a montagem destas matrizes, apresenta-se na Figura 4.11.

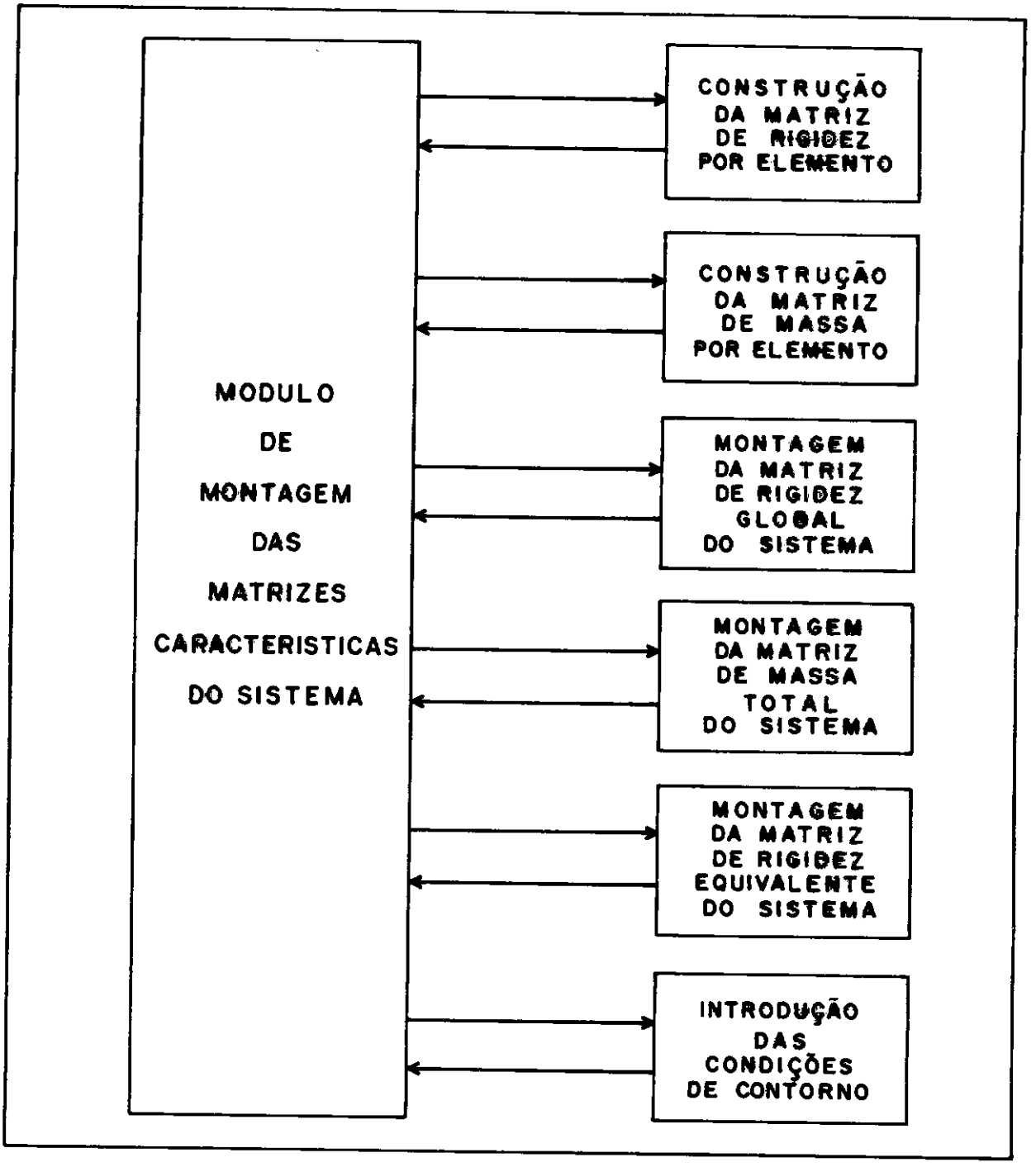


Fig. 4.11 -

A matriz de rigidez por elemento corresponde a especificada no ponto 4.2, Figura (4.1). Esta matriz deve ser rotada ao sistema de coordenadas globais, como na equação 4.12.

Também, a matriz de massa de cada elemento corresponde ao da Figura (4.2) e deve por sua vez ser rotada ao sistema global das coordenadas, segundo a equação 4.13.

O terceiro passo consiste em realizar a montagem da matriz de rigidez de todo o sistema, para isso tomam-se as contribuições de cada elemento e se reunem em uma matriz de rigidez global.

Também, realiza-se a montagem da matriz de massa de todo o sistema ($\underset{\sim}{M}$), levando em conta as contribuições de cada elemento.

O quinto passo consiste na montagem da matriz de rigidez equivalente do sistema, característico do método de Newmark. Esta matriz se constroí em base a seguinte relação

$$\underset{\sim}{T}eq = \underset{\sim}{K} + a_0 \cdot \underset{\sim}{M} + a_1 \cdot \underset{\sim}{C} \qquad (4.16)$$

Para determinar a matriz de amortecimento $\underset{\sim}{C}$, segue-se o esquema proposto por Rayleigh

$$\underset{\sim}{C} = \alpha \cdot \underset{\sim}{K} + \beta \cdot \underset{\sim}{M}$$

Levando em conta esta relação, pode-se simplificar a expressão (4.16)

$$\underset{\sim}{T}eq = (1 + \alpha)\ \underset{\sim}{K} + (a_0 + \beta)\ \underset{\sim}{M} \qquad (4.17)$$

Esta matriz permite conseguir um equilíbrio estático na estrutura levando em conta os efeitos de inércia e forças de amortecimento para cada instante de tempo.

A resolução posterior do sistema estrutural é feita pelo método de Cholesky, pelo que resulta ser necessário triangularizar a matriz que rege o comportamento do sistema da seguinte forma:

$$\underset{\sim}{T}eq = \underset{\sim}{T}^{t}_{tr} \cdot \underset{\sim}{T}_{tr} \qquad (4.18)$$

O procedimento explicado até aqui corresponde a preparação inicial do sistema para logo proceder-se as iterações nos instantes de tempo requeridos.

Passa-se agora a descrição das cargas produzidas pelo mar e a forma com que tem sido implementadas.

4.4.2 - O Modelo do Mar

Para modelar o comportamento do mar, tem sido utilizada a teoria desenvolvida por Airy, a qual explica-se de maneira bastante ampla no Capítulo II.

Para o posterior cálculo da ação do mar sobre os membros da estrutura, será necessário determinar a posição de

cada membro em relação com a superfície do mar. Este procedimento também é realizado no ponto 4.3.1 deste capítulo, porém apresenta uma diferença importante e é que no resultado não é necessário utilizar a simplificação de linearizar a superfície do mar. Devido a que a análise é tida em distintos instantes de tempo, é possível determinar a verdadeira posição do mar para cada um desses instantes. Portanto, para cada instante do tempo, cada membro tem as seguintes posições relativas:

a) completamente molhado
b) completamente seco
c) parcialmente molhado

A altura do mar é determinada pela equação

$$Z = A \cos(kx - \omega t) + d \qquad (4.19)$$

a) Se a altura do mar é superior a dos extremos do membro, diz-se que o membro está completamente submergido, portanto a ação do mar sobre esse membro será determinada em seus extremos e seu ponto intermediário.

b) Completamente seco se a altura do membro em seus extremos é superior ao do mar, o membro estará completamente seco e portanto o mar não produzirá cargas sobre este membro no instante analisado.

c) Membro parcialmente molhado se a altura do mar é superior a de um dos extremos do membro e inferior ao outro extremo, então o membro está parcialmente molhado. Será necessário determinar o ponto de interseção por meio da equação 4.19, e logo, determinam-se os pontos do membro onde serão avaliados os efeitos do mar e que são: o extremo submergido, o ponto de interseção entre o membro e a superfície do mar e como terceiro ponto, o intermédio entre os anteriores (fig. 4.12).

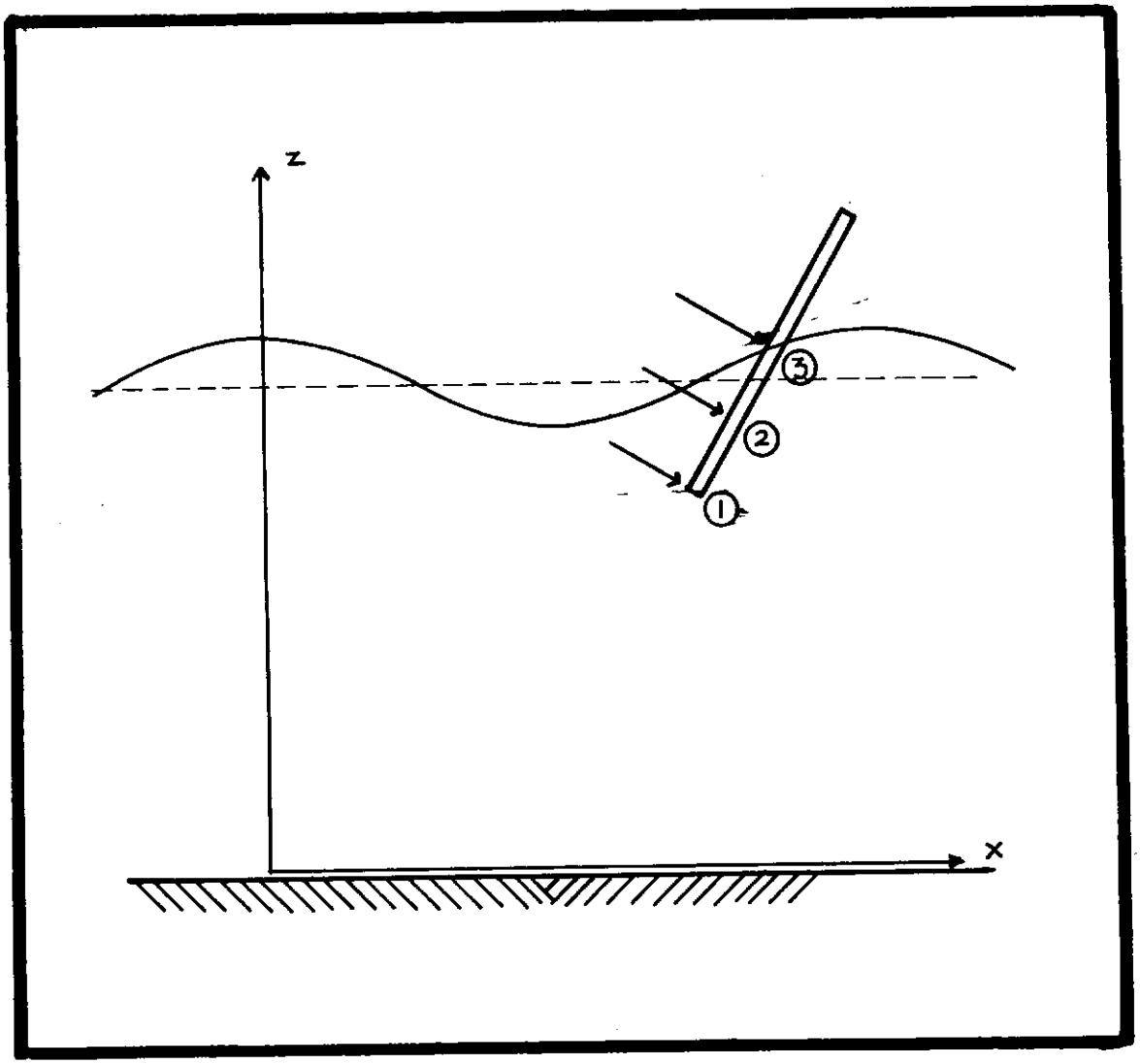


Fig. 4.12 - Interseção do membro pela superfície do mar

Diferenças nos resultados da linearização e não-linearização da superfície do mar são obtidos. Com a idéia de avaliar estas diferenças, se contempla na análise por integração direta, a possibilidade da linearização da superfície do mar.

O procedimento levado a termo nesse caso, corresponde ao realizado em 4.3.1 para cada instante de tempo. Alguns exemplos comparativos são desenvolvidos no Capítulo VI.

4.4.3 - Determinação das Ações Nodais

Uma vez definida a posição do membro para o instante de tempo referido, passa-se a determinar o campo de velocidades e acelerações atuantes sobre cada membro da estrutura, os quais se tem por meio da teoria de Airy.

Os valores das forças em cada instante do tempo, são determinados seguindo duas formulações que consideram de maneira distinta o efeito de arraste da fórmula de Morison. Este ponto tem sido abordado de maneira bastante complexa no Capítulo III. Os efeitos são:

- termo quadrático das velocidades na fórmula de Morison, depreciando as velocidades da estrutura.

- termo de velocidades linearizado na fórmula de Morison.

Em geral, ao longo deste trabalho, no esquema de integração direta é considerado o efeito do termo quadrático de velocidades, proposto inicialmente por Morison, porém a maneira de comparação tem sido contemplada também a possibilidade de incluir a análise com a fórmula de Morison linearizada. Os resultados das distintas considerações são comparadas no Capítulo VI por meio de exemplos ilustrativos.

Uma vez definidas as intensidades de força (força por unidade de longitude) atuantes em cada membro, passa-se a determinar as cargas nodais equivalentes, ou seja, as cargas aplicadas nos nós da estrutura que simulam a ação do mar. Para isso, o procedimento é análogo ao explicado no ponto 4.3.2 em cada instante do tempo. Para isso, são rotadas as cargas sobre os membros de coordenadas globais a coordenadas locais; logo se constroi uma parábola de 2º grau que descreve a ação do mar em cada um dos planos x y, x z do membro; logo são determinadas as ações nodais em base das funções de interpolação (Eq. 4.11) e logo são somadas as contribuições de cada membro ao vetor global de cargas que está referido ao sistema global de coordenadas.

4.4.4 - Resposta da Estrutura

Uma vez conhecidas as cargas atuantes sobre a estrutura para cada instante de tempo, procede-se a resolver o sistema de equações que modela o comportamento da estrutura. Este processo se expressa como

$$\underset{\sim}{T}eq \cdot U(t_n) = P(t_n) \qquad (4.20)$$

onde:

$\underset{\sim}{T}eq$ = matriz de rigidez equivalente a estrutura (Eq. 4.17)

$X(t_n)$ = deslocamento da estrutura para o instante t_n

$P(t_n)$ = cargas atuantes sobre a estrutura para o instante t_n

Após conhecer os deslocamentos da estrutura, determinam-se os valores das velocidades e acelerações. Também procede-se a calcular os valores das reações nodais assim como as forças nos membros. Desta maneira, tem-se a resposta da estrutura para cada instante de tempo.

4.5 - EFEITO DA MASSA ADICIONADA

A existência de um fluído ao redor de uma estrutura em movimento, trás como consequência a aparição de forças de inércia atuantes na mesma. Por estar nosso modelo estrutural baseado no método dos elementos finitos, estas forças são referidas aos pontos nodais.

Para o caso analizado no presente trabalho, o fluído está constituído por água. O efeito do movimento da estrutura, tem sido considerado para o cálculo de forças por meio da fórmula de Morison (seção 3.2.2). O segundo termo da equação 3.3 se refere ao efeito de inércia,nele será incluída

a força gerada pela existência de água nos arredores da estrutura. Este efeito é analizado membro por membro, os quais podem ter qualquer posição. A continuação é expressa esta força, a qual forma parte da equação 3.14.

$$\frac{\rho \pi D^2}{4} (C_M - 1) \ddot{\vec{X}}_n$$

Este termo é passado a parte esquerda da equação que rege o comportamento dinâmico da estrutura (4.1) e é agrupado com o termo de massas e acelerações. Este efeito assim delineado, se conhece como Massa Adicionada. O processo que se segue para quantificar sua ação é o de determinar as forças que se originam se o nodo de um membro tem acelerações unitárias em cada uma das direções globais x, y, z.

Para um membro em qualquer posição (definido pelos cosenos diretores C_x, C_y, C_z) uma aceleração nodal $\ddot{\vec{X}}$ na direção x terá uma componente normal ao membro, a qual se determina pelo dobro produto vetorial

$$\ddot{\vec{X}}_n(x) = \vec{C} \times (\ddot{\vec{X}}(x) \times \vec{C}) \qquad (4.21)$$

onde:

$\ddot{\vec{X}}(x)$: aceleração unitária na direção x

$\vec{C}$: vetor unitário que define a direção do membro

$\ddot{\vec{X}}_n(x)$: aceleração normal devida a aceleração unitária atuante na direção x.

Fica então definido

$$\ddot{\vec{X}}_n(x) = \begin{Bmatrix} 1 - Cx^2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{4.22}$$

A força que se origina no membro (longitude L) devido a esta aceleração será:

$$\vec{F}(x) = \frac{\rho \pi D^2}{4} (1 - C_M) \cdot \frac{L}{2} \cdot \begin{Bmatrix} 1 - Cx^2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{4.23}$$

Este efeito é somado na matriz de massa do membro na posição correspondente ao deslocamento translacional na direção x global (ou seja, na primeira posição da diagonal principal). Para as direções y, z, as forças serão respectivamente.

$$\vec{F}(y) = \frac{\rho \pi D^2}{4} (1 - C_M) \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 - Cy^2 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{4.24}$$

$$\vec{F}(z) = \frac{\rho \pi D^2}{4} (1 - C_M) \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 - Cz^2 \end{Bmatrix} \qquad (4.25)$$

4.6 - REPRESENTAÇÃO DO SOLO

Problemas relacionados com as vibrações do solo e a interação dinâmica solo-estrutura, tem sido objeto de estudos consideráveis nos últimos anos. Distintos modelos matemáticos tem sido desenvolvidos para descrever o efeito do solo no comportamento dinâmico de estruturas. No caso de estruturas off-shore fixas, estas em geral podem agrupar-se em duas categorias (como foi visto no ponto 4.2), sendo estas as estruturas de gravidade e as estruturas de acerco. Ambos tipos de estruturas requerem em geral dois tipos distintos de fundações. As estruturas de gravidade utilizam como fundação sua base inferior, e as estruturas de aço são fundadas sobre estacas, as quais são enterradas abaixo do solo marítimo. Se necessitam então dos modelos distintos que representam adequadamente a interação entre o solo e a estrutura.

Os modelos escolhidos assumem um comportamento linear do solo, já que de não serem assim o problema de análise dinâmica resultaria sumamente complexo e custoso computacionalmente. Na realidade, o solo tem um comportamento bastante não-linear já que suas propriedades dependem do nível de deformações. O estudo detalhado do solo não entra dentro dos objetivos deste trabalho, por tanto são utilizados modelos lineares

para representar o comportamento do solo, modelos estes adequados para os níveis de deformações obtidos neste tipo de análise.

4.6.1 - Modelo de Fundação para as Estruturas de Gravidade

As estruturas de gravidade, possuem em sua parte inferior uma base de dimensões consideráveis, a qual serve como suporte e também transmite as cargas da estrutura ao solo. O modelo escolhido neste caso, funciona como um disco circular de massa depreciável, o qual está apoiado sobre um solo, cujo comportamento é o de um espaço elástico homogêneo semi-infinito. As deformações internas do disco são desprezadas (fundação rígida). O disco, neste caso, está submetido a uma excitação harmônica, e a resposta do modelo é uma solução semi-analítica, disponível para uma ampla variedade de frequências assim como para vários tipos de solos. A resposta é obtida em base ao regime permanente (steady-state) [15].

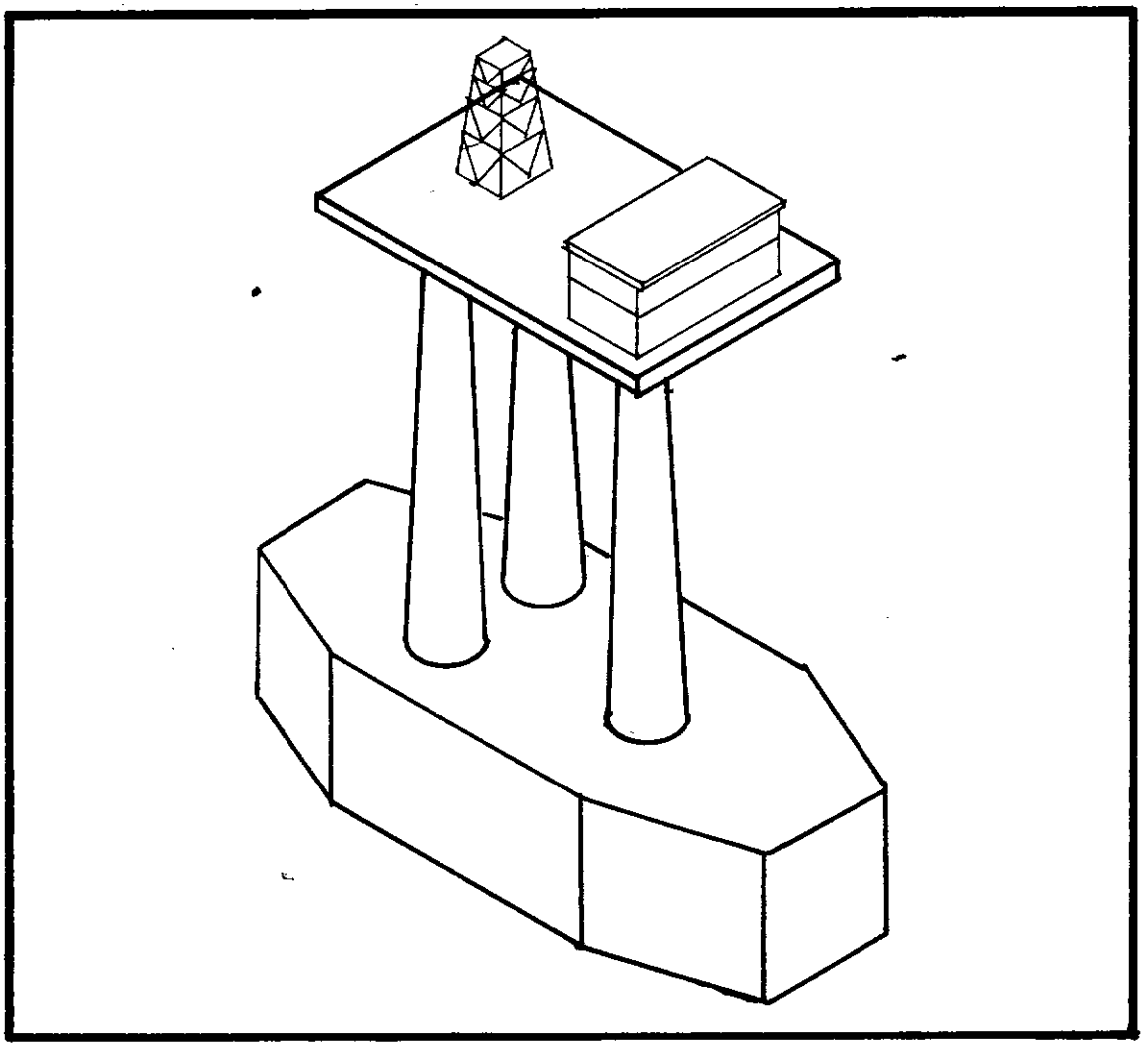


Fig. 4.13 - Estruturas de gravidade

Os movimentos mais importantes do disco são os deslocamentos no plano horizontal (r_x e r_y) e as rotações ao redor dos eixos x, y (Θ_x, Θ_y) (Fig. 4.14).

