

ANÁLISE DO COLAPSO DE UMA ESTRUTURA FLUTUANTE AMARRADA

João Alfredo Santos

Eng. Civil, Assistente de Investigação
LNEC, Av. do Brasil 101, 1799 Lisboa Codex
jasantos@lnec.pt

Manuel A. B. Marcos Rita

Eng. Civil, Investigador-Coordenador
LNEC, Av. do Brasil 101, 1799 Lisboa Codex
mrita@lnec.pt

SUMÁRIO

Durante um temporal com vento forte, uma jangada de captação de água sofreu um acidente: os cabos que a amarravam ao fundo da albufeira quebraram-se e a jangada voltou-se. No âmbito do inquérito para esclarecimento das causas deste acidente foi decidido modelar numericamente o comportamento da jangada amarrada. Antes daquela modelação, avaliou-se o equilíbrio estático da jangada face à força e momento devidos ao vento.

Dada a escassez de dados, quer sobre as condições meteorológicas no local da amarração da jangada, quer das características da amarração, foi necessário considerar no estudo do equilíbrio estático da jangada quatro valores diferentes para o ângulo das amarras com o plano vertical e quatro curvas diferentes para o comportamento material dos cabos de aço das amarras. No estudo do comportamento dinâmico da jangada amarrada considerou-se apenas um rumo para a agitação provocada pelo vento, assumindo-se que a orientação da jangada face à agitação incidente era a mais desfavorável.

Dos resultados obtidos é possível concluir que a jangada de captação de água estudada tem falta de flutuação e a sua amarração é deficiente.

1. INTRODUÇÃO

Durante um temporal com vento forte, uma jangada onde se encontrava instalado o equipamento de elevação de um sistema de abastecimento de água sofreu um acidente: os cabos que a amarravam ao fundo da albufeira quebraram-se e a jangada voltou-se. No âmbito do inquérito para esclarecimento das causas deste acidente foi decidido modelar numericamente o comportamento da jangada amarrada.

Antes daquela modelação, determinou-se o equilíbrio estático da jangada face à força e momento devidos ao vento. Para rotações da jangada em torno de um eixo horizontal apenas (longitudinal ou transversal) calcula-se a força de restituição hidrostática bem como a tensão nas amarras necessária para equilibrar a força e momento devidos ao vento.

Para modelar o comportamento dinâmico da jangada amarrada utiliza-se o modelo numérico **MOORNAV** que consiste nos três módulos seguintes, Santos (1994): um modelo linear tridimensional para a propagação de ondas e que é utilizado para obter a resposta no domínio da frequência de um corpo flutuante livre; um módulo que efectua a passagem dos resultados do domínio da frequência para o domínio do tempo calculando as funções de resposta a impulso e os coeficientes de massa adicionada do corpo flutuante livre; um módulo onde são montadas e resolvidas as equações de movimento do corpo flutuante amarrado levando em conta as características do sistema de amarração.

Dada a escassez de dados, quer sobre as condições meteorológicas no local da amarração da jangada, quer das características da amarração, torna-se necessário considerar no estudo do equilíbrio estático da jangada quatro valores diferentes para o ângulo das amarras com o

plano vertical (o mesmo para as quatro amarras) e quatro curvas diferentes para o comportamento material dos cabos de aço das amarras. No estudo do comportamento dinâmico da jangada amarrada considerou-se apenas um rumo para a agitação provocada pelo vento assumindo-se que a orientação da jangada face à agitação incidente era a mais desfavorável.

2. DADOS DO PROBLEMA

Pouco se sabe acerca quer do sistema em estudo, quer das solicitações actuantes no mesmo.

Apenas a geometria da jangada está bem definida: uma plataforma rectangular de 6.50 m x 6.00 m apoiada em 12 flutuadores de corpo cilíndrico, com 1.05 m de diâmetro e 1.90 m de altura, e cujas extremidades são calotes esféricas com 0.30 m de altura (de que resulta um comprimento total dos flutuadores de 2.50 m). As geratrizes dos troços cilíndricos são paralelas ao menor lado da plataforma.

Para simplificar a modelação dos flutuadores consideraram-se cilindros com o mesmo diâmetro e o mesmo volume total. Obtiveram-se assim cilindros com 1.05 m de diâmetro e 2.25 m de altura. Na Figura 1 apresenta-se um esquema da jangada bem como o referencial utilizado neste estudo. O plano (x - y) coincide com o plano de flutuação, o eixo y é paralelo às geratrizes dos troços cilíndricos dos flutuadores e o sentido positivo do eixo vertical, eixo z, é dirigido para cima. Embora fosse possível determinar com exactidão a posição centro de gravidade da jangada, com base na distribuição actual do equipamento sobre a jangada, utilizou-se a infor-mação contida no projecto de execução para estimar as coordenadas daquele ponto, na posição de repouso, em $z = 0.823$ m, $y = 0.000$ m e x entre 0.050m e 0.200 m. O peso total da jangada e do equipamento nela colocado é de 125 kN.

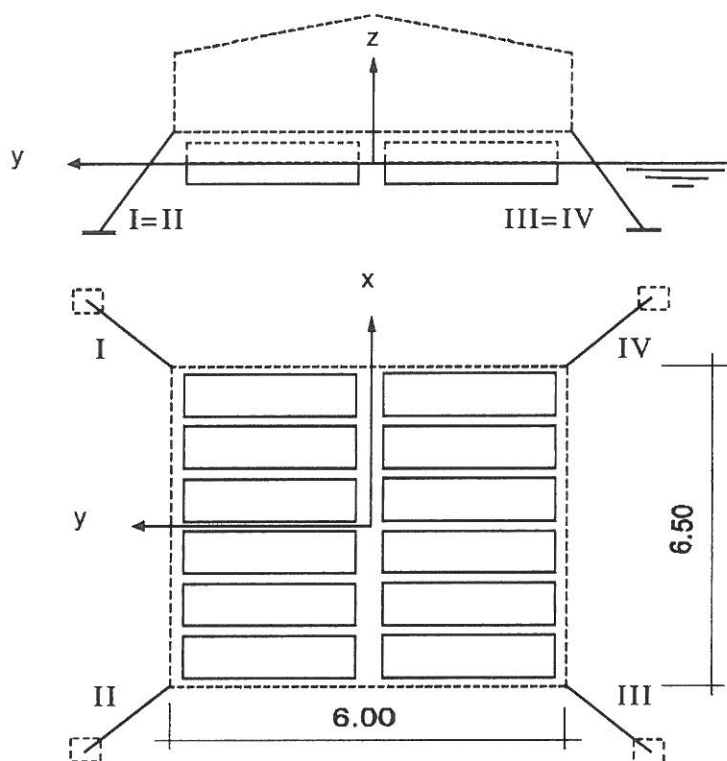


Figura 1 - Esquema da jangada e referencial utilizado.

A figura apresenta também a disposição das amarras. Na ausência de melhor informação acerca da amarração da jangada considera-se que, na altura do acidente, a superfície livre da albufeira estava 25 m acima de um fundo plano horizontal no qual assentavam os maciços de amarração dispostos nos vértices de um quadrado por forma que o ângulo entre a amarra e o

plano horizontal fosse o mesmo para todas. Estudaram-se 4 ângulos entre as amarras e o plano horizontal: 90° (amarras verticais), 75°, 60° e 45°.

Para as amarras considera-se o cabo de aço com 8 mm, indicado no projecto de execução, com uma tensão de rotura de 35 kN e as quatro relações força/deformação apresentadas na Figura 2. Tal deve-se à variação das características mecânicas dos cabos de aço com as condições em que a carga é aplicada.

Partindo de uma situação em que o cabo de aço nunca foi solicitado, a imposição gradual de uma tracção no mesmo implicará o esticar dos fios que o compõem, podendo então representar-se por uma curva semelhante às designadas por “médias” ou “moles” na Figura 2. Neste caso o módulo de elasticidade do cabo será inferior ao do aço.