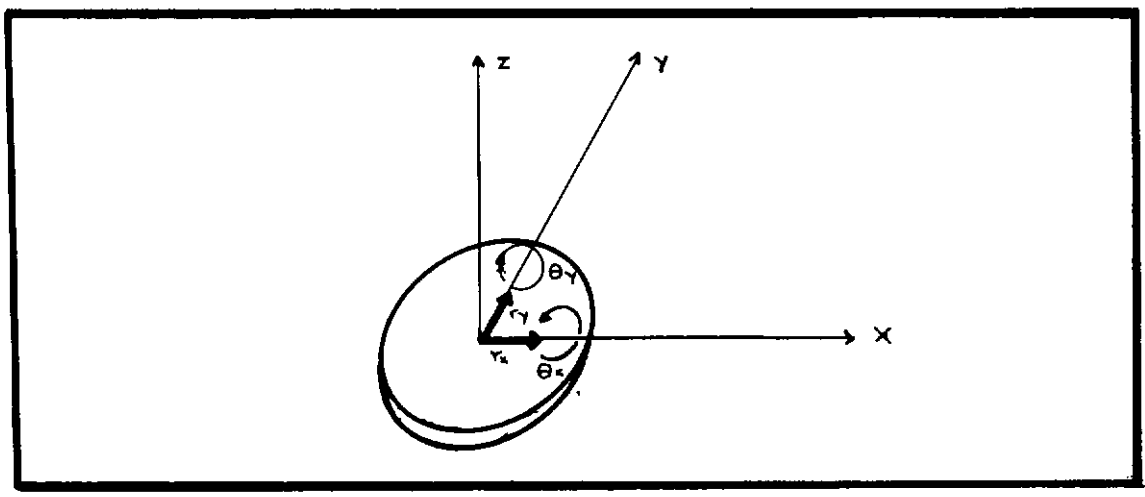


Fig. 4.14 - Deslocamentos do disco

O efeito do assentamento é desprezado. Em base aos deslocamentos permitidos, se formula matricialmente o comportamento da fundação, onde |[15]|:

$$k_{rx} = k_{1x} \cdot \frac{8Gr_0}{2 - \nu} \tag{4.26}$$

$$k_{ry} = k_{1y} \cdot \frac{8Gr_o}{2 - \nu} \tag{4.27}$$

$$k_{\Theta x} = k_{2x} \cdot \frac{8Gr_o}{3(1-\nu)} \tag{4.28}$$

$$k_{\Theta y} = k_{2y} \cdot \frac{8Gr_o}{3(1-\nu)} \tag{4.29}$$

$$C_{rx} = C_{1x} \cdot \frac{8}{2-\nu} \cdot r_o^2 \cdot \sqrt{\rho\, G} \tag{4.30}$$

$$C_{ry} = C_{1y} \cdot \frac{8}{2-\nu} \cdot r_o^2 \cdot \sqrt{\rho\, G} \qquad (4.31)$$

$$C_{\theta x} = C_{2x} \cdot \frac{8}{3(1-\nu)} \cdot r_o^2 \cdot \sqrt{\rho\, G} \qquad (4.32)$$

$$C_{\theta y} = C_{2y} \cdot \frac{8}{3(1-\nu)} \cdot r_o^2 \cdot \sqrt{\rho\, G} \qquad (4.33)$$

onde:

k_{rx}, k_{ry}, $k_{\theta x}$, $k_{\theta y}$: Coeficientes que se agregam a diagonal da matriz de rigidez nos termos dos correspondentes deslocamentos nodais.

C_{rx}, C_{ry}, $C_{\theta x}$, C_{θ}: Coeficientes que se agregam a diagonal da matriz de amortecimento nos termos dos correspondentes deslocamentos nodais.

k_{1x}, k_{1y}, k_{2x}, k_{2y}, C_{1x}, C_{1y}, C_{2x}, C_{2y}: Coeficientes de rigidez e amortecimento característicos do solo.

G: Módulo de corte do solo

ν: Coeficiente de Poisson

r_o: Rádio do disco de fundação

ρ: Densidade de massa do solo

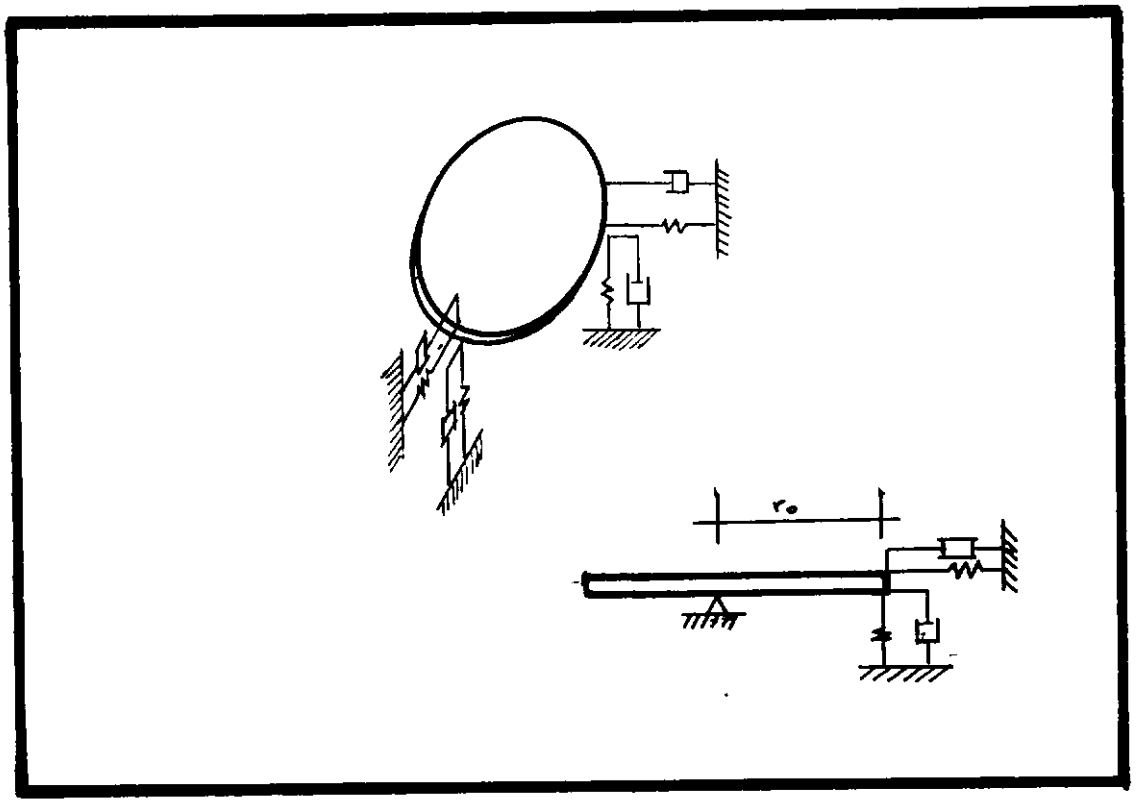


Fig. 4.15 - Modelo estrutural da fundação

No modelo escolhido o solo constitue um material homogêneo, para cada um dos planos x z, y z. Se seu comportamento é também isótropo (iguais relações esforço-deformação em cada direção), os coeficientes de rigidez e amortecimento serão iguais para ambas direções x, y: por tanto se tem que:

$$\left.\begin{aligned} k_1 &= k_{1x} = k_{1y} \\ k_2 &= k_{2x} = k_{2y} \\ C_1 &= C_{1x} = C_{1y} \\ C_2 &= C_{2x} = C_{2y} \end{aligned}\right\} \qquad (4.34)$$

Estes coeficientes são dependentes da frequência de vibração, como se mostra na Figura (4.16) [15].

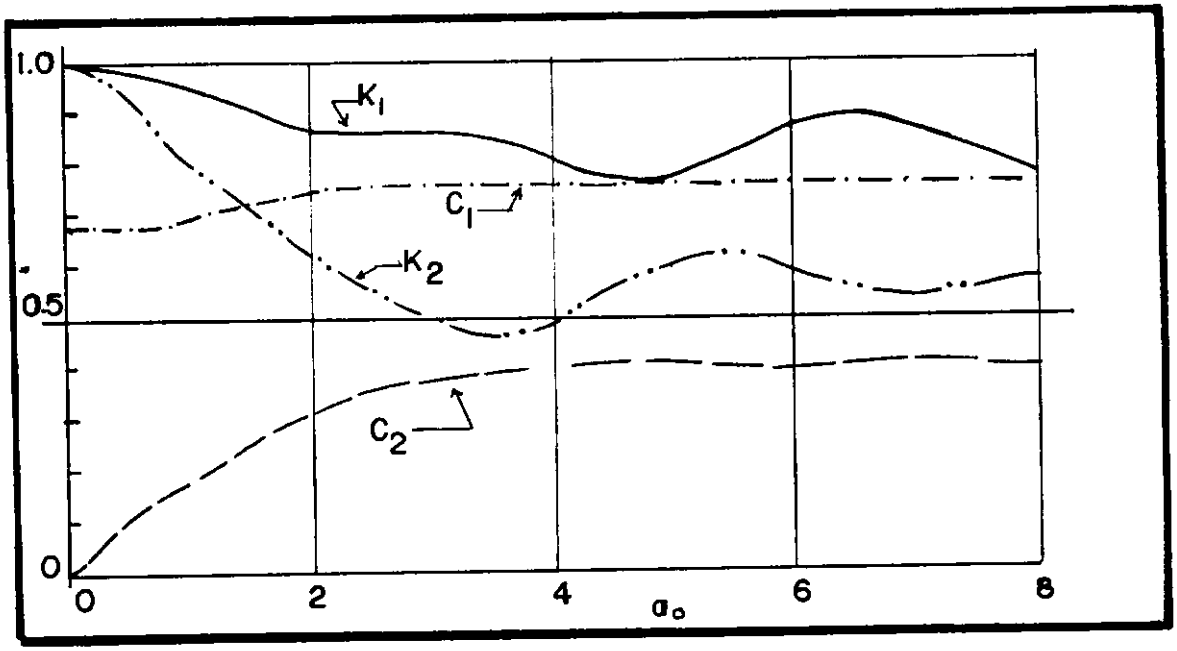


Fig. 4.16 - Variação dos coeficientes de rigidez e amortecimento respectivo a frequência

4.6.2 - Modelo de Fundação por Estacas

Na maioria dos casos, as estruturas off-shore estão fundadas sobre estacas que transmitem ao solo as cargas a que está submetida a estrutura.

Distintos autores têm estudos bastante complexos para levar em conta a interação solo-estrutura, em análises dinâmicas para estruturas fundadas em estacas. Devido principalmente a não-linearidade do solo, a implementação computacional dos efeitos derivados desta interação é bastante complexa.

Por não ser este um dos objetivos principais deste trabalho,duas alternativas tem sido implementadas.

A primeira consiste em assumir um comportamento linearizado do solo, para o qual se levam em conta as rigidezes de molhas, situadas nos pontos nodais e que afetam os movimentos de translação dos nós Sua contribuição é somada a diagonal principal da matriz de rigidez da estrutura, nas posições associadas aos deslocamentos referidos. Se assume também um amortecimento viscoso, linearmente proporcional a rigidez do solo e que atua nas mesmas direções generalizadas que a rigidez do solo, ou seja, atua nos deslocamentos translacionais que estão afetados pelo solo (Fig. 4.17).

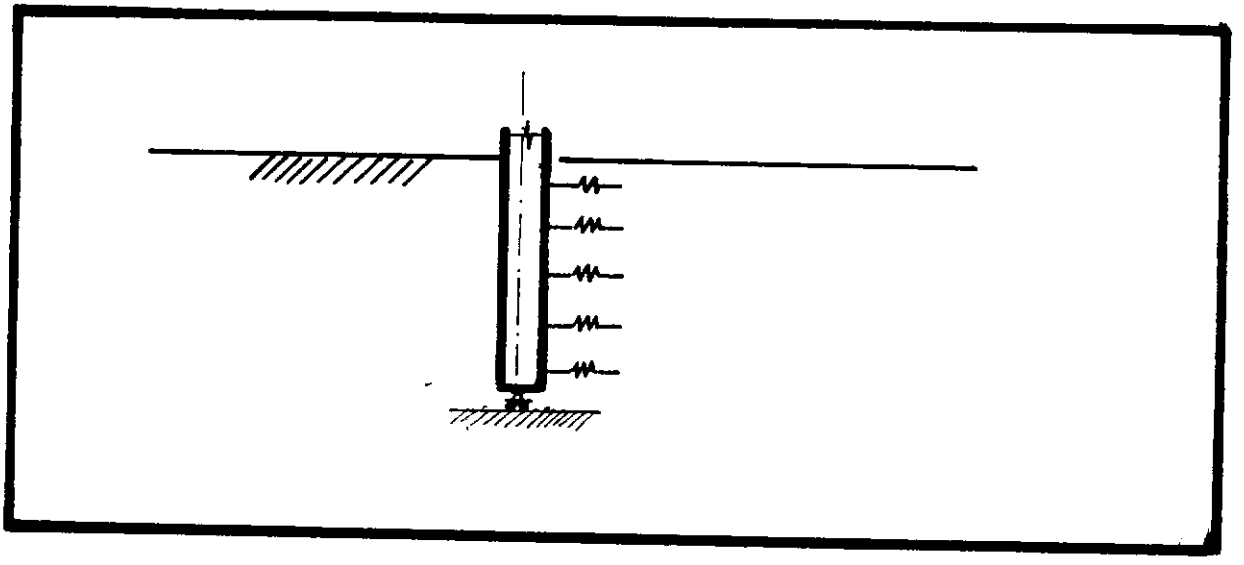


Fig. 4.17 - Modelo para estacas

A segunda alternativa considera o solo suficientemente rígido como para que os deslocamentos dos pontos nodais da estaca sejam despreciáveis.

Nos exemplos do presente trabalho, são comparados alguns resultados obtidos por meio de ambas alternativas.

CAPÍTULO V

DESENVOLVIMENTOS COMPUTACIONAIS

5.1 - INTRODUÇÃO

Graças ao surgimento e posterior avanço da computação, tem sido possível a realização de estudos e o surgimento de áreas de trabalho as quais, se não se contara com esse instrumento tão fundamental, não seriam mais do que uma fantasia ou ao menos uma possibilidade muito remota para as pretensões do homem.

Este desenvolvimento da computação tem permitido que campos como da engenharia estrutural tomassem um impulso impressionante. As técnicas matriciais converteram-se em instrumentos muito poderosos para o estudo das estruturas. O surgimento de técnicas numéricas para a resolução de distintos problemas, também está vinculado com o desenvolvimento da computação.

Trabalhos como o presente, são somente possíveis graças a utilização do computador. Nesse sentido, são apresentadas as características mais importantes dos desenvolvimentos computacionais elaborados ao longo deste trabalho.

Foram desenvolvidos dois programas:

- o primeiro ataca o problema dinâmico utilizando o domínio do tempo.

- o segundo ataca o problema dinâmico utilizando o domínio da frequência.

Os programas desenvolvidos caracterizam-se por ter sido concebidos sob um esquema modular. Este esquema permite uma versátil utilização das rotinas que compõem o programa, as quais independentemente, têm uma aplicação específica e podem ser utilizadas na elaboração de distintos programas, que por sua vez serviriam para resolver problemas diferentes ao enfocado neste trabalho.

Também, os programas aqui desenvolvidos, encontram-se documentados com comentários, que facilitam o entendimento das operações a realizar-se.

5.2 - ANÁLISE NA FREQUÊNCIA

O seguinte esquema, mostra de uma maneira "modular" o processo de análise implementado neste caso (Fig. 5.1).

O problema é regido pela equação:

$$|\underline{K} - \omega^2.\underline{M} + i\omega.\underline{C}|\ \underline{X}(\omega) = \underline{P}(\omega) \qquad (5.1)$$

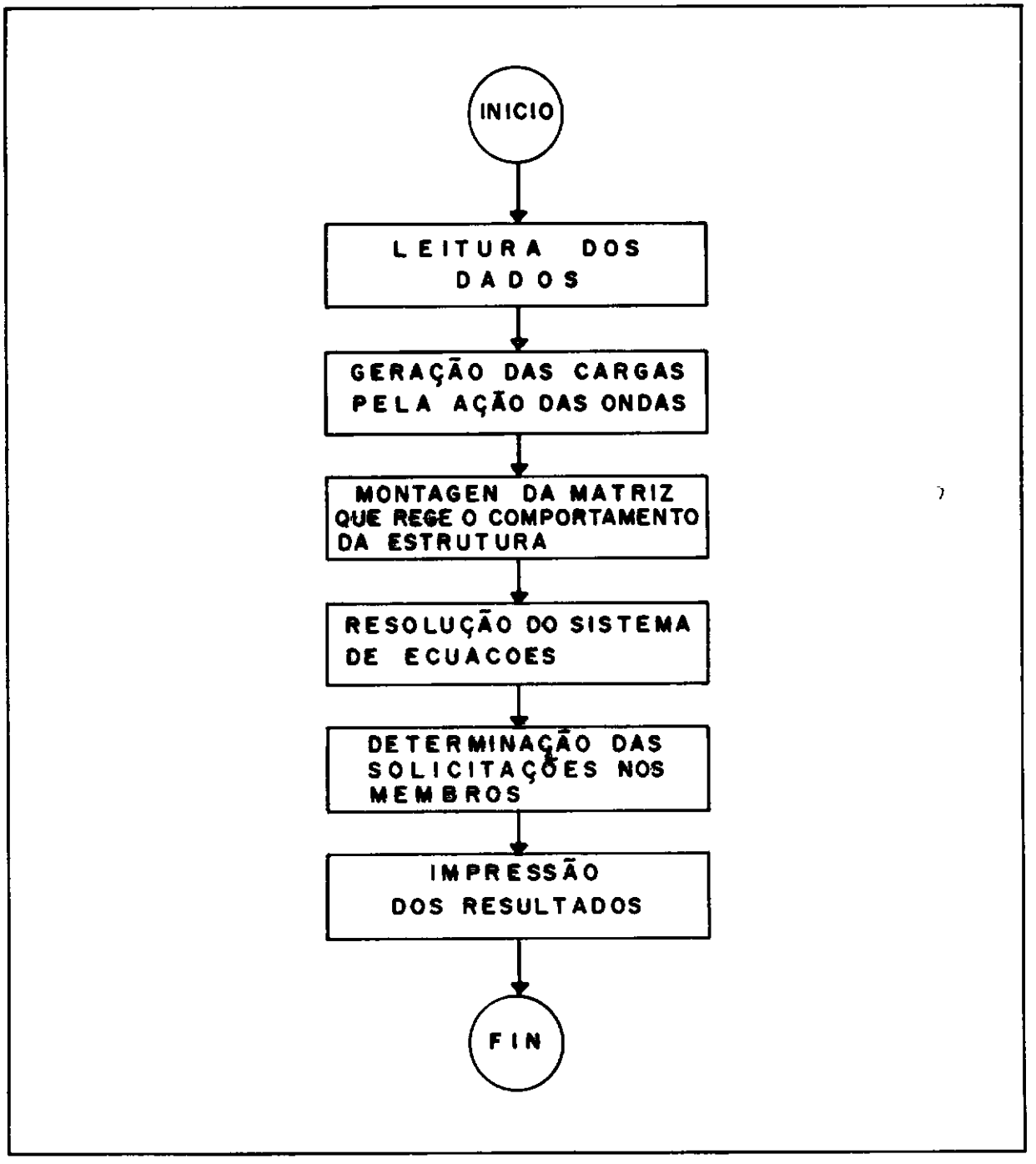


Fig. 5.1 - Módulos do programa que realiza a análise na frequência

5.2.1 - Leitura dos Dados

Nesta primeira etapa, são lidos os dados necessários para a posterior execução da análise.

Na Figura 5.2 mostra-se as partes em que está dividido o módulo de leitura de dados.

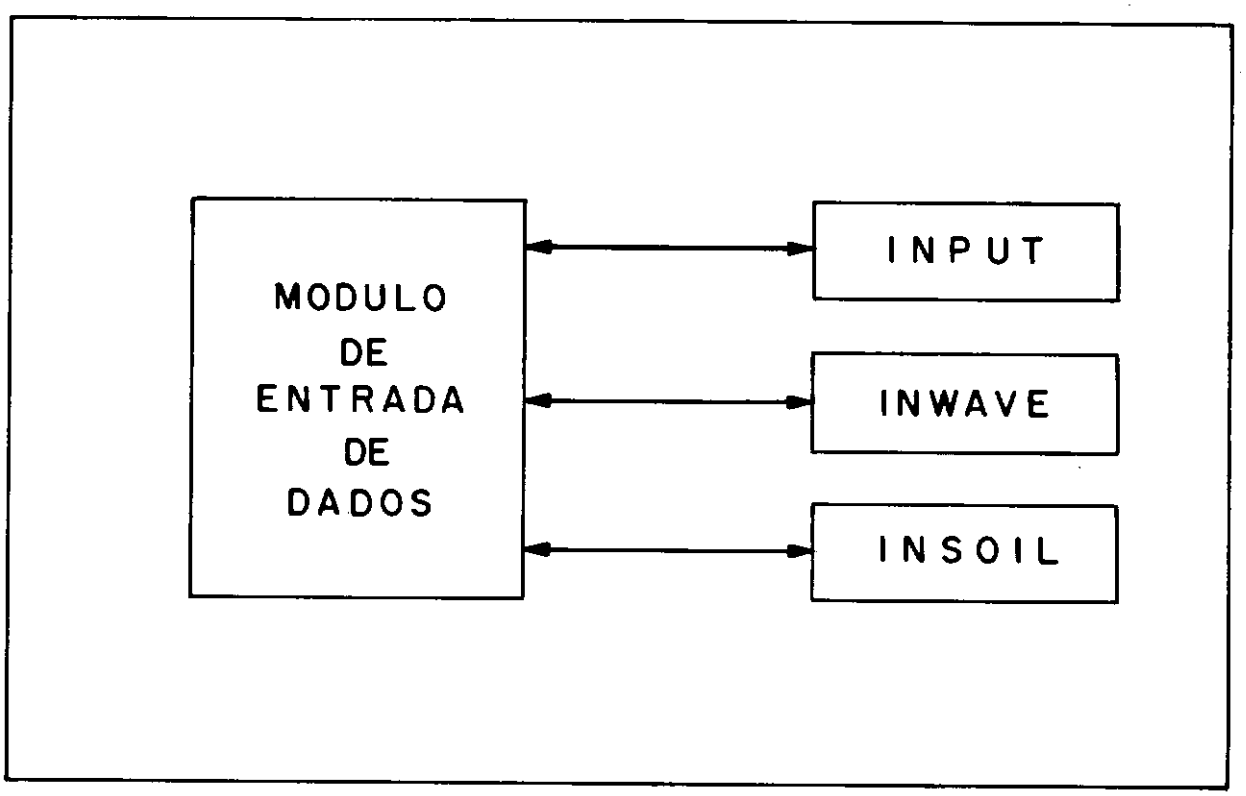


Fig. 5.2 - Módulo de leitura de dados

As rotinas que a integram funcionam da seguinte maneira:

a) INPUT - Esta subrotina encarrega-se de ler as propriedades associadas a estrutura. Estes dados são:

- Dados geométricos da estrutura tais como coordenadas e conectividades.

- Propriedades da estrutura, tais como diâmetro e espessura dos membros, coeficientes de elasticidade, módulo de corte e coeficientes da matriz de amortecimento.

- Condições de contorno, tais como restrições nodais.

b) INWAVE - Encarrega-se de ler os dados associados com o estado do mar e sua ação sobre os membros da estrutura.

Dados relativos as ondas, tais como peso específico do mar, viscosidade cinemática, profundidade do mar e amplitude da onda, frequência da onda, coeficientes de inércia e arraste.

c) INSOIL - Encarrega-se de ler os dados do solo, tais como o coeficiente de Poisson, o peso específico e dados associados aos coeficientes de rigidez e amortecimento.

5.2.2 - Geração das Cargas Devidas as Ondas

Este constitue um módulo bastante completo, que descreve sob um esquema de frequência a ação do mar sobre a estrutura. Para isso, apresenta-se a continuação um fluxograma descritivo do módulo "wave" e as rotinas que os compõem (Fig. 5.3).

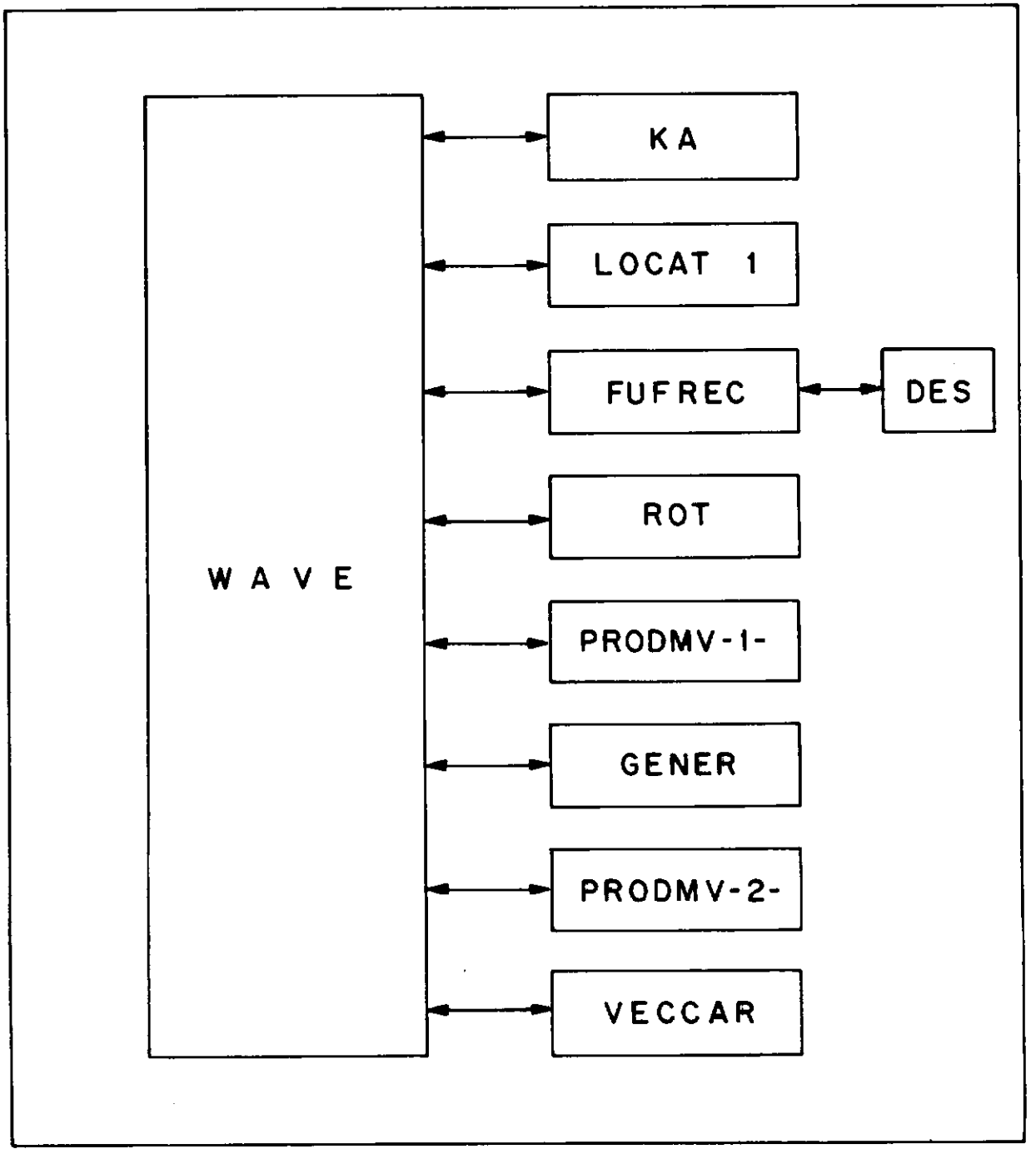


Fig. 5.3 - Esquema do módulo "wave"

A continuação apresentam-se as operações realizadas pelas distintas rotinas deste módulo.

a) KA - Determina o valor da constante k correspondente a onda, a qual vem da equação 2.31:

$$\omega^2 = g\ k\ \tanh(k/d) \qquad (5.2)$$

onde k é uma constante característica da teoria de Airy, que permite expressar a relação entre a longitude da onda e o ângulo a que corresponde dentro do movimento harmônico simples que utiliza Airy para modelar o comportamento da onda

$$K = \frac{2\pi}{L} \qquad (5.3)$$

A equação (5.2) é resolvida seguindo um procedimento iterativo.

b) LOCAT1 - Esta rotina encarrega-se de determinar se o membro está

- totalmente molhado
- totalmente seco
- parcialmente molhado

No caso de resposta em frequência, a linha de in-

terseção a constitue o nível de águas tranquilas (N.A.T.) como foi explicado no Capítulo IV.

c) FUFREC - Esta rotina é de vital importância e apresenta a ação da onda sobre o membro da estrutura. Em tal sentido, tomam-se três pontos do membro da estrutura que está sendo analisado e se determina o valor máximo das velocidades normais e acelerações normais, em cada um dos três pontos e o ângulo de fase em que atuam (Eqs. 3.28 a 3.32). Isto se realiza nas três direções globais x, y, z.

Logo é avaliada a força por unidade de comprimento atuante no membro, levando em conta o efeito de linealização do termo de velocidade na parte da força correspondente ao arraste (Eqs. 3.15 a 3.19 e 3.3 a 3.43). Será expressado assim o valor da força por unidade de comprimento atuante no ponto da barra, e seguindo uma formulação de frequência (Eq. 3.50). Este efeito em frequência é expressado finalmente com valores para a parte real e para a parte imaginária (Eq. 3.49).

Este processo é realizado para as direções globais x, y, z.

d) DES - Esta rotina se encarrega de determinar o valor do ângulo de defasagem (ψ) e o máximo valor da força (P)

atuante no ponto desejado do membro. (Fórmulas 3.43 e 3.44), em base aos valores de A2, B2 que são obtidos na rotina FUFREC (Eq. 3.39 e 3.40).

e) ROT - Esta rotina se encarrega de construir a matriz de rotação do membro que está sendo estudado, a qual permite transformar um vetor ou uma matriz que se encontra em coordenadas locais a coordenadas globais e vice-versa.

f) PRODMV-1 - Nesta rotina, os vetores de carga que inicialmente estão referidos ao sistema global de coordenadas, são transformados ao sistema local.

g) GENER - Esta rotina permite transformar a ação das cargas que produzem as ondas sobre cada membro, em ações nodais sobre cada membro. Para isso, GENER recebe os valores das cargas por unidade comprimento (provenientes de FUFREC) e constroi uma parábola que aproxima a ação das ondas sobre todo o membro (carga q(x) na Fig. 5.4). Logo utiliza-se o esquema explicado no Capítulo IV para determinar as forças nodais.

h) PRODMV-2 - Nesta rotina, os vetores de cargas que inicialmente estão referidos ao sistema local de coordenadas, são transformados ao sistema global.

i) VECCAR - Nesta rotina realiza-se a montagem do vetor que contém as cargas sobre todos os nodos da estrutura.

5.2.3 - Montagem da Matriz que Rege o Comportamento Dinâmico da Estrutura

O comportamento da estrutura, neste caso, está regido pela matriz $\underset{\sim}{TK}$, onde

$$|TK| = |\underset{\sim}{K} - \omega^2.\underset{\sim}{M} + i\omega\underset{\sim}{C}| \qquad (5.4)$$

(tomado da equação 5.1).

O funcionamento deste módulo é descrito no seguinte fluxograma. (Fig. 5.4).

É importante assinalar que neste programa, a matriz $\underset{\sim}{TK}$ foi armazenada como uma matriz de números complexos, ou seja uma boa matriz onde cada número tem parte real e parte imaginária, para isso foi aproveitada a instrução de declaração de FORTRAN "COMPLEX" a qual permite fazer o armazenamento como uma matriz só, assim como a solução do sistema de equações é muito simples. Este procedimento apesar de não ser o mais efetivo computacionalmente, e de implementação mais direta.

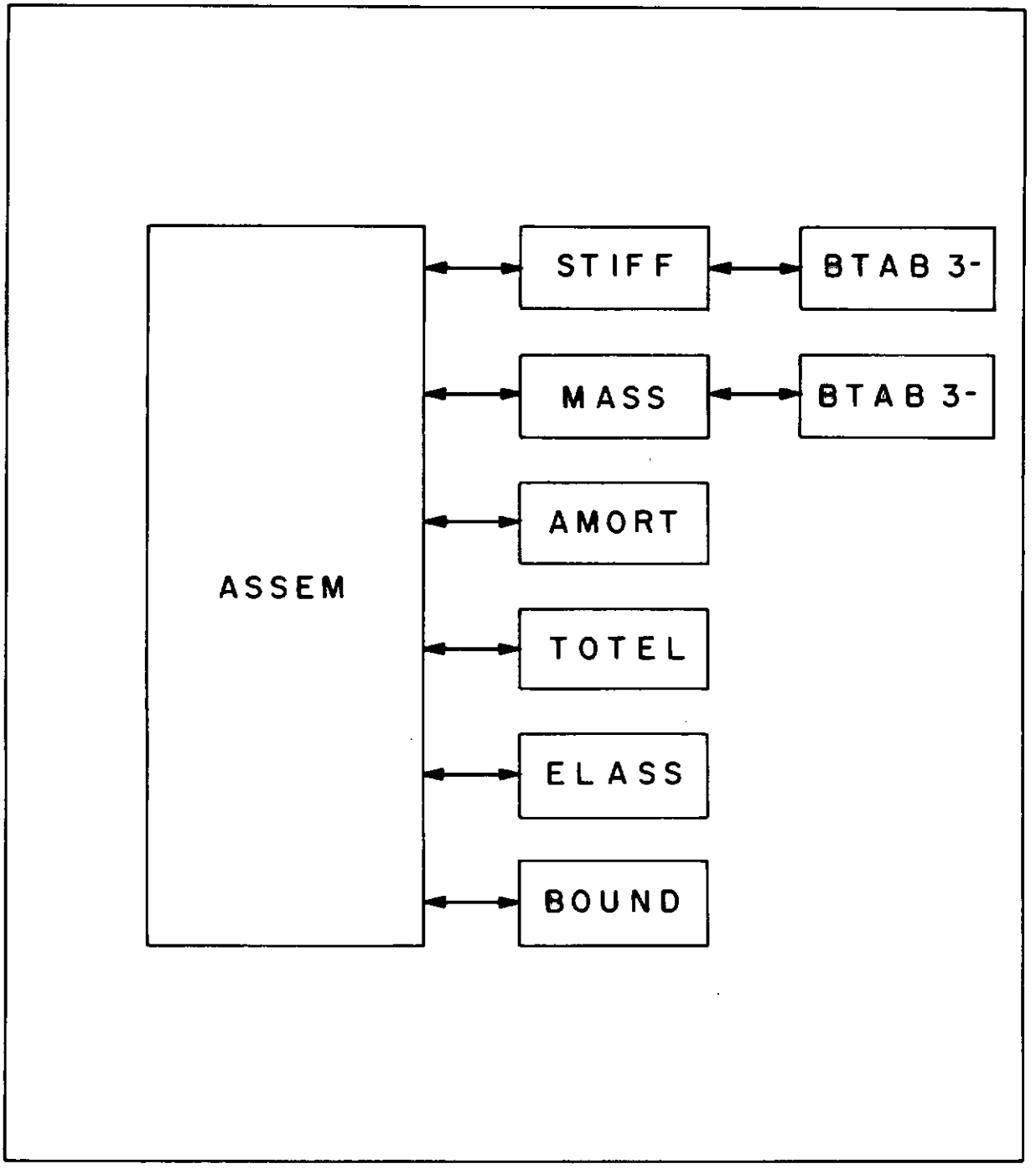


Fig. 5.4 - Módulo de montagem da matriz do sistema

a) ASSEM - Esta rotina encarrega-se primeiro que nada de calcular a largura de banda da matriz que rege o comportamento do sistema.

Logo, construe um laço que permite calcular as contribuições de cada membro da estrutura na matriz total $\underline{T}k\ |^{22}|$.

b) STIFF - Esta rotina encarrega-se de construir a matriz de rigidez de cada elemento (ELST) a qual estará referida aos eixos de coordenadas locais [21, 22].

c) BTAB3 - Realiza o produto de três matrizes: $B^T * A * B$, onde, neste caso, B corresponde a matriz de rotação e A as matrizes de rigidez ou de massa, conforme ao caso.

d) MASS - Esta rotina encarrega-se de construir a matriz de massa por elemento (ELMS) que estará referida ao sistema local de coordenadas [21].

e) AMORT - Constroi a matriz de amortecimento de cada elemento da seguinte forma

$$\underset{\sim}{C} = \alpha.\underset{\sim}{ELST} + \beta.\underset{\sim}{ELMS} \qquad (5.5)$$

f) TOTEL - Constroi a matriz total por elemento, onde

$$\underset{\sim}{TOEL} = \underset{\sim}{ELST} - \omega^2.\underset{\sim}{ELMS} + i.\omega.\underset{\sim}{C} \qquad (5.6)$$

g) ELASS - Toma a contribuição de cada elemento, para construir a matriz total de coeficientes do sistema ($\underset{\sim}{TK}$), a qual encontra-se armazenada como uma matriz bandeada superior [22]. Neste caso, funciona para uma matriz $\underset{\sim}{TK}$ de formulação complexa.

h) BOUND - Esta rotina encarrega-se de introduzir as restrições dos deslocamentos nodais, na matriz total do sistema ($\underset{\sim}{TK}$).

Estas restrições constituem as condições de contorno do sistema estrutural.

A técnica utilizada neste caso é a de zeros e de um. Esta consiste em colocar um valor unitário na posição (i, i) da diagonal da matriz do sistema, onde i é o número da restrição nodal referida. Logo, colocam-se valores nulos na fila e a coluna correspondentes (i) |[22]|. Isto aplica-se as matrizes bandeadas.

5.2.4 - Resolução do Sistema de Equações

Este módulo, encarrega-se de resolver o sistema de equações que modela o problema.

$$|TK| \cdot \{U\} = \{P\} \qquad (5.7)$$

O sistema é resolvido pelo método de triangularização de Gauss. Este método é de extensa aplicação e se encontra amplamente desenvolvido na literatura |[22, 29]|.

Como resultado desta operação, tem-se o vetor $\underset{\sim}{U}$ correspondente aos deslocamentos nodais da estrutura.

5.2.5 - Determinação das Solicitações dos Membros

Uma vez conhecidos os deslocamentos nodais, determinam-se as solicitações nos membros ($\underset{\sim}{R}$), seguindo a equação

$$|ELST| \cdot \{U\} = \{R\} \qquad (5.8)$$

5.2.6 - Impressão dos Resultados

Este simples módulo, tem como objetivo imprimir os resultados dos deslocamentos da estrutura, as reações nodais e as forças internas nos membros. Por serem todos estes valores, números complexos, são expressados na base a seu módulo e seu ângulo de fase. Esta forma de expressar os resultados é muito conveniente neste tipo de análise, é a que mostra, diretamente o valor máximo possível dos deslocamentos e as solicitações.

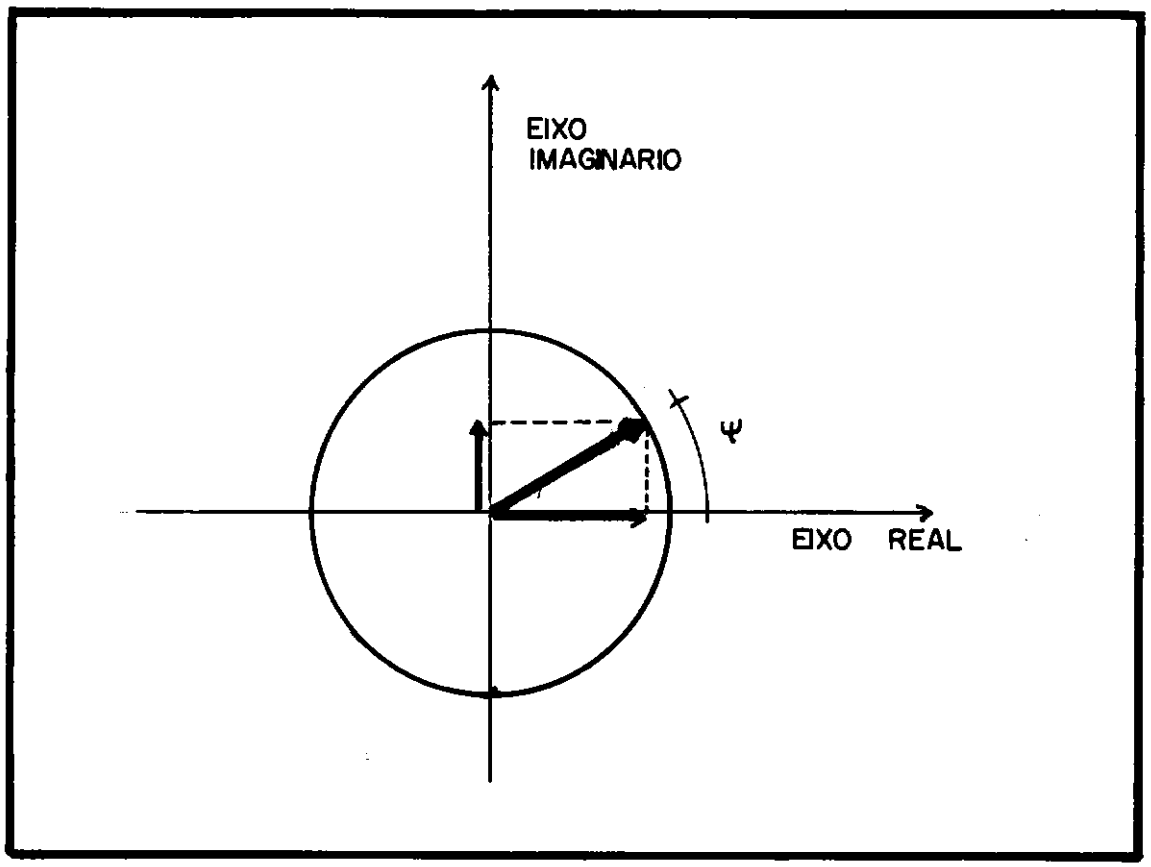


Fig. 5.5 -

5.3 - A ANÁLISE NO TEMPO

A análise dinâmica, que tem como domínio o tempo, é realizado utilizando o método de integração direta de Newmark. |[16] e [18]|

Este método resolve a equação dinâmica que rege o comportamento da estrutura, integrando o sistema de equações em um número de instantes no tempo, que seja conveniente. A equação que rege o sistema é:

$$\underset{\sim}{M}\,\ddot{\underset{\sim}{X}}(t) + \underset{\sim}{C}\,\dot{\underset{\sim}{X}}(t) + \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{X}(t) = \underset{\sim}{P}(t) \qquad (5.9)$$

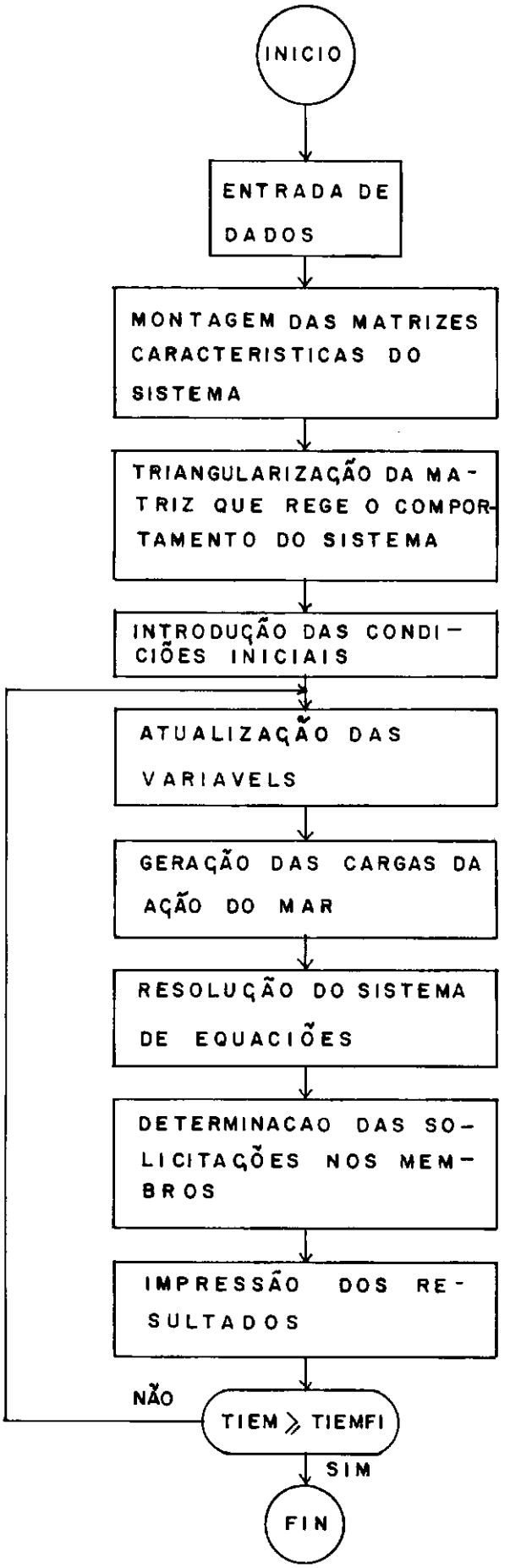


Fig. 5.6 - Esquema modular de integração no tempo

5.3.1 - Leitura dos Dados

Este módulo funciona de uma forma completamente similar ao especificado no ponto 5.2.1, somente com a diferença de incluir uma rotina que encarrega-se de ler os dados necessários para a integração numérica. Esta rotina tem o nome de INNEWM (Fig. 5.7).