Se, depois daquela solicitação inicial, o cabo for novamente traccionado então a curva força-deformação será semelhante à designada por “rijas_d”. A deformação inicial, para força nula, corresponde à deformação residual resultante da solicitação anterior. Ciclos de carga posteriores, sem que o cabo tenha sido enrolado no guincho existente na jangada, terão curvas semelhantes à “rijas_d”, eventualmente com maior deformação inicial. O troço final da curva força-deformação tem o declive correspondente ao módulo de elasticidade do aço. Neste caso utilizou-se 180 GPa.

Se, depois de esticado o cabo, a deformação residual do mesmo for “eliminada” pelo enrolamento do cabo no guincho da jangada, obtém-se a curva designada por “rijas”, apenas com um troço recto e com o declive correspondente ao módulo de elasticidade de 180 GPa.

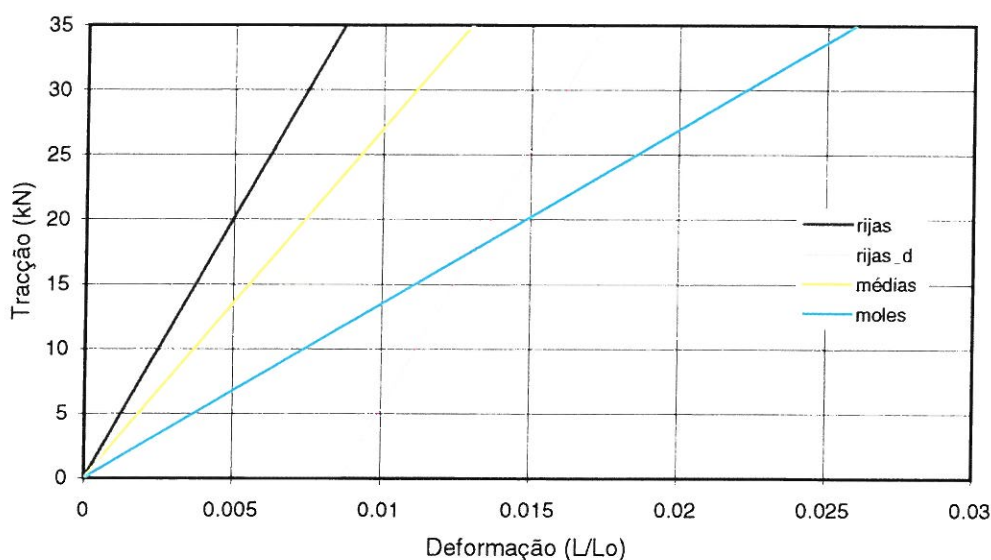


Figura 2 - Relações constitutivas das amarras

Importa referir que esta é uma representação esquemática das relações força/deformação das amarras pois o correcto comportamento destas só poderia ser modelado após realização de ensaios de tracção dos cabos de aço.

Face à inexistência de dados mais rigorosos no que se refere à velocidade do vento no dia do acidente, dispondo-se apenas de uma declaração vaga do Instituto de Meteorologia (“...a intensidade máxima instantânea do vento tenha atingido, pontualmente, valores superiores a 100 km/h.”), optou-se por utilizar na verificação do estado limite de equilíbrio da jangada amarrada o valor da pressão dinâmica do vento indicado no REGULAMENTO DE SEGURANÇA E ACÇÕES PARA ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS E PONTES, 0.90 kN/m² (a este valor corresponde uma velocidade de rajada de 140 km/h).

O escoamento da massa de ar associado à existência do vento produz uma tensão tangencial não só na cobertura da jangada mas também na própria superfície livre da albufeira. Essa tensão tangencial e as flutuações turbulentas da velocidade do vento sobre a superfície livre da albufeira são responsáveis pela geração de ondas que também poderão afectar o comportamento da jangada amarrada.

A caracterização da ondulação gerada pelo vento no local de estacionamento da jangada, é realizada recorrendo ao modelo numérico de geração de ondas pelo vento, **SMB89**, do LNEC, (Covas e Fortes 1989). Após definição das principais direcções de actuação do vento nesse local, calculam-se as características máximas das ondas - altura significativa, H_s , e período de zero ascendente, T_z - que, para uma dada velocidade do vento, rumo e *fetch* efectivo, correspondem ao estado de completo desenvolvimento. Para isso, a duração de actuação é considerada ilimitada.

Face a esta informação geral e pouco precisa, adopta-se o seguinte conjunto de velocidades médias associado a cada rumo de vento: 80, 90 e 100 Km/h, que compreenderão, em princípio, as rajadas de vento com intensidade superior a 100 Km/h.

Considera-se que a duração de actuação do vento é ilimitada pelo que as características das ondas geradas pelos ventos locais são limitadas apenas pelo *fetch* efectivo.

Com base nesses valores de *fetch* efectivo e de profundidade média, efectua-se cálculos com o modelo numérico **SMB89** das características máximas das ondas geradas pelo vento no ponto P - altura significativa H_s (m) e de período médio T_z (s) - para os rumos e velocidades do vento atrás indicadas. Os valores de H_s e T_z obtidos apresentam-se no Quadro 1.

Quadro 1

CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS GERADAS PELO VENTO NO LOCAL DE ESTACIONAMENTO DA JANGADA

Rumo do vento	Velocidade do vento					
	80 (km/h)		90 (km/h)		100 (km/h)	
	H_s (m)	T_z (s)	H_s (m)	T_z (s)	H_s (m)	T_z (s)
N	0.73	1.90	0.84	1.98	0.96	2.10
NE	0.94	2.24	1.08	2.35	1.23	2.45
E	0.89	2.15	1.03	2.27	1.17	2.37
SE	0.54	1.55	0.62	1.62	0.71	1.69

A análise deste quadro mostra que os maiores valores da altura significativa e do período médio terão ocorrido para ventos soprando do sector NE-E, correspondendo os valores máximos ao rumo NE:

- Vel. = 80 Km/h - $H_s = 0.94$ m, $T_z = 2.24$ s
- Vel. = 90 Km/h - $H_s = 1.08$ m, $T_z = 2.35$ s
- Vel. = 100 Km/h - $H_s = 1.23$ m, $T_z = 2.45$ s

Desconhecendo-se as características do vento (direcção e velocidade) que efectivamente ocorreram na altura do acidente, considera-se nas análises efectuadas a média dos valores verificados para a direcção NE, ou seja, $H_s = 1.1$ m e $T_z = 2.4$ s.

3. ANÁLISE ESTÁTICA

Ao contrário de uma estrutura fundada em terra firme, a mobilização das "reações de apoio", para equilibrar as solicitações exteriores actuantes numa estrutura flutuante, pode implicar variações apreciáveis da posição relativa da estrutura em relação ao meio em que está fundada. Assumindo que as forças exteriores são aplicadas quase estaticamente, as

“reações de apoio”, que podem ser expressas em termos das componentes da força e do momento resultante em relação ao centro de gravidade do corpo flutuante, dependem univocamente da geometria submersa dessa estrutura. É a chamada *impulsão hidrostática*.

Assim, começa-se por investigar a gama de “reações de apoio” mobilizáveis pela jangada, variando gradual e sistematicamente o volume submerso dos flutuadores.

Depois, assumindo ainda a aplicação quase estática das forças exteriores, determina-se a tracção nas amarras e a variação das posições das suas extremidades por forma que a componente horizontal daquela tracção equilibre a força horizontal devida ao vento.

Adicionando o momento produzido por aquela tracção no centro de gravidade aos momentos no mesmo ponto produzidos pelas outras forças exteriores actuantes na jangada, obtém-se o momento instabilizante actuante na jangada. Comparando esse momento com o momento mobilizável pela jangada flutuante (isto é, aquele que a impulsão hidrostática é capaz de produzir) é possível avaliar a estabilidade estática da jangada sob a acção do vento.