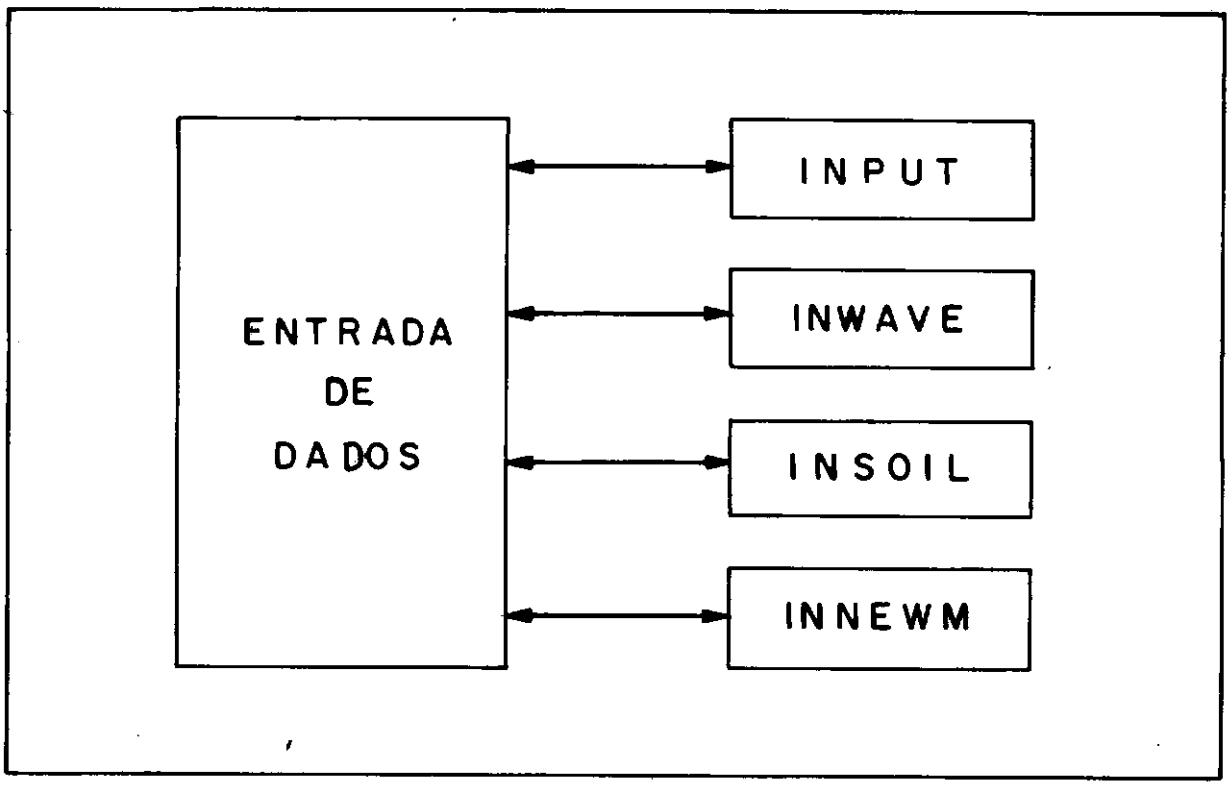


Fig. 5.7 - Módulo da Leitura de Dados

As operações que realizam as rotinas INPUT, INWAVE e INSOIL, podem ser vistas nos pontos 5.2.1(a), 5.2.1(b) e 5.2.1(c) respectivamente.

INNEWM - Esta rotina encarrega-se de ler os dados necessários para a realização das integrações pelo método de Newmark [18]. Assim mesmo, são lidos os valores relacionados com o tempo, tais como o instante inicial, o incremento do tempo a utilizar-se e o instante correspondente a última interação.

5.3.2 - Montagem das Matrizes Características do Sistema

O funcionamento deste módulo será expressado no esquema (5.8)

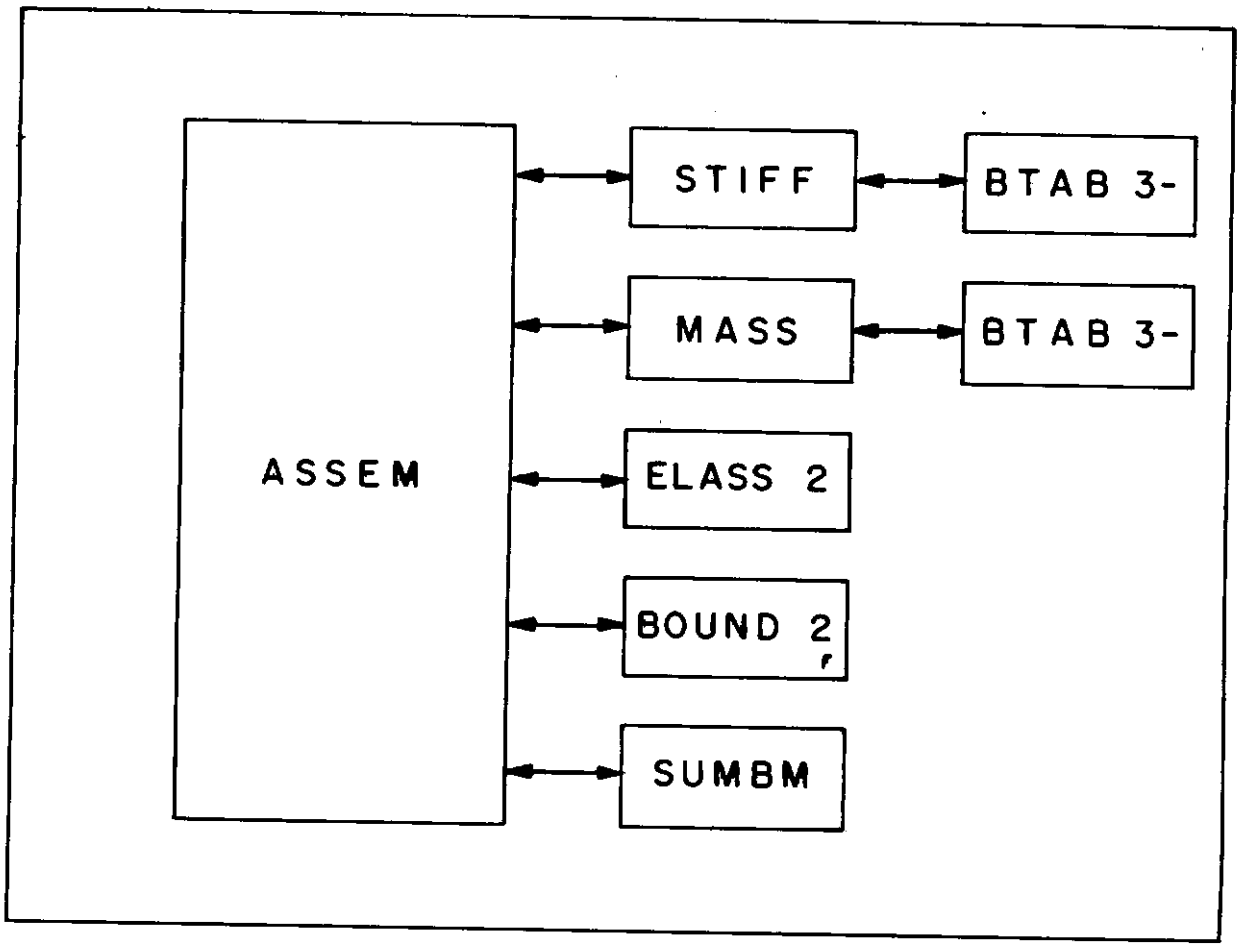


Fig. 5.8 - Funcionamento do módulo de montagem das matrizes do sistema

As rotinas STIFF, BTAB3 e MASS, foram descritas nos pontos 5.2.2(a), 5.2.2(b) e 5.2.2(c).

a) ELASS 2 - Encarrega-se de levar as contribuições de cada um dos membros, para construir as matrizes de rigidez ($\underset{\sim}{T}K$) e de massa ($\underset{\sim}{T}M$) que servem para modelar o comportamento do sistema completo.

b) BOUND 2 - Esta rotina encarrega-se de introduzir as condições de contorno (restrições nodais de deslocamentos) nas matrizes de rigidez ($\underset{\sim}{T}K$) e de massa ($\underset{\sim}{T}M$) de todo o sistema. O procedimento é análogo ao descrito no ponto 5.2.3(h), porém sómente para números reais.

c) SUMBM - Esta rotina encarrega-se de ensamblar uma matriz de "rigidez equivalente" ($\underset{\sim}{T}T$) que é utilizada para a análise. A forma de construir a matriz de "rigidez equivalente" é a seguinte.

$$\underset{\sim}{T}T = \underset{\sim}{T}K + a_0 \cdot \underset{\sim}{T}M + a_1 \cdot \underset{\sim}{C} \qquad (5.10)$$

onde a_0 e a_1 são valores numéricos característicos do método utilizado e que dependem do valor Δt, que é igual ao incremento no tempo de uma iteração a outra.

Neste caso, o amortecimento $\underset{\sim}{C}$ é construído utilizando o amortecimento de Rayleigh [18], onde

$$\underset{\sim}{C} = \alpha . \underset{\sim}{TK} + \beta . \underset{\sim}{TM} \qquad (5.11)$$

5.3.3 - Triangularização da Matriz que Rege o Comportamento do Sistema

Neste programa é utilizado o método de Cholesky para a resolução do sistema de equações. Com esse fim, é utilizada a rotina DECOB.

DECOB - Esta rotina encarrega-se de triangularizar uma matriz armazenada de acordo ao esquema de banda ($\underset{\sim}{TT}$). O resultado da operação é uma matriz triangular superior ($\underset{\sim}{TR}$) [22]. A matriz corresponde a operação:

$$\underset{\sim}{TT} = \underset{\sim}{TR}^{T} . \underset{\sim}{TR} \qquad (5.12)$$

5.3.4 - Introdução das Condições Iniciais

Este módulo está composto pela rotina INIC:

INIC - Esta rotina encarrega-se de colocar os valores iniciais correspondentes aos arranjos de deslocamentos, velocidades e acelerações nodais, assim como o valor inicial do tempo na variável TIEM.

5.3.5 - Atualização das Variáveis

Este módulo está composto pelas rotinas DISPLO e MULTI.

DISPLO - Esta rotina encarrega-se de levar em conta o efeito dos deslocamentos, velocidades e acelerações do intervalo anterior do tempo e determinar sua ação para o instante de tempo em curso.

MULTI - Encarrega-se de multiplicar uma matriz armazenada em banda por um vetor.

5.3.6 - Geração de Cargas de Ondas

Este módulo encarrega-se de determinar o efeito das ondas sobre a estrutura, em cada instante de tempo em que seja necessário. Este módulo funciona sob um esquema similar ao exposto no ponto 5.2.2, com a diferença fundamental que este tem domínio no tempo e o outro na frequência. Isto trás como consequência que seus funcionamentos não sejam iguais.

A continuação apresenta-se um fluxograma descritivo do funcionamento deste módulo (Fig. 5.9).

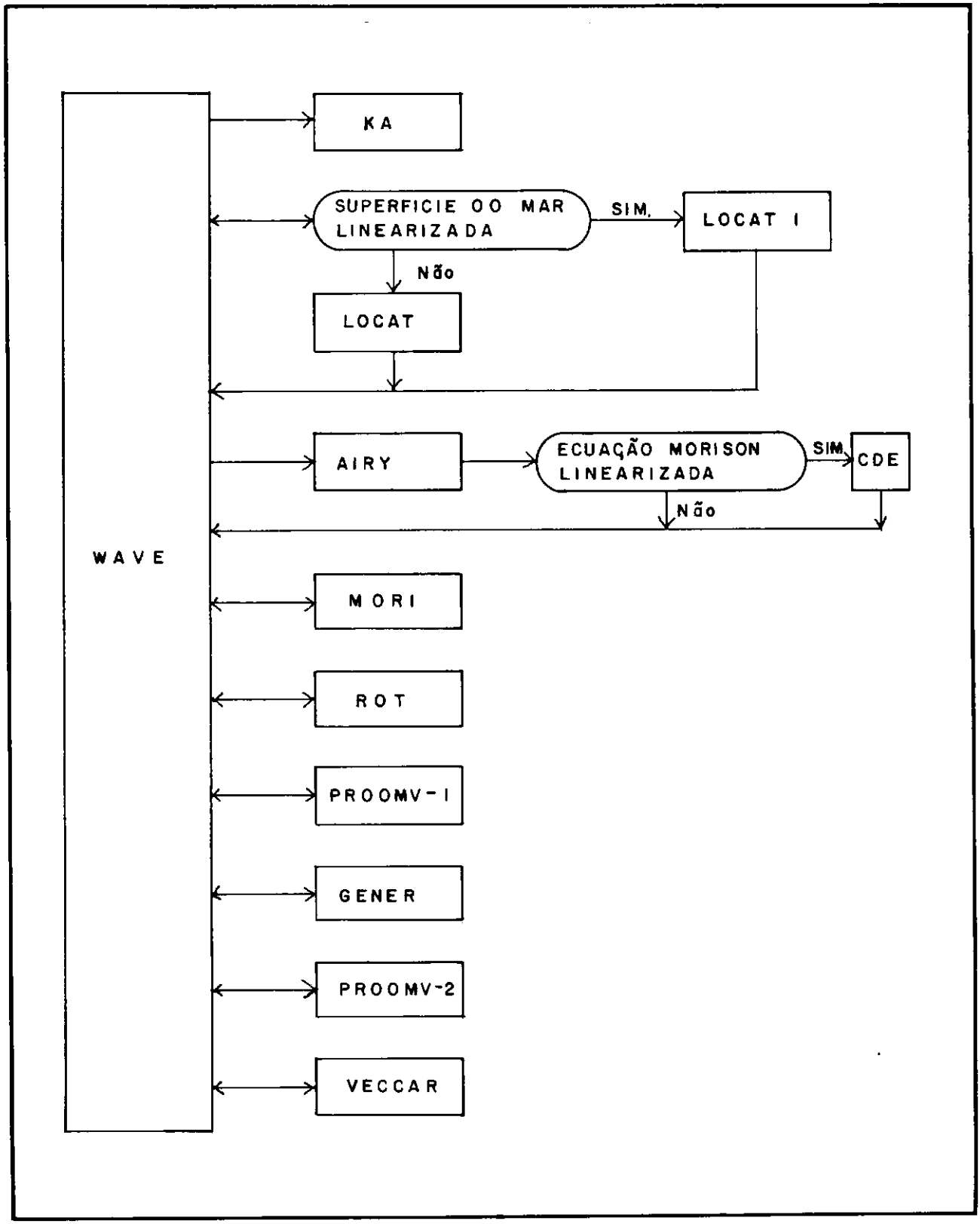


Fig. 5.9 - Esquema de geração de cargas no tempo

As rotinas KA, LOCAT1, ROT, PRODMV-1, GENER, PRODMV-2 e VECCAR, foram descritas no ponto 5.2.2 para cada instante do tempo. As outras rotinas são:

LOCAT - Encarrega-se de determinar se o membro da estrutura que é analisado acha-se

- totalmente molhado
- totalmente seco
- parcialmente molhado

Esta análise é feita para cada instante de tempo, pelo que não é necessária uma linearização da altura do mar. Neste caso, determina-se exatamente o ponto de interseção do membro para a superfície do mar, descrita pela teoria de Airy na equação 4.15

$$z = A \cos(kx - \omega t) + d$$

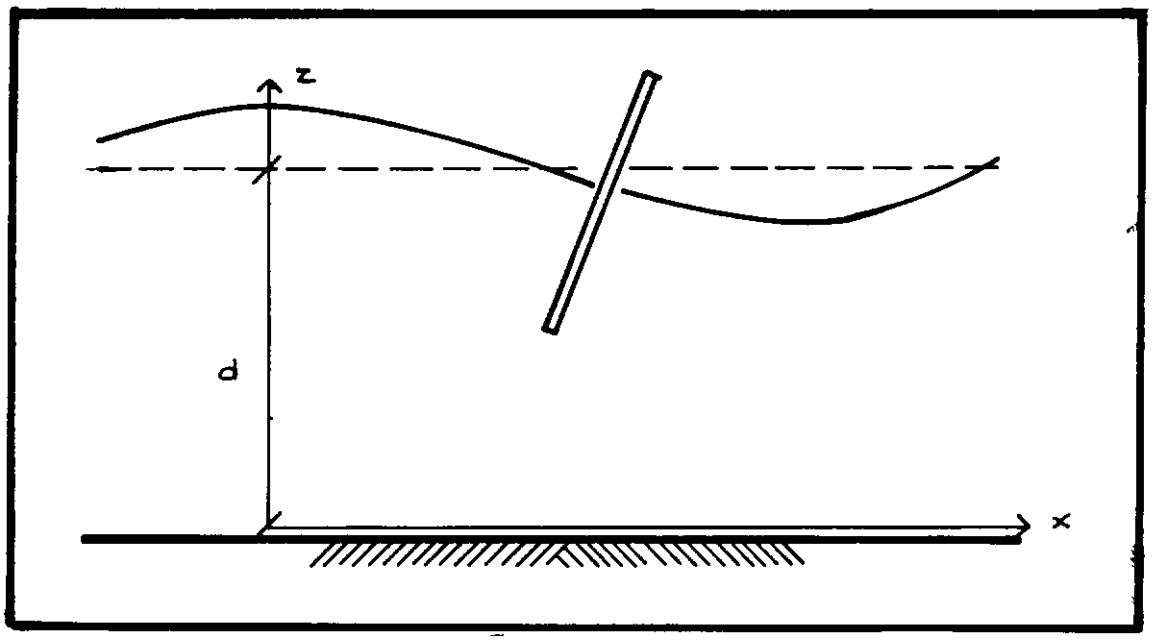


Fig. 5.10 - Interseção do membro pela superfície do mar

AIRY - Esta rotina encarrega-se de determinar os valores do campo de velocidades e acelerações, no ponto do membro que está sendo analizado. Logo determina os valores de velocidades e acelerações normais ao membro no mesmo ponto.

CDE - Esta rotina determina o valor do coeficiente de arraste equivalente C_{D_e} (Eq. 3.19). Este valor é utilizado para a linearização do termo quadrático de velocidades da força de arraste na fórmula de Morison. Para isso, esta rotina também encarrega-se de determinar o valor do módulo do vetor "velocidade normal" no ponto analisado correspondente ao membro em curso.

MORI - Esta rotina encarrega-se de determinar as forças atuantes no ponto correspondente ao membro em curso.

Para isso existe a opção de utilizar a fórmula de Morison linearizada ou a fórmula de Morison sem linearizar.

5.3.7 - Resolução do Sistema de Equações

Este módulo está composto pela rotina CHOLE.

CHOLE - Esta rotina se encarrega de resolver o sistema de equações que modela o comportamento da estrutura. Para isso é utilizado o método de Cholesky. A triangularização da matriz de coeficientes foi feita com anterioridadena rotina DECOB. Portanto nesta rotina (CHOLE) são realizados os processos de retro-substituição e substituição necessário para resolver o sistema.

5.3.8 - Determinação das Solicitações nos Membros

Este módulo, que se encarrega de determinar as solicitações nos membros funciona exatamente igual ao exposto no ponto 5.3.4.

5.3.9 - Impressão dos Resultados

Este módulo é de funcionamento muito simples e se encarrega de imprimir aqueles dados que podem ser de especial interesse como são:

- Valores das cargas atuantes devidas a sucessão de ondas
- Deslocamentos nodais
- Reações nodais
- Forças nos membros

Este processo é realizado para cada instante do tempo requerido para a realização de análises.

CAPÍTULO VI

ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Uma vez feito o estudo posterior implementação computacional das distintas partes que compõem o sistema estrutural, se procede a apresentar os exemplos utilizados assim como as análises dos resultados obtidos.

6.1 - EXEMPLO I: "CAISSON"

O primeiro exemplo constitue uma estrutura das que frequentemente são conhecidas pelo nome de "Caisson" (o reservatório). Estas estruturas estão constituídas por uma torre esbelta a qual vai enterrada no fundo do solo marinho e se levanta, saindo por cima da superfície do mar (Fig. 6.1). Suas funções são as de suportar tubagens que conduzem o gás natural do poço explorado (este gás é queimado em forma de mecheiros na superfície) e também serve para a plataforma que se ocupa de extrair o petróleo do poço |[14]|.

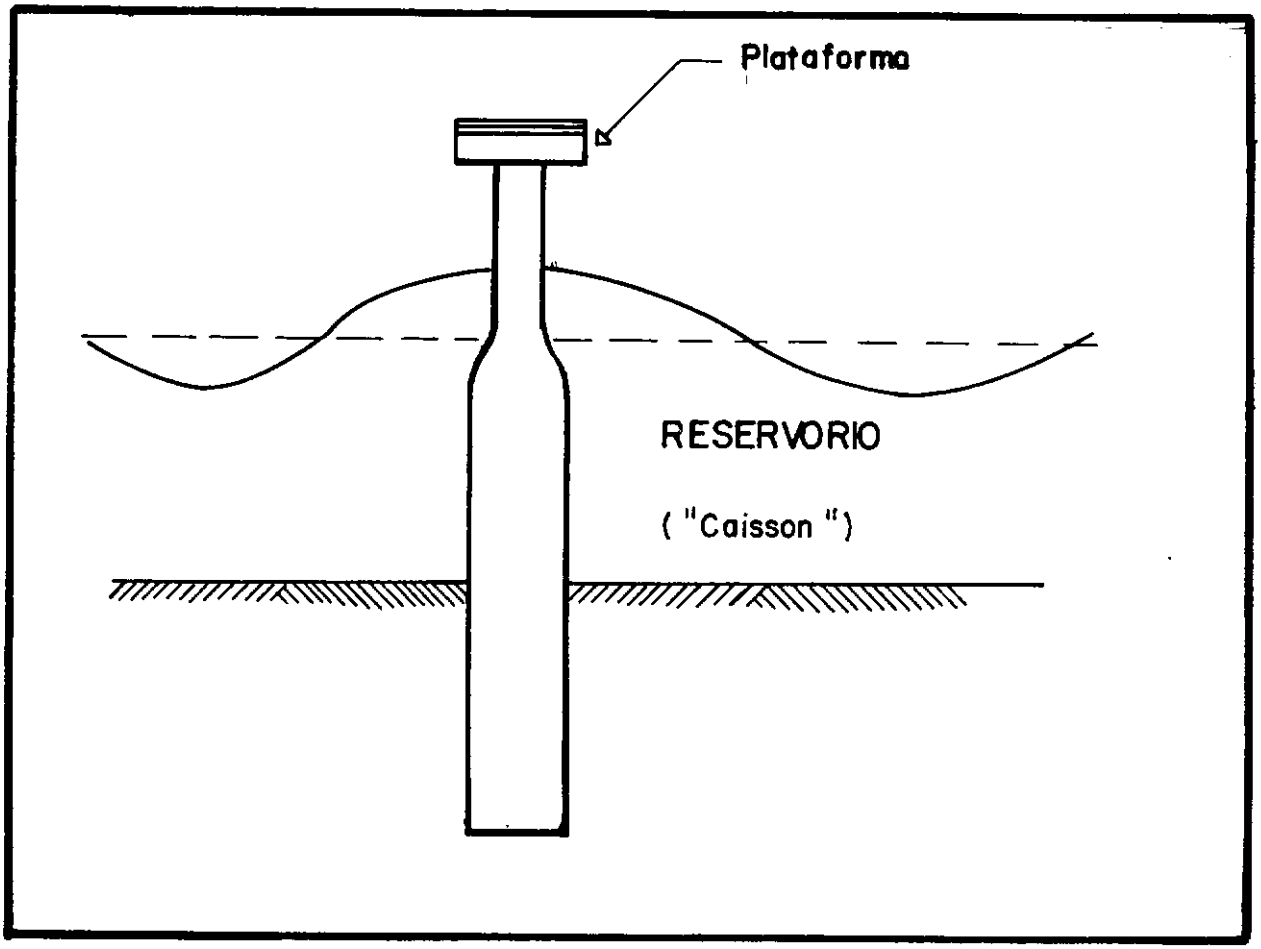
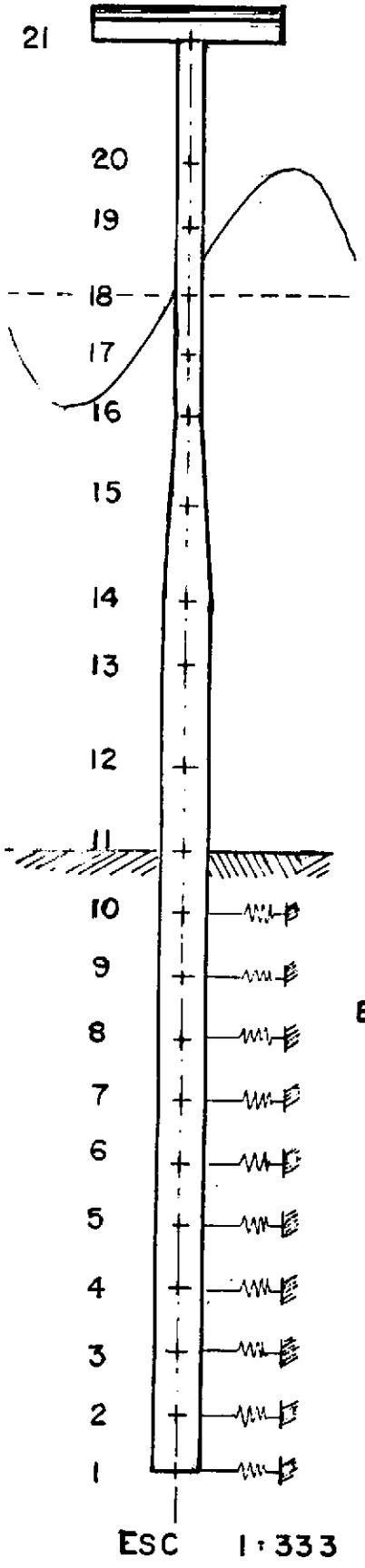


Fig. 6.1 - Exemplo 1 - Reservatório

Estas estruturas são muito susceptíveis aos efeitos dinâmicos, pelo que as dimensões da plataforma no topo são muito importante e a hora de determinar as solicitações nos membros.

Para seu estudo, a estrutura foi discretizada em elementos cilíndricos de rádios e alturas variáveis.A continuação se mostram as características geométricas da estrutura(coordenadas, conectividades, diâmetros e espessuras dos membros). (Fig. 6.2)

MODULO DE ELASTICIDADE	:	2×10^{10} kg/m²
MODULO DE CORTE	:	8×10^{8} kg/m²
DENSIDADE DE MASSA	:	2400 kg/m³



COORDENADAS

NO	X	Y	Z
1	0.00	0.00	-30.48
2	0.00	0.00	-27.43
3	0.00	0.00	-24.38
4	0.00	0.00	-21.34
5	0.00	0.00	-18.29
6	0.00	0.00	-15.24
7	0.00	0.00	-12.19
8	0.00	0.00	-9.14
9	0.00	0.00	-6.10
10	0.00	0.00	-3.05
11	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	3.96
13	0.00	0.00	7.93
14	0.00	0.00	11.89
15	0.00	0.00	16.46
16	0.00	0.00	21.03
17	0.00	0.00	24.08
18	0.00	0.00	27.13
19	0.00	0.00	30.18
20	0.00	0.00	33.22
21	0.00	0.00	39.32

CONETIVIDADE

ELEMENTO	NO INI	NO FIN	DIAM	ESPES
1	1	2	2.13400	0.05000
2	2	3	2.13400	0.05000
3	3	4	2.13400	0.05000
4	4	5	2.13400	0.05000
5	5	6	2.13400	0.05000
6	6	7	2.13400	0.05000
7	7	8	2.13400	0.05000
8	8	9	2.13400	0.05000
9	9	10	2.13400	0.05000
10	10	11	2.13400	0.05000
11	11	12	2.13400	0.05000
12	12	13	2.13400	0.05000
13	13	14	2.13400	0.05000
14	14	15	1.90500	0.05000
15	15	16	1.44800	0.05000
16	16	17	1.21900	0.05000
17	17	18	1.21900	0.05000
18	18	19	1.21900	0.05000
19	19	20	1.21900	0.05000
20	20	21	1.21900	0.05000

O amortecimento utilizado foi de 4% para os 4 dos modos naturais de vibração escolhidos.

As condições do mar atuando sobre a estrutura são:

Profundidade do mar	-	30.00 m
Amplitude da onda	-	6.00 m
Frequência da onda	-	0.4189 rad/s
Período da onda	-	15.00 seg
Densidade relativa	-	102.00 $kg.s^2/m^4$
Viscosidade conemática	-	0.001 m^2/s
C_M	-	1.5
C_D	-	1.0
Aceleração de gravidade	-	9.81 m/s^2

O modelo que leva em conta a interação solo-estrutura é o linear para estacas descrito no ponto 4.6.2. Se toma um solo de rigidez variante em função da profundidade e em função do diâmetro da estaca. Os coeficientes de módulo de elasticidade por unidade de longitude, correspondem a uma areia de densidade média: $E_s = 1.6608 \times 10^6$ kg/m^3 $|^{43}|$. Os coeficientes de rigidez são determinados então:

$$k = (1.6608 * 10^6 \frac{kg}{m^3}) \cdot \ell_i \cdot d_i \qquad (6.1)$$

onde:

ℓ_i: longitude do trecho associado a malha i

d_i: diâmetro do membro associado a malha i

k : coeficiente de rigidez a ser somado a matriz do sistema.

Com o fim de comparar os diferentes efeitos que produzem sobre a estrutura as distintas suposições que se realizam ao longo do presente trabalho, vários tipos de análises são realizadas.

6.1.1 - Comparação entre Termo de Velocidades Quadráticos e Linearizados na Formula de Morison

Neste primeiro caso, foram realizadas análises por meio do método de integração direta, comparando os resultados obtidos para o deslocamento da plataforma no topo da estrutura, quando se lineariza o termo de velocidades da equação de Morison e quando não se lineariza.

Em ambos os casos, é levado em conta o efeito da massa adicionada pela existência de água aos derredores da estrutura. Também, massas de 10.000 kh são somadas na matriz de massa da estrutura no nó 21 para considerar os efeitos da presença da plataforma.

Também é utilizada a suposição da superfície do mar linearizada (seção 4.3.1). Foram integrados 4 períodos de ação da onda. Estes períodos foram discretizados em 10 intervalos cada um, seguindo as recomendações de Bathe e Wilson |[18]|.

Os resultados obtidos se mostram na Fig. 6.3. A primeira parte corresponde ao regime transiente, mostra que a parte final da resposta corresponde ao regime permanente (ou "steady state"). Os resultados são referidos ao deslocamento horizontal do nó 21, correspondente a plataforma.

Os valores máximos dos deslocamentos para o regime permanente são:

termo linearizado - 0.924 m
termo não-linearizado - 0.850 m
Diferença - 0.07 m
Erro - 8.0%

Isto corresponde ao erro máximo que se comete.

A partir destes resultados, se pode deduzir que para este exemplo as diferenças obtidas mediante a linearização e não-linearização do termo de velocidades na equação de Morison, são relativamente pequenas. Os resultados da linearização são um pouco mais conservadores. O erro cometido poderia ser incluído dentro de outras considerações que o mesmo modelo estrututal leva em conta.

6.1.2 - Comparação Entre o Método da Resposta em Frequência e de Integração Direta

Por meio da comparação dos resultados obtidos por meio de ambos métodos, se pretende verificar a validez das técnicas. Neste caso, foi tomado o mesmo exemplo da seção anterior (6.1.1) onde se leva em conta os efeitos de uma massa de 10.000 kg no topo da estrutura e massa adicionada pela existência d'água aos derredores da estrutura. Para a integração direta se utiliza a forma de Morison linearizada.

O resultado para o deslocamento da plataforma no topo da estrutura pelo método de resposta em frequência tem amplitude de 0.0924 m e ângulo de fase de -.499 rad. No caso de integração direta, a amplitude do deslocamento horizontal da plataforma é de 0.0924 e o equivalente ao ângulo de fase é -.500 rad.

Estes resultados são também expressados na Figura 6.3, onde são referidos o domínio tempo.

Em vista dos resultados tão parecidos obtidos mediante a utilização de ambos métodos (para o regime permanente), se conclue que ambos são adequados desde o ponto de vista numérico, gerando resultados praticamente iguais.

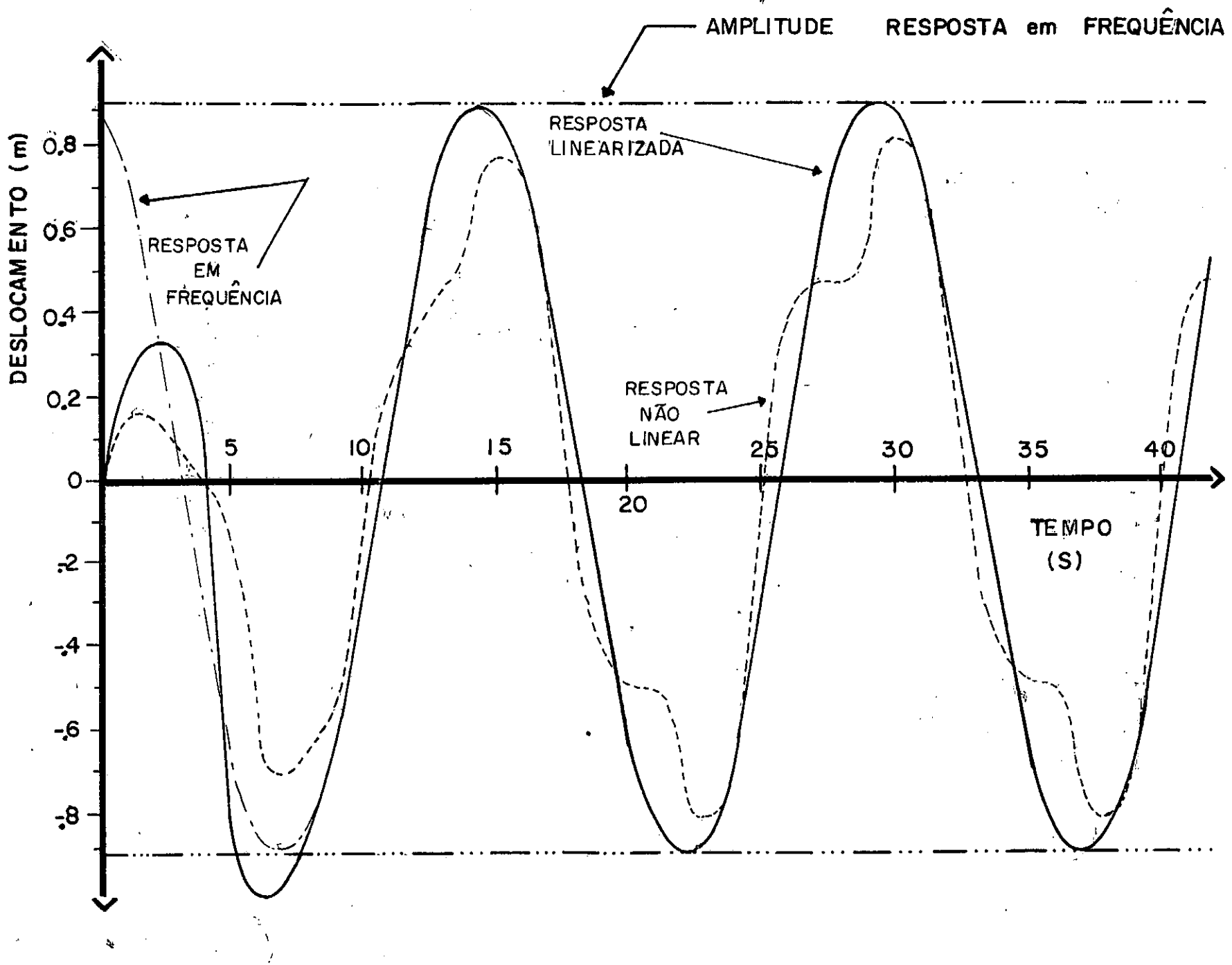


Fig. 6.3 - Deslocamento horizontal para a plataforma no topo da estrutura

6.1.3 - Quantificação do Efeito da Massa Adicionada

Neste caso, é analizada a estrutura, não levando em conta o efeito da massa adicionada pela existência de água aos derredores da estrutura. A finalidade desta comparação é a de quantificar o efeito que causa a existência d'água para a determinação das solicitações na estrutura. Assim mesmo se indica o erro que se comentaria no caso de não ser levado em conta o efeito da massa adicionada na determinação dos deslocamentos nodais (Figura 6.4).

Esta análise é realizada pelo método de resposta na frequência e para isso é utilizada uma massa de 10.000 kg devida a existência da plataforma, assim como o efeito linear do solo para a estaca.

6.1.4 - Efeito do Peso da Plataforma no Topo da Estrutura

Na plataforma situada no topo da estrutura, são realizadas as atividades de operação, pelo que resulta conveniente colocar alguns valores de massa-peso, que representem as cargas verticais resultantes do peso próprio, carga viva, equipamento, etc.

Em tal sentido foram realizadas análises com domínio da frequência, para massas no topo da estrutura de valores de:

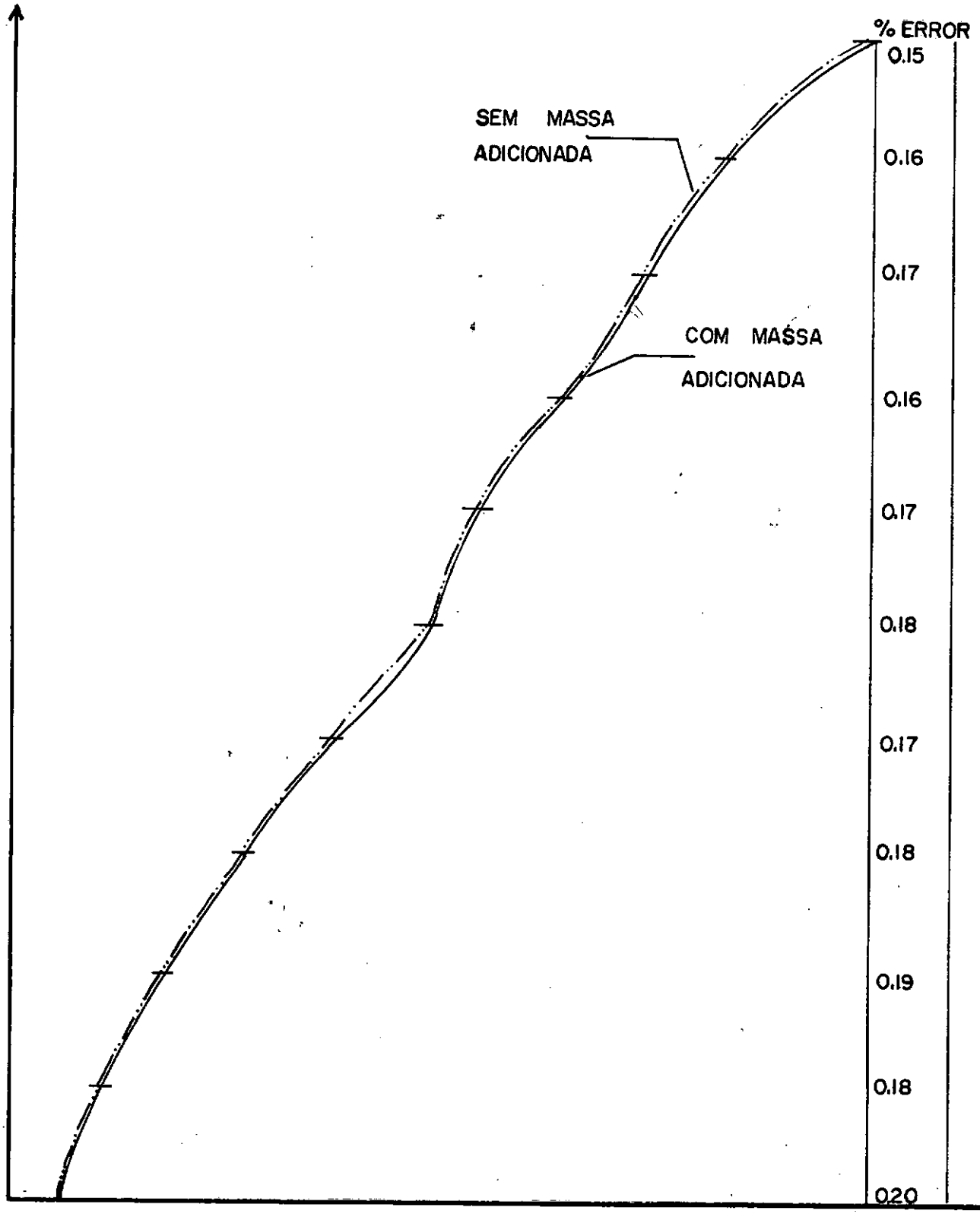


Fig. 6.4 - Amplitudes dos deslocamentos

(a) massa de 0. kg

(b) massa de 10^4 kg

(c) massa de 10^5 kg

(d) massa de 10^6 kg

A análise foi realizada levando em conta os efeitos de massa adicionada e de comportamento linear do solo para a estaca.

Se obtiveram os resultados das amplitudes dos deslocamentos de cada um dos nós da estrutura.

Os deslocamentos máximos alcançados correspondem a uma massa associada de 10^5 kg (0.119 m no topo), enquanto que a menor corresponde a uma massa de 10^6 kg (0.062 m no topo) (Fig. 6.6).

Isto se deve que a presença de grandes massas altera significativamente os períodos naturais de vibrações da estrutura, afastando-os e aproximando-os aos períodos de ação das ondas. No caso (c) (de massa 10^5 kg) o deslocamento da estrutura é maior porque os períodos naturais associados a essa estrutura, são os que mais se acercam ao período da onda de 15 seg.