3.1 Jangada livre

Uma característica dos corpos flutuantes é a variação do volume submerso em resultado da actuação de forças exteriores. Esta variação implica a alteração da intensidade e posição da resultante vertical da pressão hidrostática na superfície molhada do corpo. Em alguns casos, uma situação de equilíbrio pode ser atingida, noutros ocorrem oscilações em torno de uma “posição média”.

Qualquer que seja o novo estado de movimento do corpo resultante de uma solicitação exterior, a força devida à pressão hidrostática está sempre presente. Assim, apresenta-se, neste capítulo, a análise da estabilidade estática da jangada através da determinação da gama de posições e intensidades para esta força em função da geometria submersa da jangada.

Os resultados desta parte do estudo permitem verificar também os limites de aplicabilidade do modelo numérico para o comportamento dinâmico da jangada amarrada. Como o cálculo das forças de restituição hidrostáticas neste modelo é baseado na linearidade de resposta entre as forças e os deslocamentos a partir da posição de equilíbrio, o que é válido apenas para pequenos deslocamentos, averigua-se até que valores de mudança de calado e de ângulo entre o plano da jangada e o plano de flutuação da mesma aquela linearidade de resposta é válida.

Partindo da superfície molhada da jangada, descrita por um conjunto de painéis trapezoidais e rectangulares, e utilizando um dos pré-processadores do modelo numérico de comportamento de navios amarrados do LNEC, **MOORNAV**, (Santos 1994), é possível calcular o volume e o bari-centro do corpo limitado por essa superfície e pelo plano contendo a superfície livre.

Escolhido um valor para o volume submerso da jangada, o que implica um valor para a força vertical actuante na jangada, parte-se de um ângulo nulo entre o plano da jangada e o plano de flutuação, “jangada direita”, e varia-se aquele ângulo (inclinação) em intervalos de meio grau, mantendo constante o valor do volume submerso.

Discretiza-se apenas a superfície correspondente aos flutuadores pois considera-se que só estes contribuem significativamente para a impulsão hidrostática. Esta é uma hipótese válida para valores pequenos da inclinação, pois nesse caso apenas os flutuadores estão submersos. A painelização utilizada para cada cilindro tem 3 painéis ao longo do raio das bases do cilindro, 15 ao longo do perímetro e 12 ao longo da geratriz, o que conduz a um total de 270 painéis por cilindro.

Na Figura 3 apresenta-se a curva de variação do módulo da impulsão hidrostática com o calado da jangada, quando esta se encontra na vertical (plano da plataforma paralelo ao plano de flutuação). No projecto de execução afirma-se que o peso próprio da jangada é 125 kN. Isso implica um calado de 0.577 m.

Na Figura 3 pode observar-se que, para a gama de calados entre 0.5 e 0.7 m, que corresponde a uma gama de forças de impulsão entre 100 e 160 kN, a variação daquela força com o calado é praticamente linear. Mesmo fora dessa gama, o afastamento do comportamento linear é pouco notável.

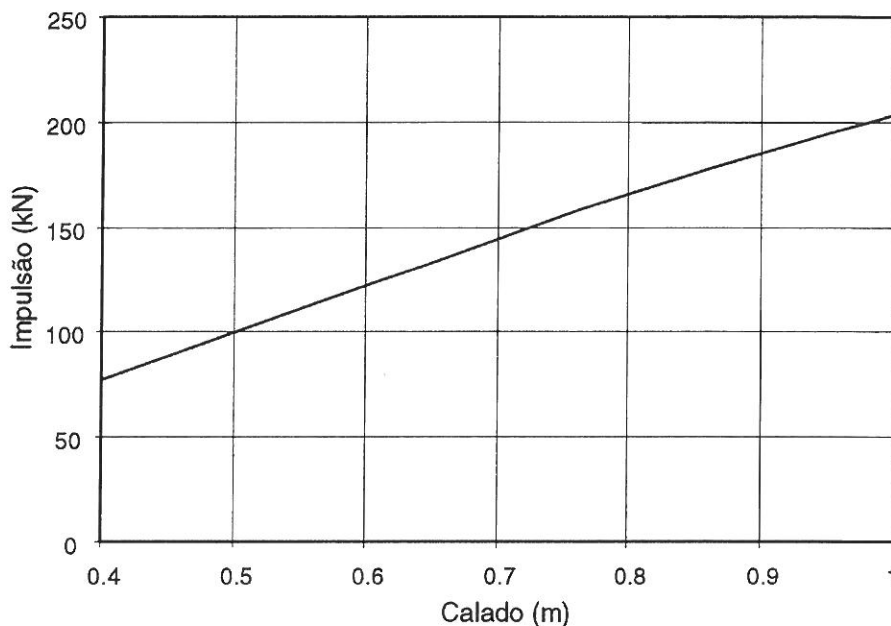


Figura 3 - Jangada livre. Impulsão hidrostática

Por simplicidade, analisa-se apenas a variação do volume submerso da jangada devido à rotação desta em torno dos eixos x e y. Nas Figuras 4 a 6 apresentam-se os gráficos com a variação do momento produzido pela força de impulsão em relação ao centro de gravidade da jangada isolada.

Com base na informação contida no projecto de execução é possível estimar as coordenadas do centro de gravidade da jangada, na posição de repouso, em $z = 0.823$ m, $y = 0.000$ m e x entre 0.050 m e 0.200 m. Embora a diferença entre os resultados relativos aos dois valores de x , Figuras 4 e 5, seja cerca de 20 kNm (para o mesmo ângulo entre a plataforma e o plano de flutuação, o momento é inferior quando a coordenada x é 0.20 m), o que é uma fracção importante do momento máximo para calados grandes, considera-se que a substituição daquele intervalo pelo valor exacto, o que implicará um melhor conhecimento da distribuição de massas sobre a jangada, não justifica o acréscimo de trabalho associado porque:

- a) nesta direcção, a força devida ao vento (a mais relevante para a estabilidade da jangada) não é importante;
- b) os declives das curvas na origem, para inclinação nula (parâmetro relevante no estudo do comportamento dinâmico da jangada face às ondas), não se alteram significativamente entre as duas situações.

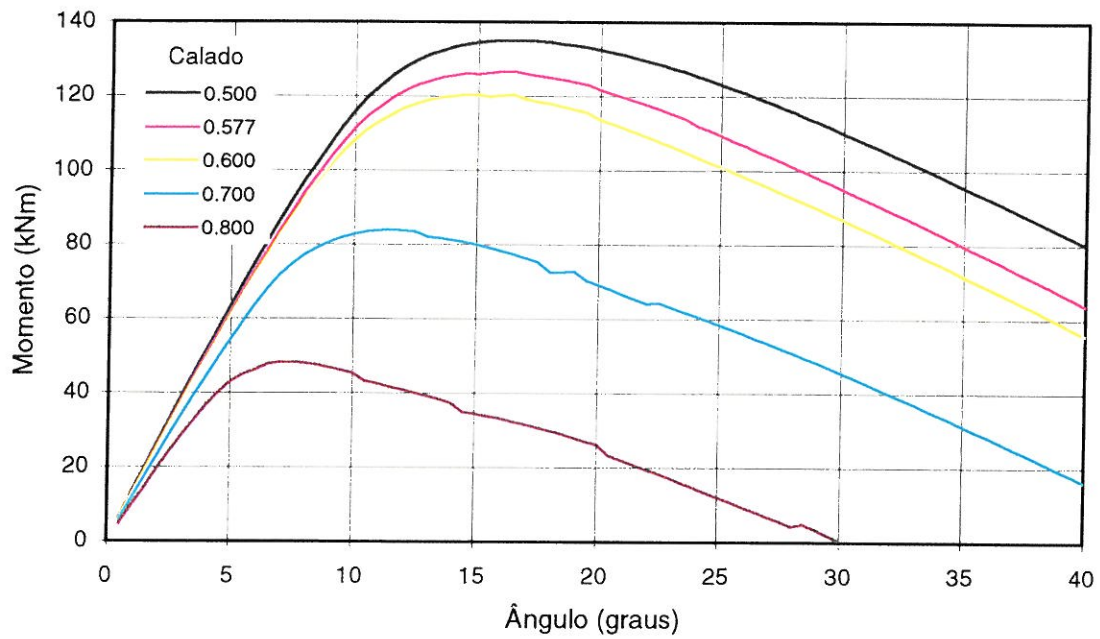


Figura 4. Momento da impulsão hidrostática em relação ao centro de gravidade. Rotação da plataforma em torno do eixo x