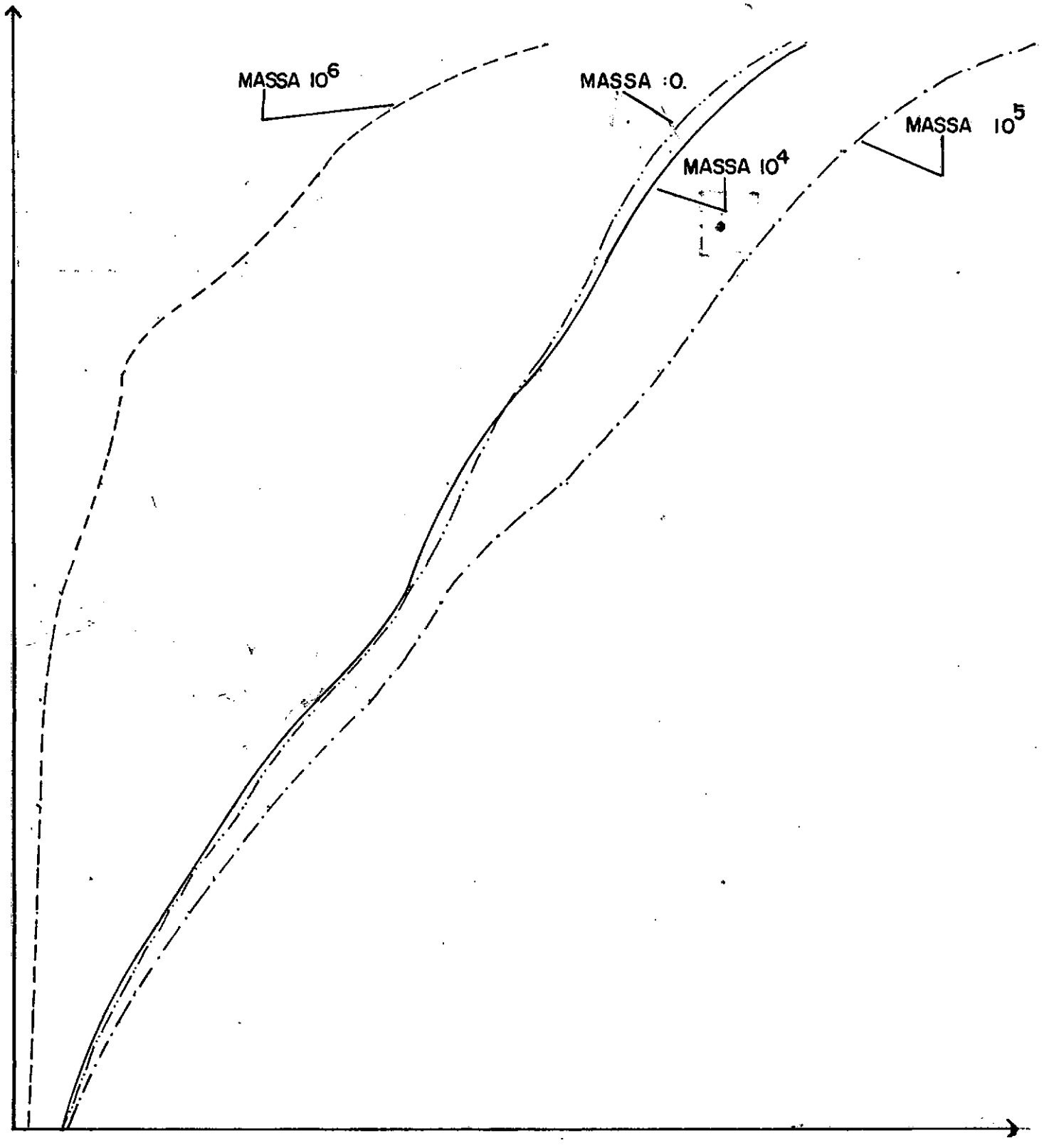


Fig. 6.5 - Amplitudes da resposta em frequência para distintas massas da plataforma

12 m (a 20 m debaixo do nível do mar). Logo tem diâmetro constante de 12 m máximo, até a plataforma, a 30 m sobre o nível do mar. A ação do mar sobre cada uma das colunas é determinada por meio da fórmula de Morison.

A plataforma situada a 30 m sobre o nível do mar, constitue o componente restante da estrutura. Nela são colocadas as maquinárias necessárias para a operação, assim como os requerimentos da tripulação.

O modelo estrutural é o correspondente ao da Figura 6.6. Nele se pode observar que a base se discretizou como um conjunto de vigas horizontais e inclinadas de rigidez bastante maior ao da coluna (diâmetro 75 m e espessura 25 m) |[15]|. Cada coluna é discretizada por 4 elementos cilíndricos de diâmetros que representam a variação especificada anteriormente. A plataforma foi discretizada por 3 membros também circulares, que representam a ação da mesma. Também o peso da plataforma é representado por massas que são agregadas na diagonal da matriz de massa para cada movimento de translação dos nós que pertencem a plataforma:

nó 1: 189.000 kg

nó 2: 283.500 kg

nó 3: 189.000 kg

nó 4: 189.000 kg

O efeito de massa adicionada é levado em conta. Os coeficientes α e β do amortecimento (equação 4.2) são determinados em função de porcentagens de amortecimento de 4% com respeito ao crítico para dois modos de vibração quaisquer.

A análise é realizada por meio do método da resposta em frequência.

O material utilizado para esta estrutura é concreto pelo que o módulo de elasticidade é 2.1×10^9 kg/m^2, o módulo de corte 8.4×10^8 kg/m^2 e a densidade de massa 2.1×10^3 kg/m^3.

Para o solo, o módulo de corte é de 5.097.000 kg/m^3, enquanto que a densidade de massa é de 2.100 kg/m^3 e o coeficiente de Poisson igual a 0.

O mar pode atuar em qualquer direção; neste caso, se tem como atuando na direção x, com as seguintes características:

Profundidade	-	140.00 m.
Frequência	-	0.6283 rad/seg
Período	-	10.00 s
Densidade relativa	-	102.00 kg.s^2/m^4
Viscosidade cinemática	-	0.001 m^2/s
C_M	-	1.5
C_D	-	1.0
Aceleração de gravidade	-	9.81 m/s^2

O efeito de massa adicionada é levado em conta. Os coeficientes α e β do amortecimento (equação 4.2) são determinados em função de porcentagens de amortecimento de 4% com respeito ao crítico para dois modos de vibração quaisquer.

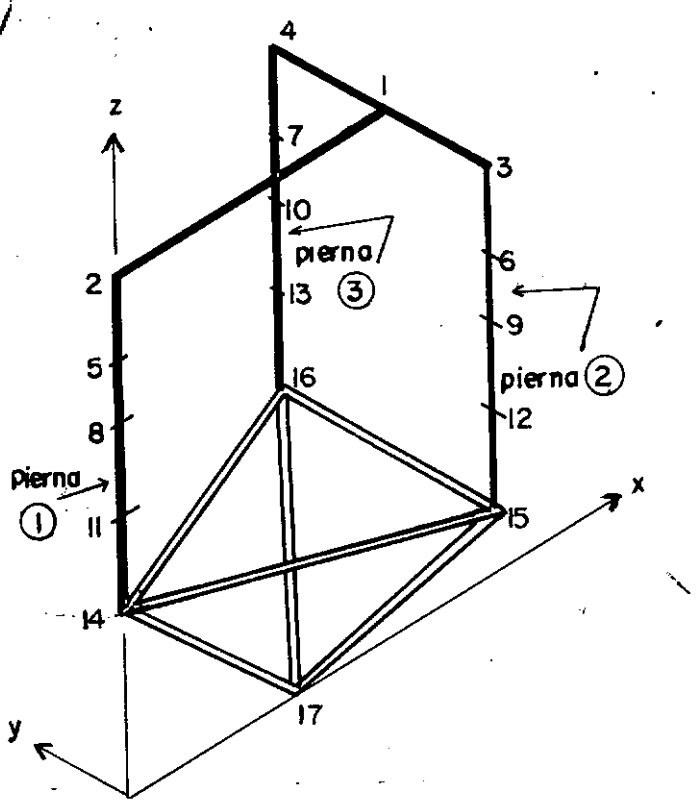
A análise é realizada por meio do método da resposta em frequência.

O material utilizado para esta estrutura é concreto pelo que o módulo de elasticidade é 2.1×10^9 kg/m^2, o módulo de corte 8.4×10^8 kg/m^2 e a densidade de massa 2.1×10^3 kg/m^3.

Para o solo, o módulo de corte é de 5.097.000 kg/m^3, enquanto que a densidade de massa é de 2.100 kg/m^3 e o coeficiente de Poisson igual a 0.

O mar pode atuar em qualquer direção; neste caso, se tem como atuando na direção x, com as seguintes características:

Profundidade	-	140.00 m
Frequência	-	0.6283 rad/seg
Período	-	10.00 s
Densidade relativa	-	102.00 kg.s^2/m^4
Viscosidade cinemática	-	0.001 m^2/s
C_M	-	1.5
C_D	-	1.0
Aceleração de gravidade	-	9.81 m/s^2



NO	COORDENADAS X	Y	Z
1	30.00	0.00	170.00
2	0.00	0.00	170.00
3	30.00	-17.32	170.00
4	30.00	17.32	170.00
5	0.00	0.00	140.00
6	30.00	-17.32	140.00
7	30.00	17.32	140.00
8	0.00	0.00	120.00
9	30.00	-17.32	120.00
10	30.00	17.32	120.00
11	0.00	0.00	90.00
12	30.00	-17.32	90.00
13	30.00	17.32	90.00
14	0.00	0.00	60.00
15	30.00	-17.32	60.00
16	30.00	17.32	60.00
17	20.00	0.00	0.00

ELEMENTO	CONETIVIDADE NO INI.	NO FIN.	DIAM.	ESPES.
1	1	2	12.0000	0.5000
2	1	4	12.0000	0.5000
3	1	3	12.0000	0.5000
4	2	5	12.0000	0.5000
5	3	6	12.0000	0.5000
6	4	7	12.0000	0.5000
7	5	8	12.0000	0.5000
8	6	9	12.0000	0.5000
9	7	10	12.0000	0.5000
10	8	11	14.0000	0.6250
11	9	12	14.0000	0.6250
12	10	13	14.0000	0.6250
13	11	14	18.0000	0.8750
14	12	15	18.0000	0.8750
15	13	16	18.0000	0.8750
16	14	15	75.0000	25.0000
17	15	16	75.0000	25.0000
18	16	14	75.0000	25.0000
19	14	17	75.0000	25.0000
20	15	17	75.0000	25.0000
21	16	17	75.0000	25.0000

Fig. 6.7 - Modelo estrutural plataforma de gravidade

A análise é realizada inicialmente para uma onda de amplitude unitária (1 m). A idéia fundamental é obter a resposta da estrutura para estas condições de ações do mar, as quais por sua vez servem para determinar de uma forma direta, a resposta da estrutura para distintas amplitudes da onda. Na Figura 6.7 se apresentam as amplitudes dos deslocamentos e rotações para a perna 1, correspondentes ao plano x z de ação da onda (e para onda de amplitude unitária).

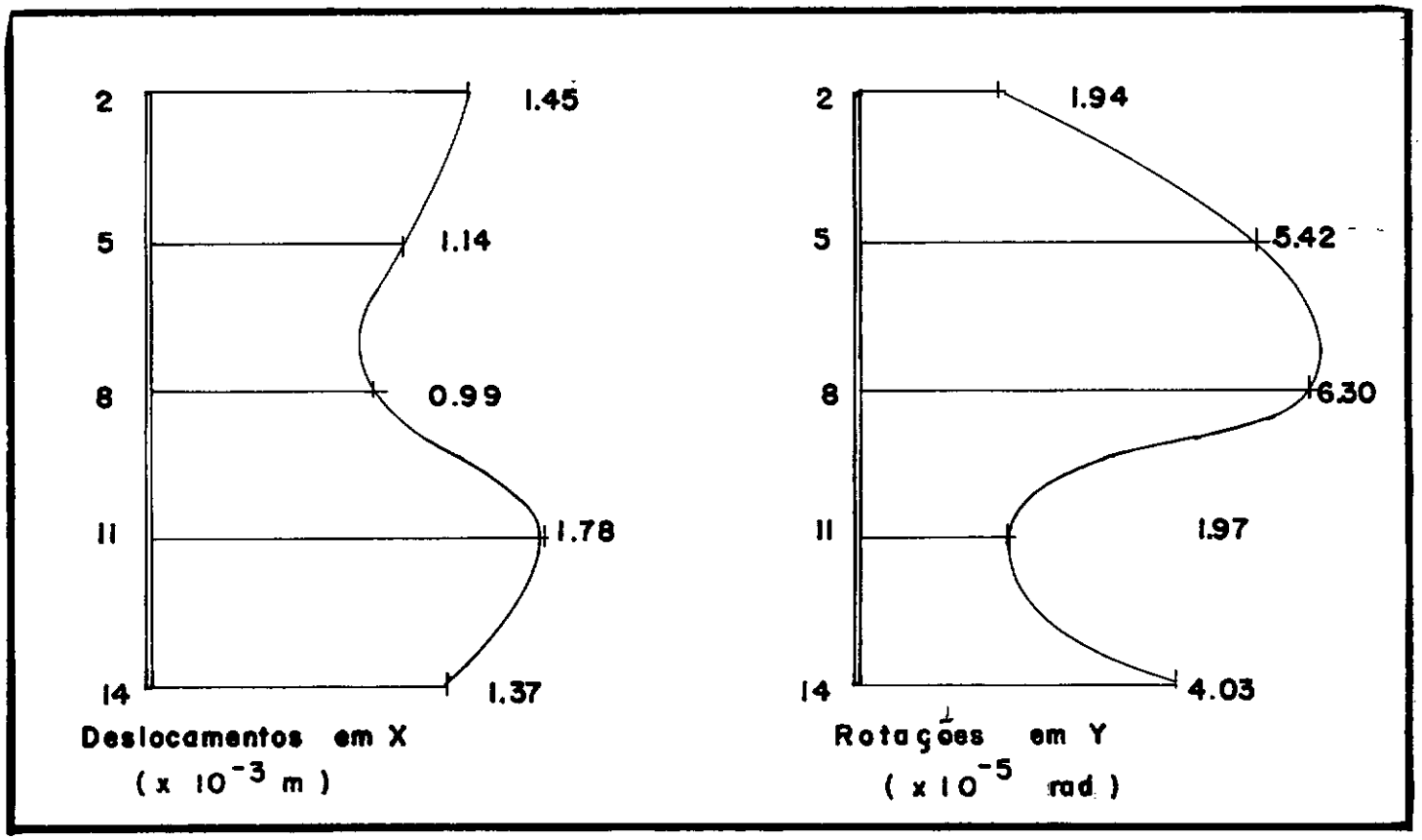


Fig. 6.7 - Amplitude de deslocamentos em estruturas de gravidade

Também, na Figura 6.8 são apresentados os valores de corte e momentos fletores.

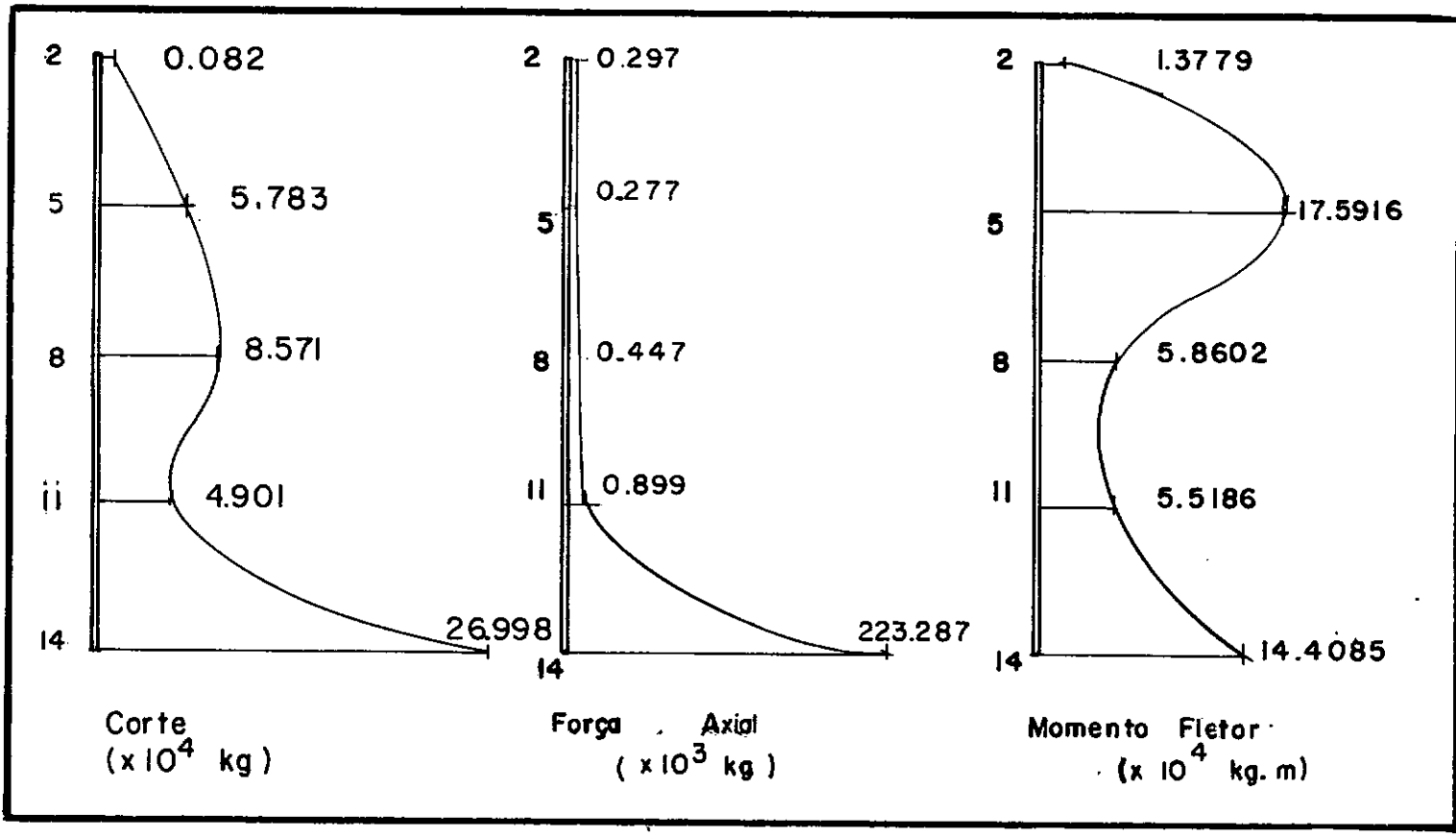


Fig. 6.8 - Valores de corte, momentos fletores e força axial, perna 1

As reações na base da estrutura têm amplitude de (Fig. 6.9).

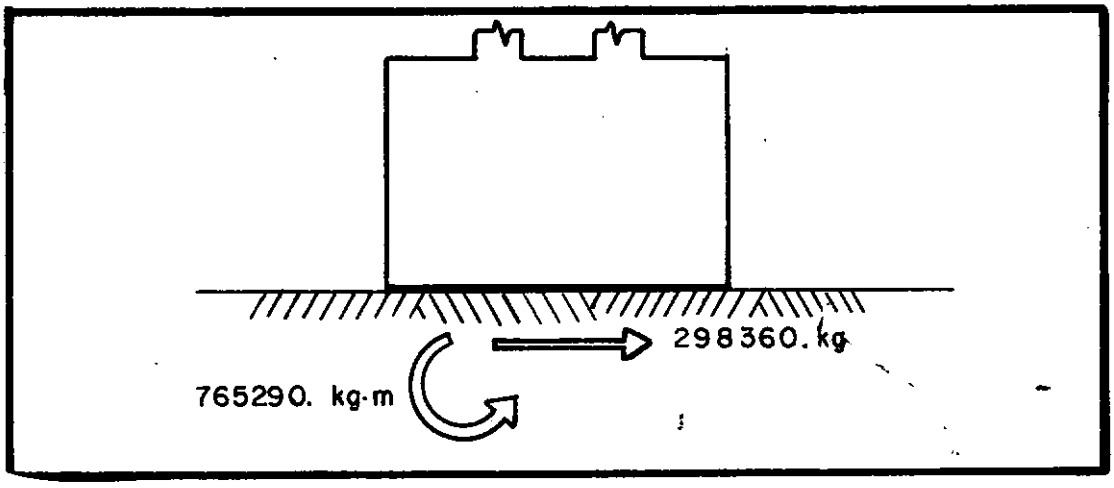


Fig. 6.9 - Amplitudes da reação do solo na estrutura (para uma amplitude de onda unitária)

A onda de desenho desta estrutura é de aproximadamente 20 m de altura (amplitude igual a 10 m). Ao realizar-se uma análise com esta altura de onda, se obtiveram os seguintes valores de deslocamentos para a perna 1. (Fig. 6.10).

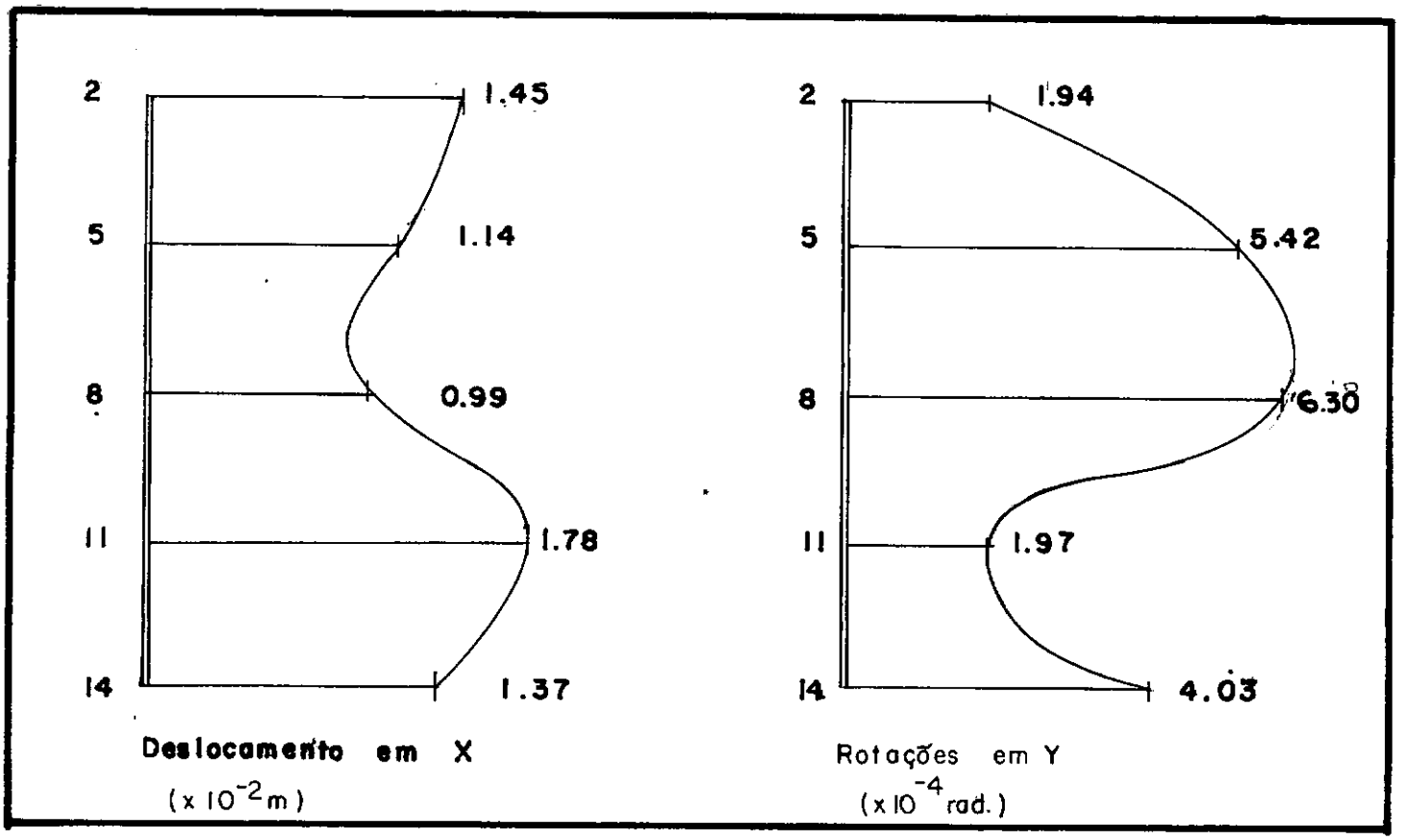


Fig. 6.10 - Amplitudes de deslocamentos para amplitude da onda de 10 m

Estes deslocamentos e rotações correspondem aos obtidos para uma amplitude de onda unitária, multiplicadas por 10. Também, as reações nodais e as forças nos membros são obtidas em base aos resultados da análise para uma onda de amplitude unitária multiplicados pela amplitude real da onda (neste caso 10). Desta forma, será determinada a resposta da estrutura de gravidade para o estado do mar proposto e para quaisquer amplitudes de onda.

Para completar mais os resultados, se apresenta a continuação os valores das amplitudes dos deslocamentos para a perna 2. (Figura 6.11) (para uma onda de amplitude unitária). No

ta-se que os resultados da perna 3 são iguais aos da 2 por ser simétrica a estrutura e as cargas atuarem no plano de simetria.

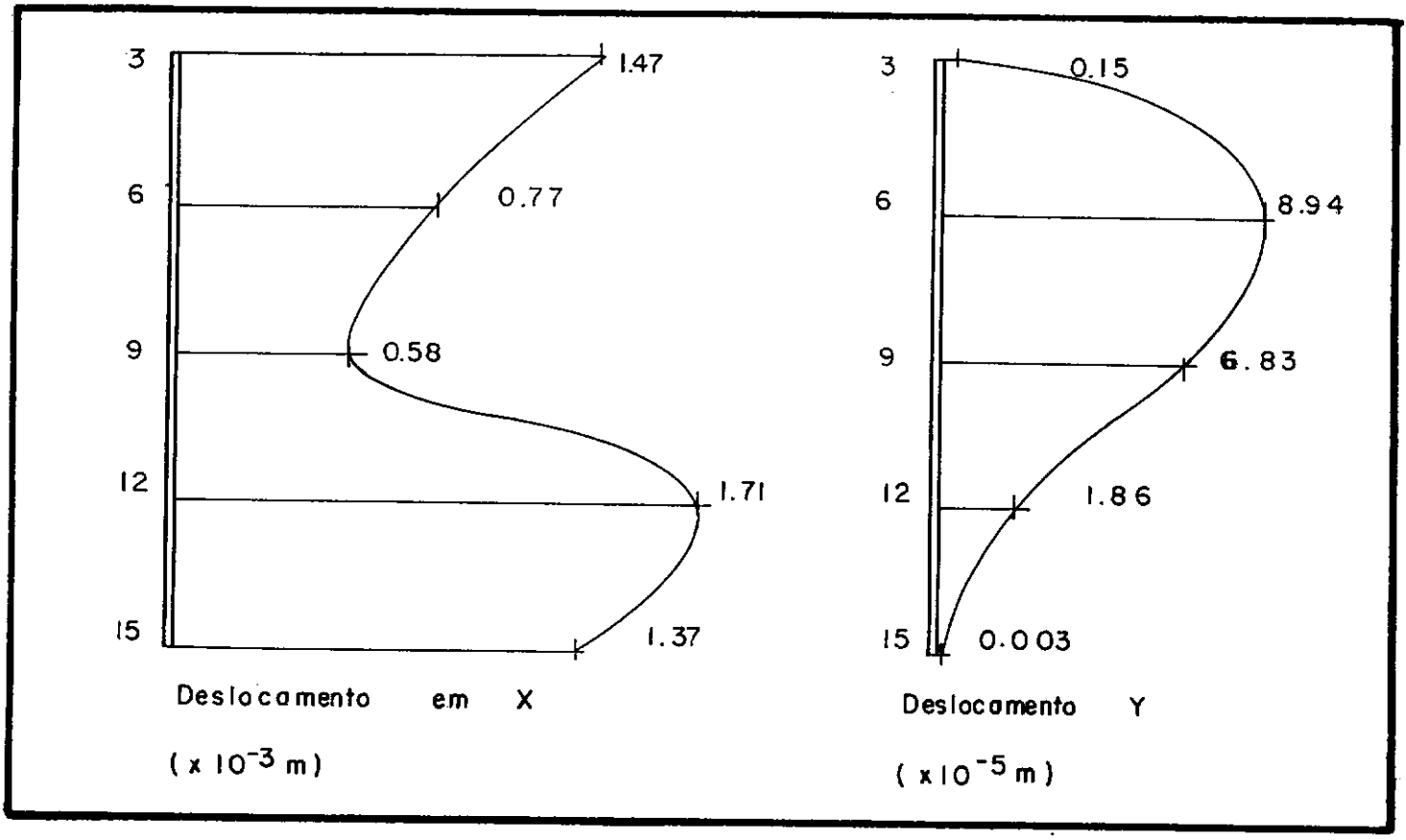


Fig. 6.11 - Amplitudes de deslocamentos (perna 2, onda de amplitude unitária)

Também se apresentam os valores das rotações correspondentes a perna 2, para onda de amplitude unitária (Fig. 6.12).

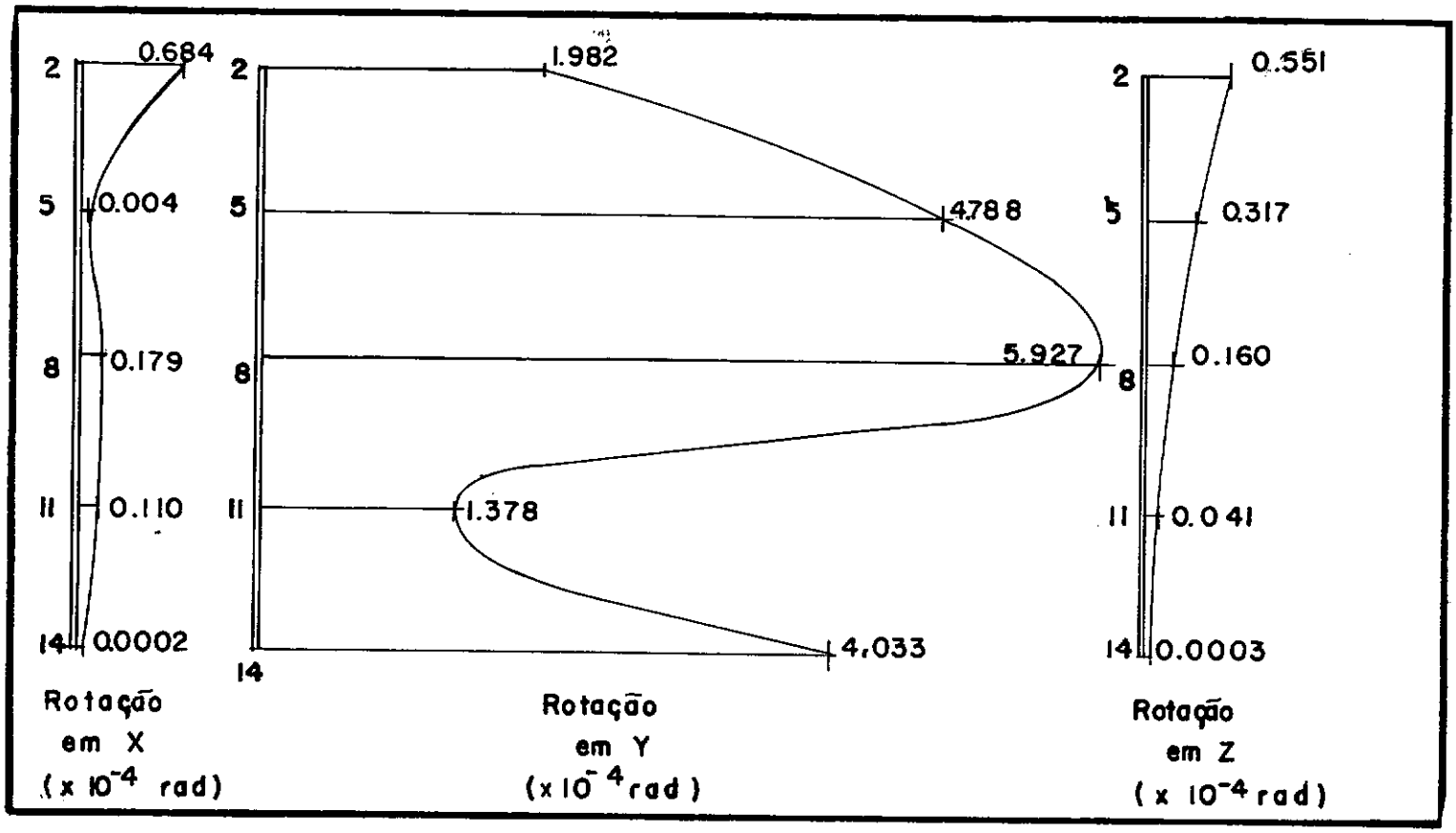


Fig. 6.12 - Amplitudes das rotações (perna 2, onda de amplitude unitária)

6.3 - EXEMPLO III - ESTRUTURA DE AÇO

O terceiro exemplo constitue uma estrutura de aço, sendo este tipo as de utilização mais generalizada. Para o desenvolvimento deste exemplo, se utilizou a estrutura que se apresenta na Figura (6.13) [38, 44]. Está constituída por quatro pernas de aço, de forma cilíndrica, as quais estão unidas a membros horizontais e inclinados, também de aço e cilíndricos. A estrutura tem uma altura de 180 m, repartidos em 7 níveis. As pernas principais possuem um diâmetro de 4 m e uma espessura de 27 cm, enquanto que os membros secundários têm um diâmetro de

1.83 m (72") e uma espessura de 12 cm. A separação das pernas varia desde 60 m (no topo da estrutura), até 82 m (no fundo do mar). A Figura 6.15 contém o modelo estrutural discretizado. O aço utilizado tem módulo de elasticidade de 2.0×10^{10} kg/m^2, módulo de corte de 8.0×10^9 kg/m^2 e densidade de massa de 2.0×10^3 kg/m^3.

O modelo do solo utilizado corresponde ao de infinitamente rígido, descrito na seção 4.6.2. Para a análise, foi levado em conta a existência da plataforma no topo da estrutura por meio de massas de 6×10^5 kg que se agregam nos nós 1, 4, 13 e 16 que correspondem aos nós superiores (altura = 180 m) das pernas principais. É levado em conta o efeito da massa adicionada devido a existência do fluído (água) aos derredores da estrutura. A porcentagem do amortecimento é de 4% do crítico para o primeiro modo de vibração e de 3% para o segundo.

As características do mar são:

profundidade	- 150.00 m
Frequência	- .6283 rad/s
Período	- 10.00 seg
Densidade relativa	- 102.00 kg.s^2/m^4
Viscosidade cinemática	- 0.001 m^2/s
C_M	- 1.5
C_D	- 1.0
Aceleração de gravidade	- 9.81 m/s^2
Amplitude da onda	- 8.00 m

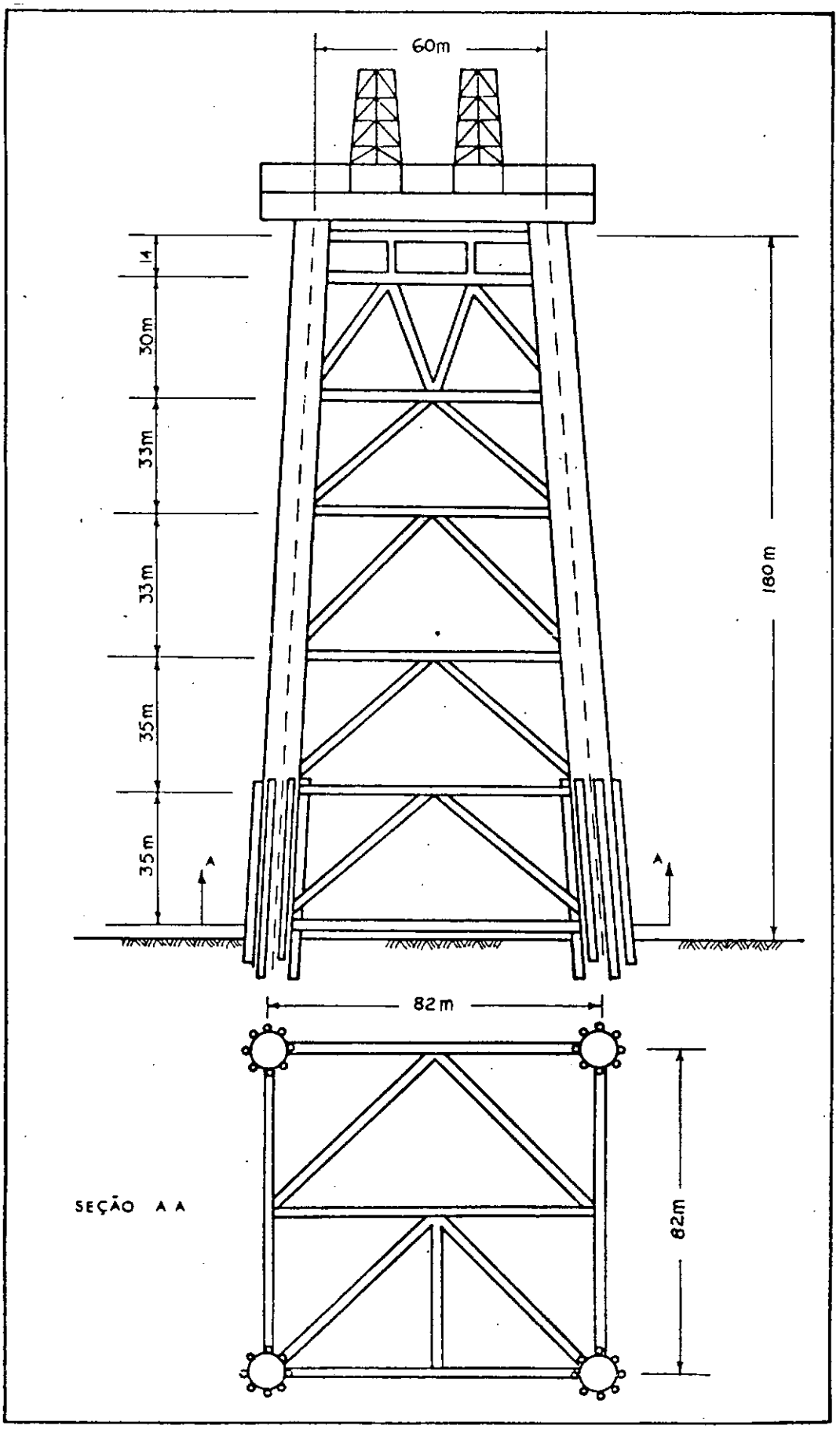


Fig. 6.13 - Estrutura de aço

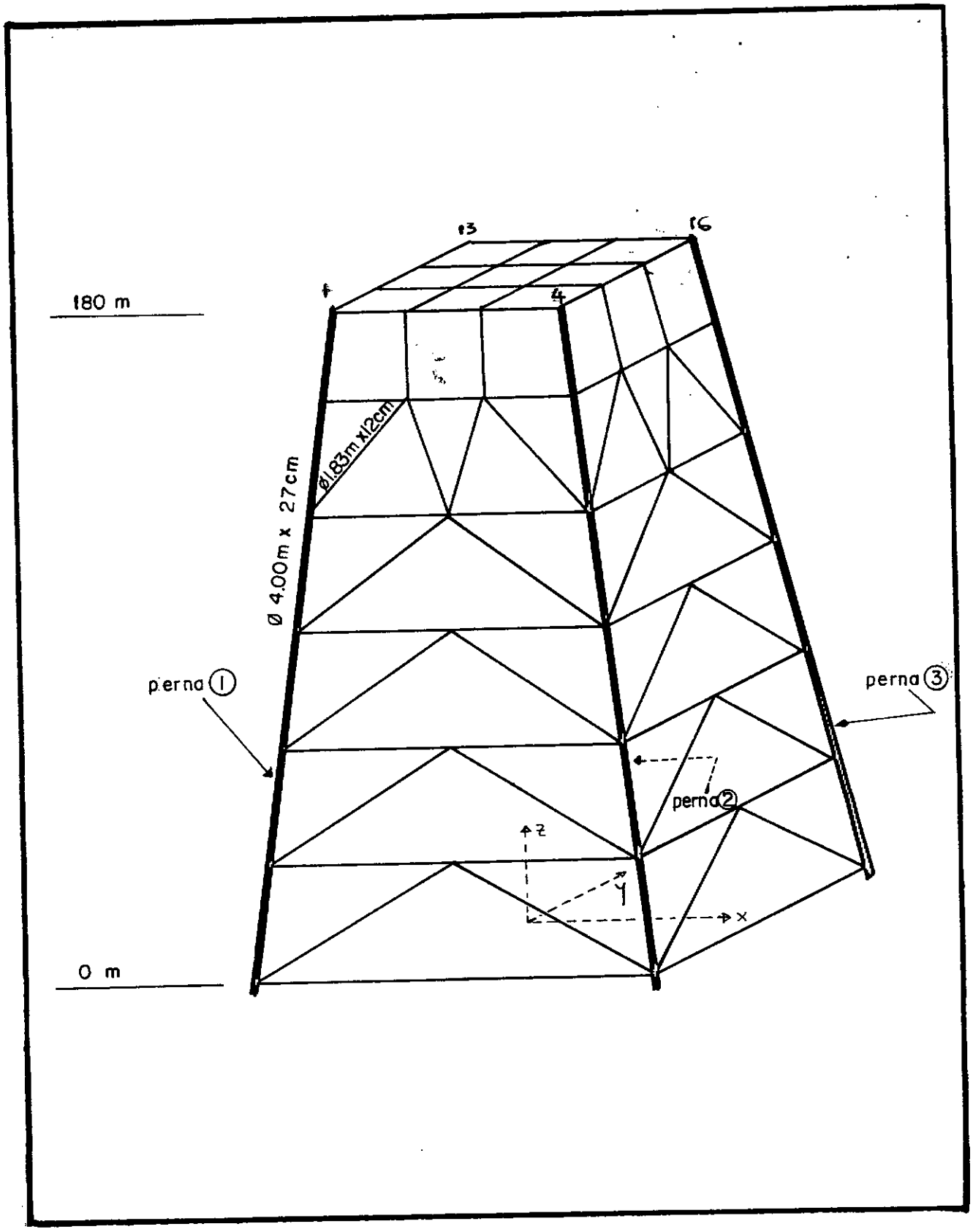


Fig. 6.14 - Modelo estrutural (exemplo III)

O mar atua na direção y, ou seja, no plano de simetria da estrutura (y z).

O objetivo principal deste exemplo é o de comparar os resultados obtidos pelos métodos de resposta em frequência e de integração direta, assim como o esforço computacional necessário em cada caso.

A análise com domínio da frequência é realizada seguindo o procedimento especificado na seção 5.2. O tempo de processado requerido foi de 41.15 segundos para a geração das cargas em frequência e de 921.79 segundos para a resolução do sistema e determinação da resposta estrutural. Total de 962.94 segundos (16 minutos, 2.94 segundos). Os resultados de amplitudes dos deslocamentos na direção e para a perna 1 são ilustrados na Figura 6.15. Assim mesmo, na Figura 6.16 é ilustrado o resultado que se obtém ao transformar a resposta do deslocamento do nó 1 na direção y com domínio na frequência, ao domínio do tempo; este resultado corresponde ao regime permanente, e é comparado com o obtido por meio da integração direta no tempo.

A análise com domínio no tempo é realizada, seguindo o procedimento especificado na seção 5.3. O tempo total requerido (do processador) para a determinação da resposta foi de 3477.8 segundos (57 minutos e 57.08 segundos). A análise foi realizada cada segundo, ou seja, o período de ação das cargas foi discretizado em 10 intervalos. Se realizou a integração por 5 período que alcançar o regime permanente da resposta.