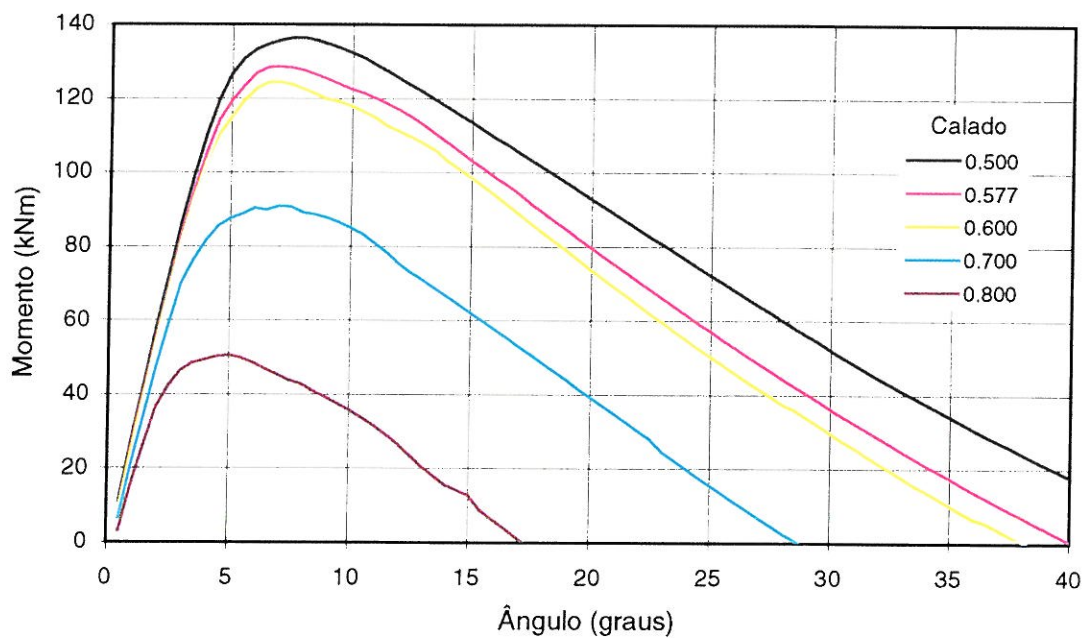


Figura 5. Momento da impulsão hidrostática em relação ao centro de gravidade. Rotação da plataforma em torno do eixo y. Centro de gravidade da jangada em $x = 0.05$ m

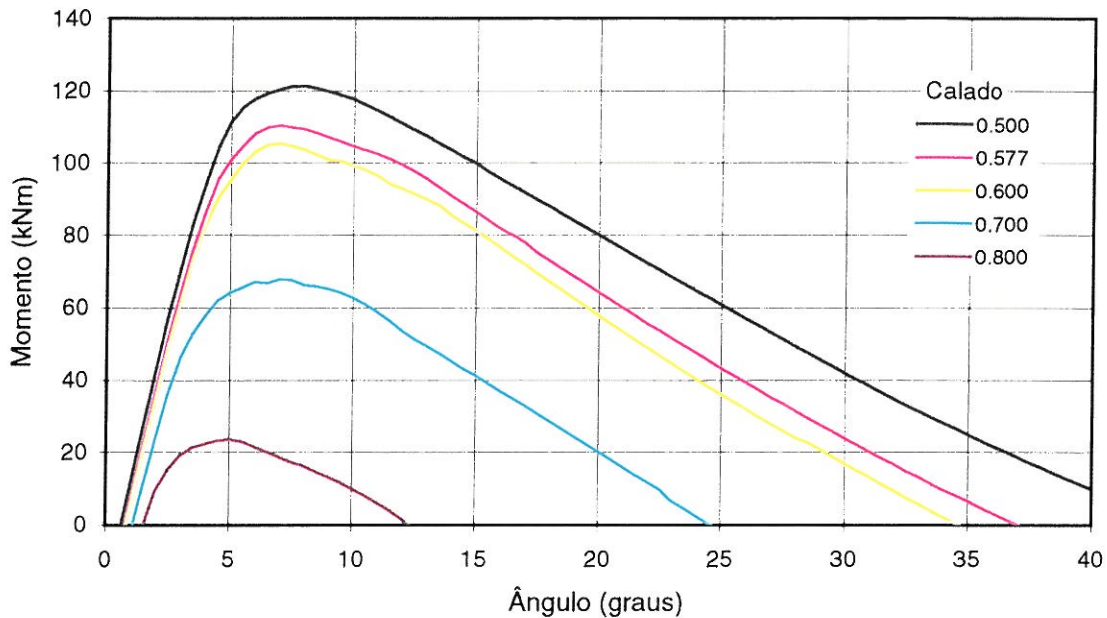


Figura 6. Momento da impulsão hidrostática em relação ao centro de gravidade. Rotação da plataforma em torno do eixo y. Centro de gravidade da jangada em $x = 0.20$ m

Em vez do valor da impulsão hidrostática, optou-se por distinguir as curvas das Figuras 4 a 6 pelo calado da jangada associado para a inclinação nula (“jangada direita”). Característica importante destas curvas é a variação inversa com o calado do momento máximo produzido pela força de impulsão hidrostática. Com o aumento da imersão da jangada o volume submerso aproxima-se do volume total e reduz-se a variabilidade na posição do centro de impulsão, que não é senão o baricentro do volume submerso. Quando a jangada está totalmente imersa só existe uma posição possível e o único momento mobilizável é o resultante da diferença entre o baricentro do volume submerso e o centro de gravidade da jangada.

Não se apresentam curvas para calados da jangada inferiores a 0.50 m pois, como se verá a seguir, a expectativa é que a jangada se “afunde” (aumente o calado) para permitir a mobilização das forças nas amarras que equilibram a força horizontal devida ao vento. Isto impede a observação da variação directa com o calado do momento máximo, para calados inferiores a 0.50 m.

As Figuras 4 e 5 permitem também verificar que, para ângulos inferiores a 2° , a variação do momento devido à força de impulsão com o ângulo é quase linear, sendo a taxa de variação praticamente a mesma para calados entre 0.5 e 0.8.

3.2 Jangada amarrada sob a acção do vento

Considerando as forças estáticas actuantes na jangada, isto é, não incluindo a acção das ondas e assumindo que a força devida ao vento se mantém constante, e utilizando os diagramas das figuras anteriores, é possível inferir da estabilidade da jangada quando submetida à acção do vento.

Começa-se por analisar a situação em que a jangada tem amarras verticais, as menos eficientes do ponto de vista da mobilização das forças horizontais. Da situação inicial, com a jangada horizontal, em que a impulsão equilibra o peso próprio da jangada e as amarras não estão sujeitas a qualquer tracção, Figura 7a), passa-se a uma situação em que todas as amarras estão traccionadas e a jangada está inclinada, Figura 7b).

Como a resultante da pressão hidrostática é sempre vertical só a tracção nas amarras pode-rá equilibrar a força horizontal. Para isso as amarras terão de esticar, para que exista tracção, e rodar em torno do ponto de ligação ao maciço de amarração, para que essa tracção possa ter uma componente horizontal.

A existência de tracção nas amarras em conjunto com a força vertical V_v implica também um aumento do volume submerso da jangada, pois a força vertical na jangada aumentou também.

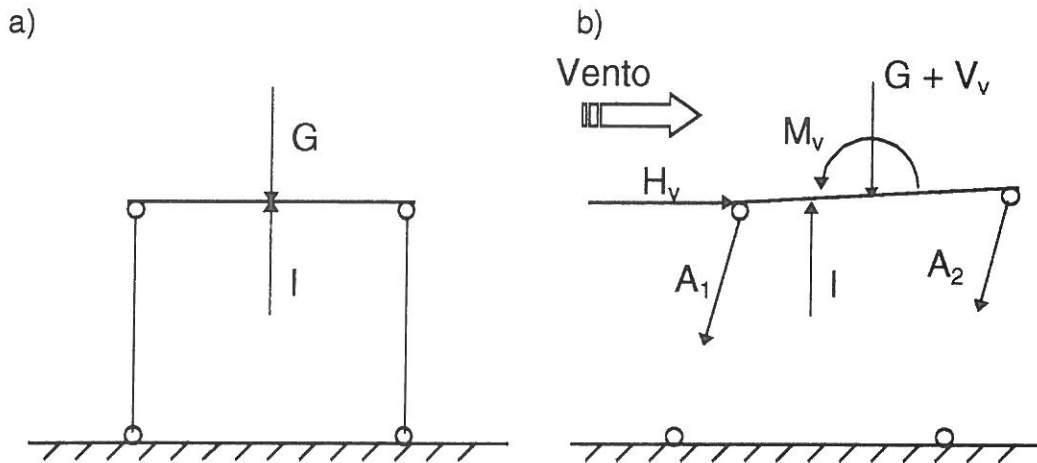


Figura 7. Esquema das forças na jangada amarrada. Situação inicial com amarras verticais

Se a jangada aumentar apenas o calado, mantendo a plataforma na posição horizontal, não será possível equilibrar o momento M_v . Para tal, é necessário que o ponto de aplicação da impulsão hidrostática, o *centro de impulsão*, mude de posição, isto é, a jangada rode em torno do eixo x. Assim, as amarras a sotavento, A2, estarão menos traccionadas do que as a barlavento, A1.

O atingir de uma nova situação de equilíbrio depende da diferença entre a componente vertical das forças actuantes na jangada (peso próprio incluído) e a impulsão hidrostática quando a força horizontal devida ao vento for equilibrada pela componente horizontal da força nas amarras. Se não houver diferença, tudo equilibrado, tem-se uma nova situação de equilíbrio. Se a força de impulsão for maior ou menor que a componente vertical das forças actuantes na jangada então a jangada tem oscilações verticais e horizontais.

Quando ocorre a rotura da amarra A2, desaparece instantaneamente o momento estabilizante por ela produzido. Logo a inclinação da jangada aumentará. Além disso, a tracção na amarra A1 aumenta, para equilibrar a força horizontal, aumentando também o momento desestabilizante por ela produzido. Assumindo que o ângulo entre a amarra A1 e o plano horizontal não se altera muito, observa-se o duplicar do momento produzido pela tracção na amarra A1 para um volume submerso da jangada que se alterou pouco.

Dependendo do valor do momento total obtido, poderá resultar uma situação em que o momento necessário produzir pela impulsão hidrostática ultrapassa o máximo que essa força pode produzir. Aí, a jangada volta-se.

Quando as amarras, na situação inicial, têm um ângulo em relação ao plano horizontal inferior a 90° , pode considerar-se, em primeira aproximação, que apenas as amarras a barlavento estão traccionadas.

Para que as amarras de sotavento estejam traccionadas é necessário um deslocamento horizontal da jangada igual ao dobro da diferença entre as coordenadas y das extremidades de

uma das amarras, o que pode implicar a rotura das amarras de barlavento antes desse deslocamento ocorrer. Tem-se assim uma configuração semelhante à da jangada com amarras verticais, após rotura das amarras a sotavento, assumindo que antes daquela rotura a jangada não se tinha voltado.

Calculando, com o modelo numérico **MOORNAV**, as forças nas amarras e os momentos no centro de gravidade da jangada quando a tracção nas amarras equilibra a força horizontal devida ao vento, pode inferir-se da estabilidade da jangada comparando o momento necessário para equilibrar a acção do vento e das amarras com o momento que a impulsão pode produzir.

Importa referir, no entanto, que os cálculos efectuados implicam uma aplicação quase estática das forças exteriores. Quando se incluem os efeitos dinâmicos é expectável que aumente o módulo de algumas destas forças. Isso é o assunto do próximo ponto da comunicação.

Estuda-se apenas o caso em que o vento incide ao longo do eixo y pois é o ângulo para o qual é maior a força devida ao vento. Como a jangada é praticamente simétrica em relação ao eixo x , obtêm-se os mesmos resultados quer o vento se propague no sentido positivo quer no sentido negativo do eixo y . Esta incidência corresponde a um rumo do vento de WSW ou ENE.

De acordo com o REGULAMENTO DE SEGURANÇA E ACÇÕES PARA ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS E PONTES esta é uma estrutura na zona A, Art.º 20º, num solo com rugosidade aerodinâmica do tipo II, Art.º 21º, pelo que o valor característico da pressão dinâmica a utilizar no cálculo da acção do vento deve ser 0.90 kN/m^2 (a esta pressão corresponde uma velocidade de rajada de 140 km/h). Nos cálculos que se seguem considera-se sempre o valor característico desta pressão dinâmica.

O Nº 3.3 do Anexo I do mesmo regulamento fornece para uma cobertura isolada, isto é, suportada por elementos que, pelas suas reduzidas dimensões, não constituem obstáculo significativo ao escoamento do ar, com duas vertentes inclinadas a 15° o coeficiente de pressão $+1.6$ (pressão dirigida para baixo), na vertente a barlavento, e o coeficiente -1.0 (pressão dirigida para cima), na vertente de sotavento.

Com estes coeficientes, e o valor da pressão dinâmica do vento, obtêm-se a força na cobertura, devida ao vento, com uma componente vertical de 11 kN , dirigida para baixo, e uma componente horizontal de 12.17 kN . Esta força produz um momento, no centro de gravidade da jangada, de 30 kNm , rodando para barlavento.

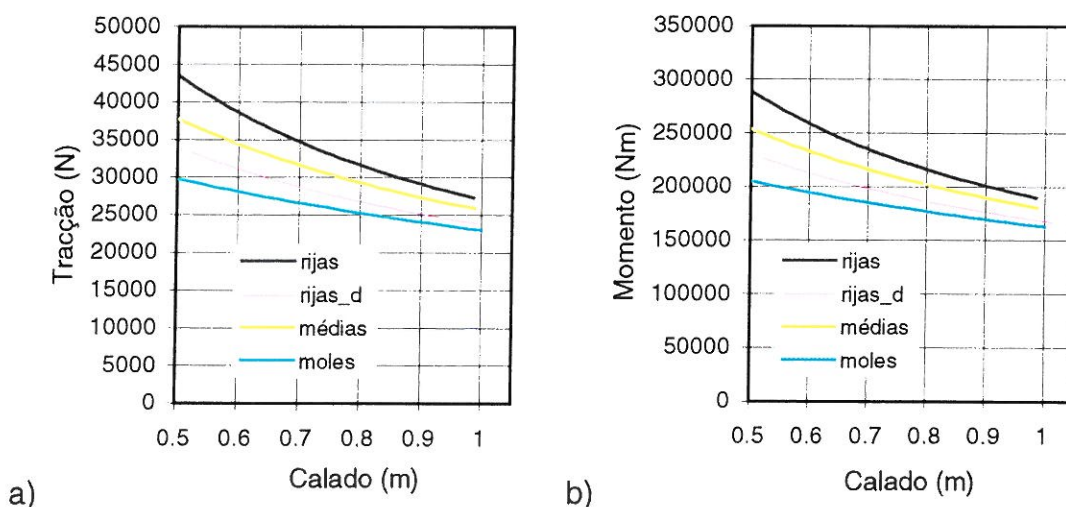


Figura 8. Situação inicial com amarras verticais. a) Tracção nas amarras para equilibrar a força horizontal devida ao vento. b) Momento em relação ao centro de gravidade produzido pela força devida ao vento e pela tracção nas amarras.