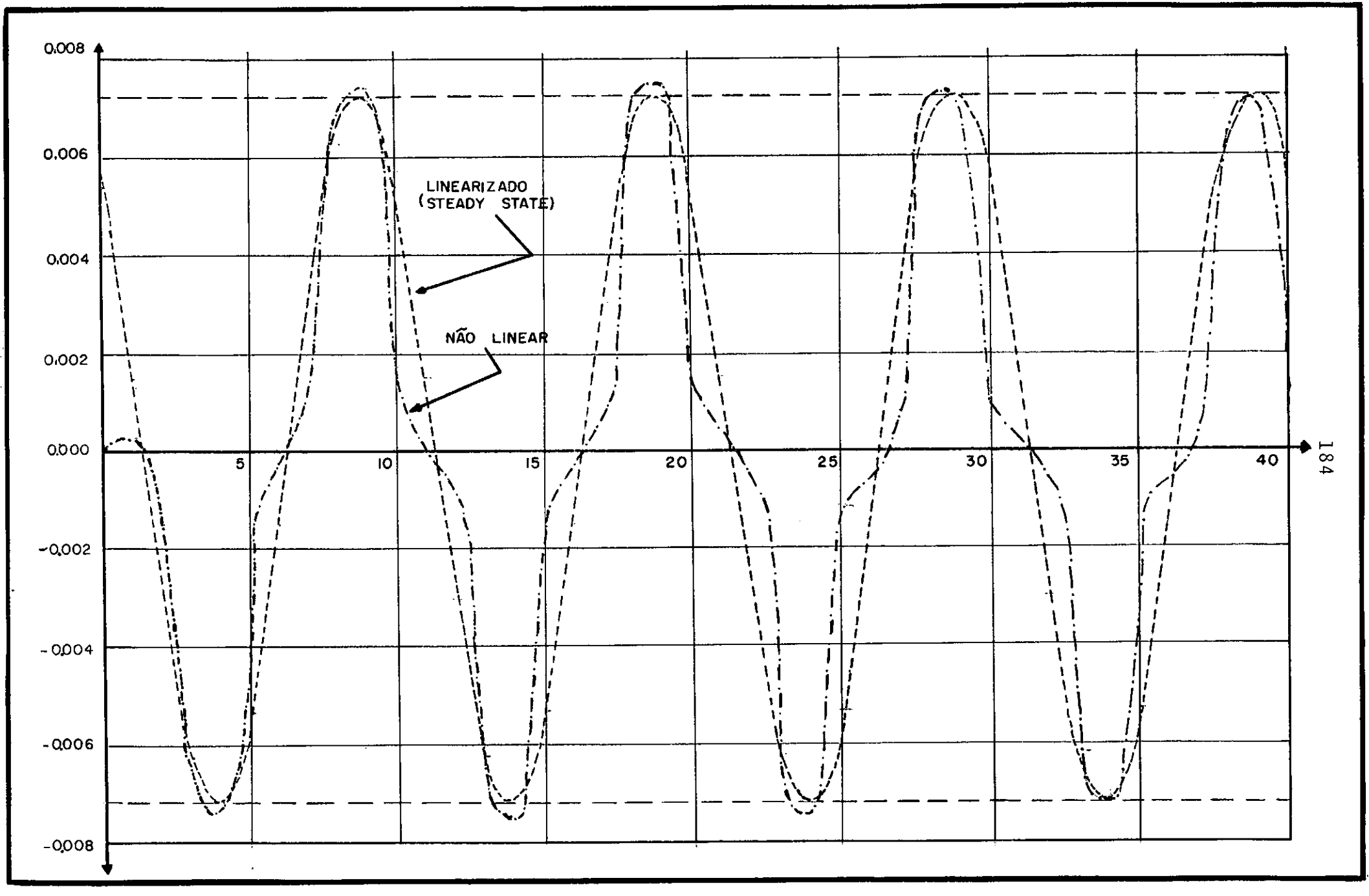


Fig. 6.15 - Deslocamentos no topo da estrutura

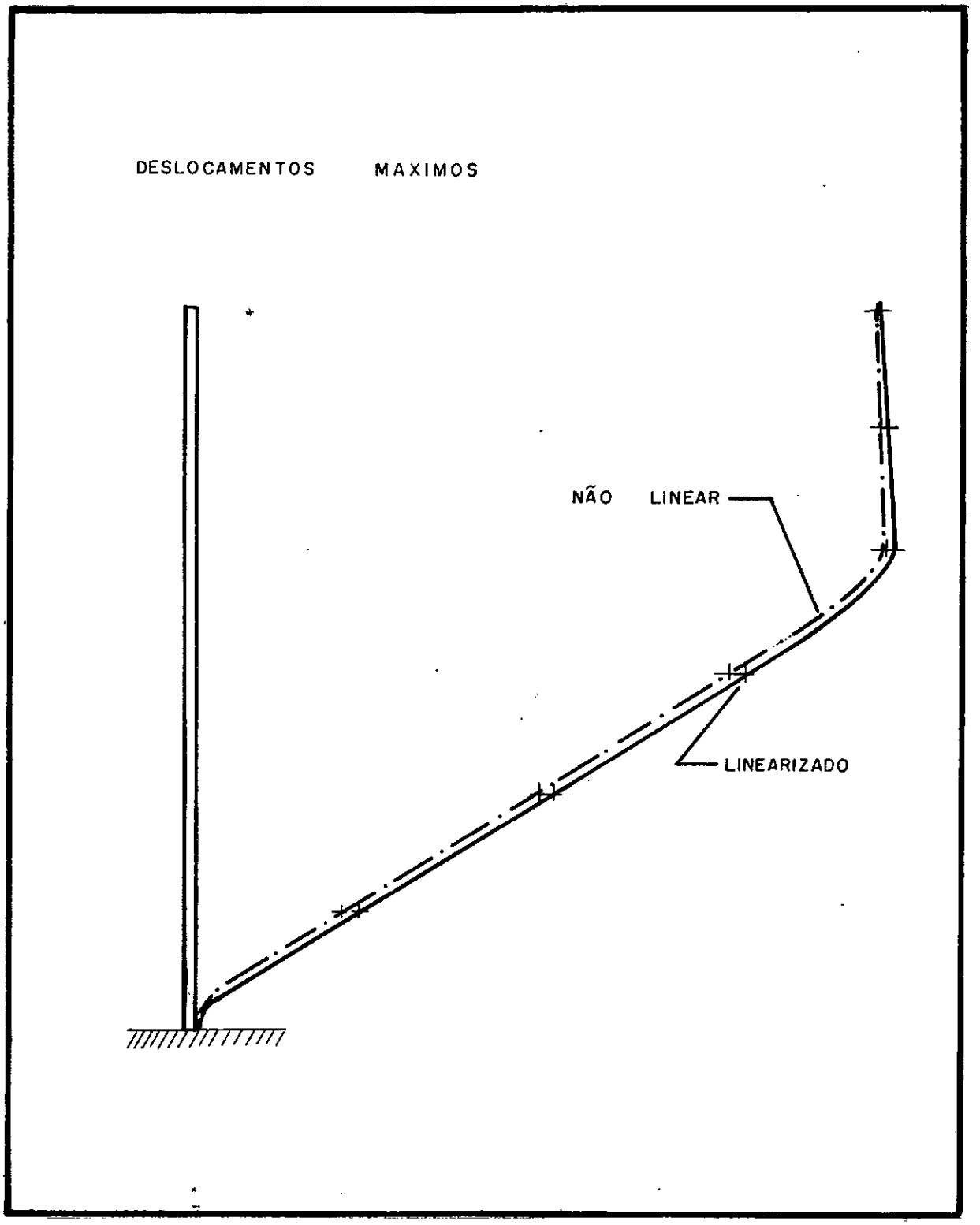


Fig. (6.16)

CONCLUSÕES

Durante a realização deste trabalho, várias conclusões importantes foram elaboradas:

- Se observou a necessidade de realizar análises estruturais por meio de modelos tridimensionais aplicados, os quais permitem uma melhor e mais completa compreensão assim como uma descrição mais apropriada do comportamento dinâmico das estruturas off-shore. Isto se deve principalmente a variabilidade da direção de ação das ondas e a complexa geometria que apresentam algumas destas estruturas.

- Os resultados que obtidos por meio da linearização do termo de velocidades na fórmula de Morison são bastantes aceitáveis, como mostra a Figura 6.3. O erro cometido devido a linearização conduz a resultados que são um pouco mais conservadores que os obtidos com o termo quadrático de velocidades. Portanto, este erro poderia muito bem ser incluído dentro das aproximações do modelo dinâmico estrutural, tais como linearização geométrica, matrizes de massa e amortecimento, assim como dentro das aproximações dos comportamentos, do mar e do solo. Portanto a linearização é de utilização conveniente.

Também se tem que os resultados obtidos mediante a utilização de ambos métodos (integração direta e resposta em frequência) são bastante parecidos. Pelo qual é importante levar em conta que a parte da resposta obtida pelo método de in-

tegração direta corresponde ao regime transitório, se baseia em condições iniciais de deslocamento, velocidade e aceleração nulas, suposições que correspondem a um estado em que tanto o mar como a estrutura se encontram em repouso absoluto. Esta suposição é falsa, por tanto, o regime transitório da resposta, neste caso, carece de significado estrutural. Por isto é que resulta muito mais conveniente a utilização do método que produz uma resposta em frequência, já que este método dá como resultado diretamente o regime permanente ("steady state"), o qual se é de importância primordial para este tipo de análise. Este método também apresenta outra vantagem muito importante com relação ao de integração direta, a qual consiste em que o sistema de equações que modela o comportamento da estrutura, se resolve de uma vez só enquanto que pelo método de integração direta, será necessário resolver o sistema estrutural, tantas vezes quantas será necessária para alcançar o Regime Permanente. Isto a sua vez se traduz em grande economia de tempo computacional, razão pela qual o método de resposta em frequência resulta ser muito mais poderoso para este tipo de análise dinâmica de estruturas off-shore. Neste sentido, os tempos de processamentos utilizados para a realização das análises correspondentes aos exemplos, num computador Burroughs 6700, são as seguintes: (Tabela 7.1):

	(a) RESPOSTA NO TEMPO (s)	(b) RESPOSTA NA FREQUÊNCIA (s)	DIFERENÇA (s)	PORCENTAGEM DE (b) COM RESPEITO A (a)
Exemplo I	164.64	28.34	136.30 s	17.21%
Exemplo II	-	35.24	-	-
Exemplo III	3477.08	962.94	2514.14	27.69%

Tabela 7.1

Como conclusão, é importante também recordar que o método de integração direta, por ser um método passo a passo, produz uma série de dificuldades, as quais devem ser salvadas cuidadosamente, já que de não ser assim, só poderia chegar a soluções erroneas. Este obstáculo não se apresenta no caso da análise no domínio da frequência, já que o procedimento é matematicamente direto e não aproximado, em consequência não há problemas na convergência nem na estabilidade numérica.

O efeito da massa adicionada devido a inexistência d'água, resulta ser de fácil consideração e de efeito mediantemente importante nos resultados obtidos (Fig. 6.4).

- Os modelos utilizados são relativamente singelos, especialmente no que respeita a sua compreensão.

- Em base aos diferentes resultados obtidos na realização de análise para distintas massas no topo da estrutura do exemplo I, se recomenda fazer estimações cuidadosas em relação as massas no topo das estruturas, assim como a sua distribuição na

plataforma já que seu efeito dinâmico pode, em muitos casos ser inesperado. Isto se deve principalmente as variações que se produzem nos períodos fundamentais de vibração das estruturas.

- Para a comparação do efeito da linearização da superfície do mar, no Exemplo 1 foi obtido um aumento nos deslocamentos de aproximadamente 60% no caso de altura de onda de 12 m e de 12% no caso de altura de onda de 3 m. A profundidade do mar foi de 60 m, pelo que o efeito da linearização da superfície do mar vai sendo menor a medida que a relação H/d vai sendo menor (H = amplitude da onda, d = profundidade do mar). Portanto sugere-se aprofundar o estudo sobre a sua utilização tendo em vista as vantagens computacionais decorrentes.

- Por meio da realização deste trabalho se deduz que para a análise de estruturas off-shore, devem ser levadas em conta grandes quantidades de fatores, os quais por sua vez definem distintos modelos e distintos métodos. A escolha dos modelos de comportamento do mar, interação mar-estrutura, comportamento estrutural, comportamento do solo, interação solo-estrutura e método de análise, deve ser feita em forma cuidadosa e levando em conta as particularidades do problema a ser analizado. Nesse sentido, os esforços deste trabalho, foram concentrados em uma teoria que descreve o comportamento do mar e um estudo sobre o comportamento dinâmico das estruturais como tais, assim como nos métodos distintos por meio dos quais se realiza a análise.

- Como já citado anteriormente, a indústria petroleira é de importância vital para a Venezuela. Este acontecimento se conjuga com uma profunda dependência a respeito das grandes potencias estrangeiras, muito especialmente os Estados Unidos. A tecnologia é comprada no exterior sem que existam maiores esforços para assimilá-las nem por desenvolver uma própria. Na área da engenharia off-shore a situação não é nada prazenteira. Por isto, é muito importante que se realizem trabalhos de investigação que tenham como objetivos fundamentais a construção de um baseamento para o desenvolvimento de uma tecnologia própria, que esteja ao serviço dos interesses dos venezuelanos, e se cumpram com trabalhos de difusão e informação dos objetivos que vão sendo alcançados. O presente trabalho representa um esforço inicial dentro de um plano de investigação que contempla tarefas a curto e médio prazo. Entre elas, a análise dinâmica seguindo distintas teorias de comportamento do mar, assim como o estudo de modelos mais sofisticados que descrevam a interação dinâmica solo-estrutura.

BIBLIOGRAFIA

| [1] | DEAN, R. G. - "Relative Validities of Water Wave Theories". Civil Engineering in the Oceans, ASCE Conference, San Francisco, California 1967.

| [2] | DAYLEY, J. E. - "Design of Fixed Offshore Platforms". Univeristy of Texas at Austin, Spring 1977.

| [3] | FERRANTE, A. J. - "Offshore Structures". Curso ditado na University of California at Irvine, Janeiro-Março 1980.

| [4] | FIALHO, G. M. e S. H. SPHAIER - "Determinação dos Campos de Velocidades e Acelerações Devido a Ondas do Mar". VI Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria, Ciudad de México, Septembre 1979.

| [5] | ROUSE H. and S. INCE - "History of Hydraulics". Dover publications Inc., N.Y. 1957.

| [6] | BORGMAN, L. E. - "Spectral Analysis of Ocean Wave Forces on Piling". Journal of the Waterways and Harbors Divisions. Proceedings ASCE, May 1967.

| [7] | MORISON, J. R., M. P. O'BRIEN, J. W. JOHNSON and S. SHAAF - "The Force Exerted by Surface Waves on Piles". Petroleum Transactions, Vol. 189, no. TP 2846, 1950.

| [8] | HALLAN, M. G. and A. HOOPER - "Fatigue Analysis of Steel-Jacket Production Platforms Including the Effect of Dynamic Response". Offshore Structures Engineering Carneiro F. L. L. B., A. J. Ferrante and C. A. Brebbia. Pentech Press.

| [9] | WADE, B. G. and M. DWYER - "On the Application of Morison's Equation to Fixed Offshore Platforms". Offshore Technology Conference, May 1976, Paper OTC-2723.

| [10] | CHAKRABARTI, S. K., W. A. TAM and A. L. WOLBERT - "Wave Forces on a Randomly Oriented Tube". Offshore Technology Conference, May 1975, Paper OTC-2190.

| [11] | MADDOX, N. R. - "A Deterministic Fatigue Analysis for Offshore Platforms". J. Petroleum Technology, July 1975.

| [12] | CARNEIRO, F. L. L. B. - "Codes for Offshore Structures. Design Criteria and Safety Requirements". Offshore Structures Engineering. Carneiro F. L. L. B., A. J. Ferrante and C. A. Brebbia. Pentech Press, 1979.

| [13] | BREBBIA, C. A. - "The Analysis of Offshore Structures". Offshore Structures Engineering. Carneiro F. L. L. B., A. J. Ferrante and C. A. Brebbia. Pentech Press, 1979.

|[14]| HONG, S. T. and J. C. BROOKS - "Dynamic Behavior and Design of Offshore Caissons". Offshore Technology Conference, OTC, 1976, Paper OTC-2555.

|[15]| SIGBJÖRNSSON R., K. BELL and I. HOLLAND - "Dynamic Response of Framed and Gravity Structures to Waves". Numerical Methods in Offshore Engineering. Edited by Zienkiewicz, O. C., Lewis and Stagg.

|[16]| NEWMARK, N. M. and E. ROSENBLUETH - "Fundamentals of Earthquake Engineering"Prentice Hall, 1971.

|[17]| CLOUGH, R. and J. PENZIEN - "Dynamics of Structures. Mc Graw-Hill, 1975.

|[18]| BATHE, K-J and E. L. WILSON - "Numerical Methods in Finite Element Analysis". Prentice-Hall Inc., 1976.

|[19]| SCHUM, W. - "The Structural Design Appraisal of Deepwater Steel Platforms". Offshore Engineering Structures. pp. 79-81, Carneiro F. L. L. B., A. J. Ferrante and C. A. Brebbia. Pentech Press, 1979.

|[20]| HURTY, W. and RUBINSTEIN, M. - "Dynamics of Structures". Prentice-Hall, Inc. 1964.

|[21]| PRZEMIENIECKI, J. S. - "Theory of Matrix Structural Analysis". McGraw-Hill, 1968.

|22| BREBBIA, C. A. and A. J. FERRANTE - "Computational Methods for Engineering Problems". Pentech Press, 1979.

|23| GENATIOS, C. y A. J. FERRANTE - "Dos Métodos de Analisis Dinâmico para Estructuras Sometidas a Cargas de Oleaje". Segundo Colóquio Brasil-Venezuela de Ingeniería Civil, Anais, Mayo 1981.

|24| FERRANTE, A. J.; E. C. VALENZUELA and G. B. ELLWANGER - "An Integrated Computational Procedure for the Analysis off Offshore Structures Supported by Piles". Journal Advances in Engineering Software, Volume 2, No. 4, October 1980.

|25| PRATES DE LIMA E. C. - "Lorane-Dina: Uma Linguagem Orientada para Análise Dinâmica de Estruturas", D.Sc. Tese, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1977.

|26| NOLTE, K. G. and J. E. HANSFORD - "Closed-Form Expression for Determining the Fatigue Damage of Structures Due to Ocean Waves". Offshore Technology Conference, Paper OTC-2606, May 1976.

|27| NATARAJA, R. and C. L. KIRK - "Dynamic Responde of a Gravity Platform Under Random Wave Forces". Offshore Technology Conference, Paper OTC-2904, May 1977.

|28| WADE, B. G. and DWYER, M. - "On the Application of Morison's Equation to Fixed Offshore Platforms". Off-

shore Technology Conference. Paper OTC 2733, 1975.

|29| JENNINGS, A. - "Matrix Computation for Engineers and Scientists". J. Wiley and Sons., 1977.

|30| JACOBSEN, L. and R. AYRE - "Engineering Vibrations". Mc Graw-Hill, B. C. 1958.

|31| FORTOUL, C. - "Análisis Matricial de Estructuras", Curso Dictado en la Universidad Central de Venezuela, Marzo 1979.

|32| BIGGS, J. M. - "Introduction to Structural Dynamics". Mc Graw-Hill, N. Y., 1964.

|33| McLACHLAN, N. - "Theory of Vibrations". Dover Publications N. Y. 1951.

|34| DESAI, C. S. and J. ABEL - "Introduction to the Finite Element Method". Van Nostrand Reinhold Co., N. Y.,1972.

|35| ZIENKIEWICZ, O. C. - "The Finite Element Method". McGraw Hill B. C. 1977.

|36| SULLIVAN W. R., L. C. REESE and C. W. FENSKE - "Unified Method for Analysis of Laterally Loaded Piles in Clay". Numerical Methods in Offshore Piling ICE, London, 1980.

|37| ROESSET, J. M. - "Dynamic Stiffness of Piles". Numerical Methods in Offshore Piling ICE, London, 1980.

|38| CARNEIRO, F. L. L. B.; E. C. PRATES DE LIMA e N. F.EBECKEN - "Avaliação da Influência de Danos Estruturais no Comportamento Dinâmico de Plataformas". 1ero Coloquio Brasil-Venezuela de Engenharia Civil,Caracas, junio 1980.

|39| RUHL, J. A. - "Offshore Plataforms: Observed Behavior and Comparisons with Theory". Offshore Technology Conference, May, 1976, Paper: OCT-2553.

|40| WU, S. C. - "The Effects of Current on Dynamic Response of Offshore Platforms". Offshore Tecnology Conference, May 1976, Paper: OTC-2540.

|41| GARRISON, C. J. and P. Y. CHOW - "Wave Forces on Submerged Bodies". J. Waterways and Harbors Div. ASCE, 96, No. EM 1, 1972.

|42| BORGMAN, L. E. - "Computation of the Ocean-Wave Forces on Inclined Cylinders". J. of Geophysical Research, Trans. Vol. 39, October, 1958.

|43| "Design Procedures for Fixed Offshore Platforms". Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API-RP-24, American Petroleum Institute, 1976.

|44| LION D. and J. PENZIEN - "Seismic Analysis of an Offshore Structural Suported on Pile Foundations". Report nº UCB/EERC-77/25, University of California at Berkeley, November, 1979.

|45| BEGG, R. D.; A. C. MACKENZIE, C. J. DODDS and O. LOLAND - "Structural Integrity Monitoring Using Digital Processing of Vibration Signals". Offshore Technology Conference, May 1976. Paper OTC-2549.

|46| BERGER, E.; S. MAHIN and R. PYKE - "Simplified Method for Evaluating Soil-Pile-Structure Interaction Effects". Offshore Technology Conference, May 1977. Paper OTC-2954.

|47| MARTÍNEZ, A. R. - "Cronologia del Petróleo Venezolano". Ediciones Foninves, Colección "Ciência y Petróleo". Caracas, Mayo 1976.

|48| SALAS, G. J. - "Petróleo". Ediciones Petroleras de Foninves, nº 1, Caracas.

|49| ANZOLA, H. - "La Crisis Energética, sus Orígenes y su desarrollo". Colección La Alquitrana, Folleto nº 1, Ediciones de la Oficina Central de Información, Caracas, Agosto 1975.

|50| MORENO, A. M. - "Transporte Marítimo de Petróleo". Ediciones Petroleras Foninves, nº 6, Caracas, Enero 1978.

|51| CATTAN, H. - "Palestina, los Árabes e Israel", Siglo Veintiuno Editores, 2ª Edición, México 1974.

|52| NETO, J. M. - "Present and Future of Offshore Developments in Brazil". Offshore Structures Engineering. Carneiro F. L. L. B., A. J. Ferrante and C. A. Brebbia Pentech Press, 1979.

|53| "Exploración Costa Afuera". Folleto Editado por Maraven, Caracas.