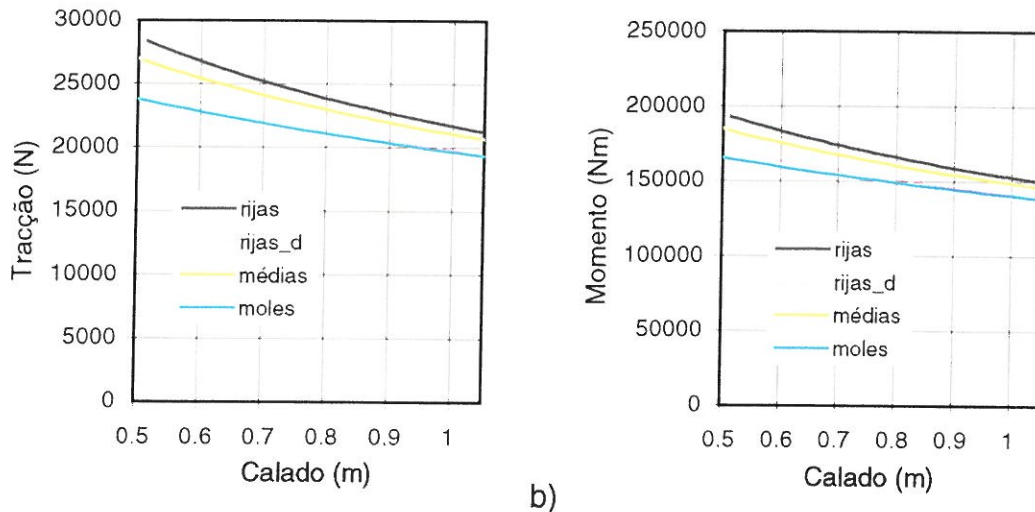


Figura 9. Situação inicial com amarras a 75° em relação ao plano horizontal. a) Tracção nas amarras para equilibrar a força horizontal devida ao vento. b) Momento em relação ao centro de gravidade produzido pela força devida ao vento e pela tracção nas amarras.

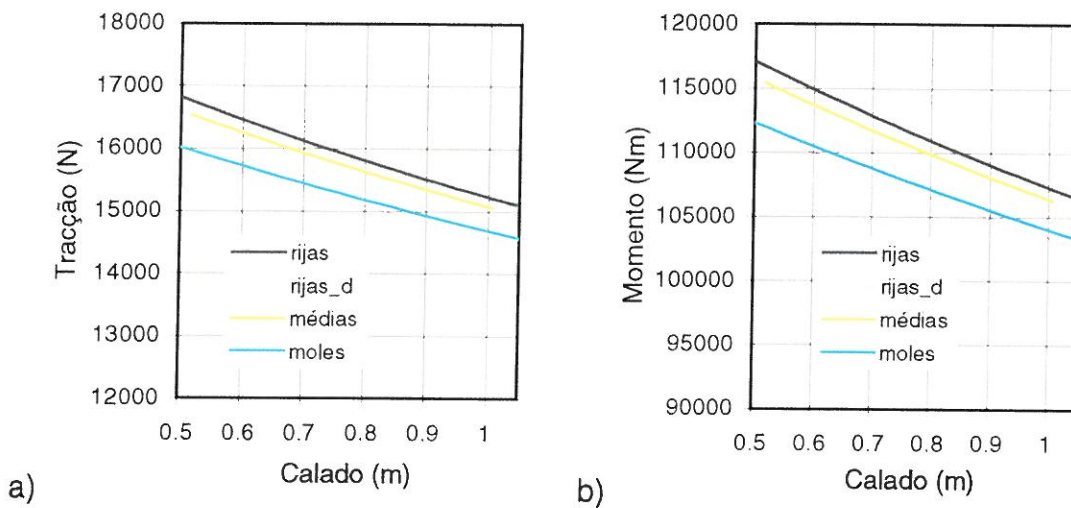


Figura 10. Situação inicial com amarras a 60° em relação ao plano horizontal. a) Tracção nas amarras para equilibrar a força horizontal devida ao vento. b) Momento em relação ao centro de gravidade produzido pela força devida ao vento e pela tracção nas amarras.

As Figuras 8 a 11 apresentam a tracção nas amarras (uma vez que o problema é simétrico as duas amarras têm a mesma tracção) e o momento em relação ao centro de gravidade da jangada produzido por aquelas forças e pela força devida ao vento, designadas doravante por “forças exteriores”, para diversos valores da cota da extremidade da amarra na jangada, expressa aqui pelo calado da jangada, do ângulo inicial das amarras com o plano horizontal e para os quatro tipos de amarras consideradas.

Não se consideram valores do calado inferiores a 0.50 m pois as componentes verticais das “forças exteriores” são dirigidas para baixo, o que implica o aumento do calado da jangada. Não se representam os valores daquelas variáveis correspondentes a cotas da extremidade que impliquem um calado superior ao diâmetro dos flutuadores pois nessa situação a jangada estará provavelmente submersa.

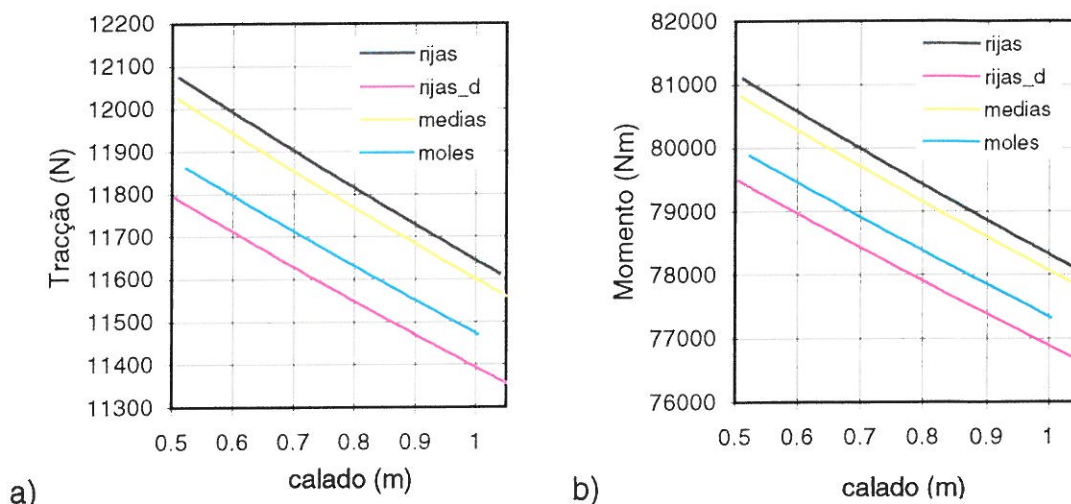


Figura 11. Situação inicial com amarras a 45° em relação ao plano horizontal. a) Tracção nas amarras para equilibrar a força horizontal devida ao vento. b) Momento em relação ao centro de gravidade produzido pela força devida ao vento e pela tracção nas amarras.

As Figuras 8 a), 9 a), 10 a) e 11 a), relativas à tracção nas amarras, mostram que, excepto para as amarras mais rijas inicialmente na vertical, é sempre possível equilibrar a força horizontal com amarras cuja carga de rotura é de 35 kN.

As mesmas figuras mostram também, como seria de esperar, que as amarras mais rijas têm sempre tracções superiores às amarras moles e que as tracções nas amarras decrescem com o ângulo inicial entre as amarras e o plano horizontal.

O problema surge com o momento em relação ao centro de gravidade da jangada produzido pelas “forças exteriores”. Com efeito, a Figura 8 b) mostra que, para a situação inicial com as amarras verticais, aqueles momentos (entre 250 kNm e 150 kNm) são sempre superiores ao máximo momento que a impulsão na jangada consegue produzir (cerca de 140 kNm para o calado de 0.5 m).

Para o ângulo inicial entre as amarras e o plano horizontal de 75° os momentos devidos às forças exteriores já estão abaixo daquele limite, quando as amarras são as mais moles. Apenas quando o ângulo inicial entre as amarras e o plano horizontal é 60° se pode afirmar que os momentos produzidos pelas “forças exteriores” estão dentro de limites razoáveis. Mesmo assim, é necessário que a componente vertical das forças exteriores não implique uma variação de calado superior a 0.08 m.

4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA JANGADA AMARRADA SOB A ACÇÃO DAS ONDAS

A inexistência de equilíbrio entre as componentes verticais das forças actuantes na jangada (peso próprio, força devida ao vento e força nas amarras) e a impulsão hidrostática implica a oscilação da jangada amarrada. Como estas oscilações podem levar a deformações superiores às indispensáveis para o equilíbrio da força horizontal devida ao vento, torna-se necessário simular o comportamento dinâmico da jangada amarrada.

Embora o modelo numérico utilizado, MOORNAV permita a observação de diversos parâmetros do sistema “jangada amarrada”, no que a seguir se descreve procura-se apenas determinar os valores extremos das forças nas amarras e dos movimentos da jangada pois são estes os mais relevantes para a verificação da segurança da jangada.

Uma vez que a jangada amarrada, devido ao funcionamento das amarras, é um sistema não-linear, o seu comportamento dinâmico deve ser estudado no domínio do tempo. Para isso,

é necessário resolver as equações de movimento de um corpo rígido, com seis graus de liberdade.

Além das forças mencionadas no ponto anterior (peso próprio, impulsão hidrostática, forças devidas ao vento e tracção nas amarras), é necessário agora considerar também as forças devidas às ondas produzidas pelo vento, bem como a força que a jangada deve fazer para se mover no seio do líquido, quer para variar a sua velocidade, quer para desviar o líquido, produzindo ondas.

Considera-se que as amarras estão sempre rectas, o que equivale a desprezar o peso próprio das mesmas, e que, na ausência de solicitações exteriores, fazem todas o mesmo ângulo com o plano horizontal, Figura 1.

Simula-se apenas o comportamento da jangada face a ondas incidentes regulares, ou seja, de características constantes no tempo, considerando-se que a altura e período destas ondas são os indicados no ponto 2 para a agitação gerada pelo vento: $H_s = 1.1$ m, $T_z = 2.4$ s. Utilizam-se estes parâmetros para todos os rumos simulados.

As forças devidas ao movimento da jangada no seio do líquido, caracterizadas pelos chamados *coeficientes de massa adicionada* e pelas *funções de atraso*, são determinados utilizando o procedimento descrito em Santos (1994).

O modelo utilizado na simulação do comportamento da jangada amarrada não será certamente o mais adequado para modelar o colapso da jangada amarrada pois baseia-se na hipótese da pequena amplitude dos movimentos do corpo flutuante, que está longe de ser satisfeita na proximidade daquele colapso. Os seus resultados, contudo, permitem identificar situações capazes levar ao colapso daquele sistema.

Outras grandezas que se devem observar são os movimentos, sobretudo os realizados no plano vertical. Já se verificou, para a jangada e para a gama de calados em que se está interessado, que :

- a) o aumento do calado da jangada produz um aumento da impulsão que vai decrescendo com o calado;
- b) embora o momento produzido pela impulsão hidrostática cresça linearmente com a inclinação da jangada a partir da posição de repouso, esse momento atinge um máximo (que varia inversamente com o calado) e depois decresce.

Ora como o modelo numérico utilizado pressupõe uma variação linear, quer da impulsão hidrostática, quer do momento por ela produzido, a partir da posição de repouso e sem qualquer limite no crescimento daquelas grandezas, valores da oscilação vertical que correspondam a calados superiores ao diâmetro dos flutuadores ou valores da oscilação em torno do eixo x ou y superiores a 10° , são indicação clara do colapso da jangada amarrada. Com efeito, isso significa que o modelo prevê uma impulsão hidrostática, ou um momento por ela produzido, muito superior ao possível. Logo, ou a jangada está a afundar-se, ou a voltar-se.

Embora na análise da estabilidade estática da jangada se tenha concluído que situações de repouso com amarras verticais, ou com amarras fazendo um ângulo de 75° com o plano horizontal, não são estáveis quando a jangada está submetida à acção do vento incluem-se também estas configurações de amarração neste estudo do comportamento dinâmico da jangada amarrada.

Começa-se por averiguar a importância das ondas na resposta da jangada amarrada. A Figura 12 mostra, para amarras "moles" inicialmente verticais e para vento incidindo transversalmente na jangada, qual o efeito da inclusão das ondas na tracção na amarra mais solicitada. A oscilação suave da curva correspondente ao efeito do vento apenas ("sem ondas"), sobre-põem-se oscilações de período mais curto devidas ao efeito das ondas. A amplitude destas oscilações é cerca de 5 kN, o que corresponde a cerca de 1/6 ou 1/7 da amplitude das oscilações da curva correspondente ao efeito do vento apenas. Em todo o caso, como pode observar-se na figura, isso pode implicar a rotura da amarra.

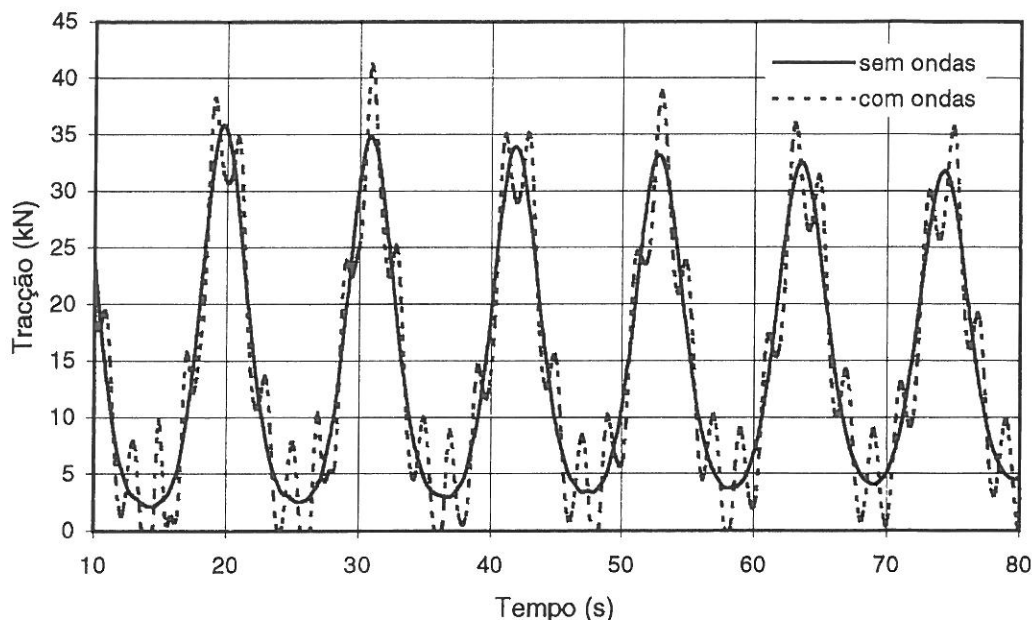


Figura 12. Forças nas amarras. Amarras "moles" inicialmente verticais. Influência da acção das ondas. Ondas de través

Em seguida, ainda para as mesmas amarrações, confirma-se que a situação com vento e ondas de través é a mais desfavorável para a jangada amarrada.

Para tal considera-se que a força e o momento devidos ao vento, Quadro 2, são, respectivamente, colinear e ortogonal à direcção do vento, variando com a área da cobertura projectada no plano perpendicular à direcção do vento. As ondas devidas ao vento têm a direcção do vento, mantendo a altura o período já indicados, $H_s = 1.1$ m, $T_z = 2.4$ s.

No Quadro 2, bem como nos Quadros 3 e 4, designa-se por "Ângulo" o ângulo entre o rumo do vento e o eixo x.

Quadro 2

COMPONENTES DA FORÇA E MOMENTO DEVIDOS AO VENTO CONSIDERADOS NO CÁLCULO

Ângulo	Rumo	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
90°	WSW	0.00	12.17	-11.00	30.00	0.00	0.00
60°	W7.5N	5.27	9.13	-9.53	22.50	12.99	0.00
45°	WNW	6.09	6.09	-7.78	15.00	15.00	0.00
30°	W37.5N	5.27	3.04	-5.50	7.50	12.99	0.00
0°	NNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Como referido anteriormente, a simetria da jangada em relação aos planos X0Z e Y0Z implica que os resultados obtidos para esta gama de ângulos podem ser facilmente estendidos para os quatro quadrantes. Por exemplo, os resultados obtidos para o rumo de 45°, WNW, são válidos para os rumos de SSW, ESE e NNE.

Os Quadros 3 e 4 contendo, respectivamente, os valores máximos dos deslocamentos e das tracções nas amarras, confirmam a hipótese inicial da situação mais desfavorável para a jangada amarrada ser a correspondente ao vento incidente transversalmente à jangada.

No Quadro 3, os deslocamentos segundo as coordenadas (x), (y) e (z) designam rotações em torno dos eixos x, y e z, respectivamente. Essa a razão porque as unidades desses deslocamentos são graus.

Além de identificarem a situação mais desfavorável para a jangada amarrada, os resultados do Quadro 4, em que as amarras são designadas pelo quadrante onde está a sua extremidade fixa (a coordenada x do maciço de amarração da amarra II é negativa e a coordenada y positiva), permitem confirmar, também, as considerações feitas em relação aos esforços nas amarras para a incidência transversal do vento (ângulo igual a 90°). Verifica-se, naquele quadro, que para vento proveniente do 3° e 4° quadrantes são as amarras I e II as mais solicitadas.

Quadro 3

DESLOCAMENTOS MÁXIMOS DA JANGADA. AMARRAS "MOLES" INICIALMENTE VERTICAIS.
INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO

Ângulo	Coordenada					
	x (m)	y (m)	z (m)	(x) (°)	(y) (°)	(z) (°)
90°	0.000	7.919	-0.556	3.165	0.000	0.000
60°	4.361	6.632	-0.513	2.249	-1.469	-10.836
45°	5.197	5.262	-0.440	1.842	-2.292	-10.436
30°	5.591	3.446	-0.375	0.884	-3.596	-6.388
0°	0.115	0.000	-0.091	0.000	-3.598	0.000

Quadro 4

TRACÇÕES MÁXIMAS NAS AMARRAS. AMARRAS "MOLES" INICIALMENTE VERTICAIS.
INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO

Ângulo	Tracção na amarra (kN)			
	I	II	III	IV
90°	41.187	41.187	31.391	31.391
60°	34.659	32.022	29.289	32.908
45°	29.809	30.021	29.942	29.119
30°	26.560	27.537	26.439	26.107
0°	9.728	10.354	10.354	9.728

Como, para o ângulo de incidência nulo, se considera a força devida ao vento nula, os resultados dos Quadros 3 e 4 para aquele ângulo ilustram apenas os efeitos das ondas apenas no sistema jangada-amarras.

Para aquela incidência, o problema é simétrico em relação ao plano xOz. Essa simetria reflecte-se nos resultados relativos às forças nas amarras, bem como nos movimentos da jangada. Nesse caso, só existem deslocamentos naquele plano, translações segundo as coordenadas x e z e rotação em torno do eixo y.

Resultados análogos observam-se quando o vento e as ondas se propagam ao longo do eixo y, ângulo igual a 90°. Então o problema é simétrico em relação ao plano yOz e essa simetria implica que as tracções máximas nas amarras dos quadrantes 1 e 2 (amarras I e II) e as dos quadrantes 3 e 4 (amarras III e IV) sejam iguais e que a jangada só tenha translações segundo os eixos y e z e rotação em torno do eixo x.

Se a proximidade do colapso da jangada amarrada dependesse apenas da tracção nas amarras, poderia dizer-se que, para as amarras "moles" inicialmente verticais, se teria problemas apenas quando o vento incida com um ângulo de 90° em relação ao eixo x.

O Quadro 3 mostra que esse seria um critério muito grosseiro pois apenas para a incidência de 0° (acção da onda gerada pelo vento) as oscilações verticais estão dentro de limites razoáveis. Todos os outros valores levam a suspeitar que o afundamento ou o voltar da jangada esteja próximo.

Importa referir que os deslocamentos apresentados no Quadro 3, bem como nos seguintes, não se realizam em torno da posição inicial de repouso. Para a oscilação vertical, por exemplo, e para os casos do Quadro 3, quando a força devida ao vento está presente, o centro de gravidade da jangada poucos centímetros sobe acima da posição inicial.

Os resultados dos Quadros 5 a 7, com a variação da tracção nas amarras e dos movimentos máximos da jangada quando o vento incide transversalmente à jangada, confirmam aquilo que já se intuía no estudo da estabilidade estática da jangada: os esquemas de amarração com amarras na situação inicial fazendo um ângulo de 90°, ou de 75°, com o plano horizontal são pouco estáveis quando a jangada amarrada é submetida à acção do vento. Tal como nos resultados da análise estática, a tracção nas amarras diminui com o ângulo inicial entre as amarras e o plano horizontal.

Curioso nos resultados do Quadro 5 é o efeito do movimento da jangada nas tracções máximas nas amarras. Como se previra, os valores obtidos no estudo do comportamento dinâmico da jangada amarrada são superiores aos encontrados -no equilíbrio estático. Mas, ao contrário do que acontecia então, aqui observam-se alguns casos em que as amarras mais moles têm tracções máximas superiores às das amarras mais rijas.

Quadro 5

TRACÇÃO MÁXIMA NAS AMARRAS. VENTO INCIDENTE TRANSVERSALMENTE À JANGADA

Amarras	Ângulo das amarras com o plano horizontal			
	90°	75°	60°	45°
rijas	45.711 kN	41.103 kN	27.653 kN	20.408 kN
rijas_d	46.133 kN	46.746 kN	33.959 kN	27.676 kN
médias	45.752 kN	42.106 kN	29.111 kN	18.997 kN
moles	41.187 kN	39.877 kN	28.625 kN	21.027 kN

Quadro 6

DESLOCAMENTO VERTICAL MÁXIMO. VENTO INCIDENTE TRANSVERSALMENTE À JANGADA

Amarras	Ângulo das amarras com o plano horizontal			
	90°	75°	60°	45°
rijas	-0.618 m	-0.367 m	-0.261 m	-0.191 m
rijas_d	-0.624 m	-0.398 m	-0.292 m	-0.220 m
médias	-0.606 m	-0.372 m	-0.272 m	-0.180 m
moles	-0.556 m	-0.351 m	-0.267 m	-0.199 m

Quadro 7

ROTAÇÃO MÁXIMA EM TORNO DO EIXO X. VENTO INCIDENTE TRANSVERSALMENTE À JANGADA

Amarras	Ângulo das amarras com o plano horizontal			
	90°	75°	60°	45°
rijas	1.709°	14.288°	10.675°	8.304°
rijas_d	4.102°	15.386°	11.838°	10.124°
médias	2.010°	13.666°	10.659°	9.000°
moles	3.165°	14.558°	11.312°	9.545°

Nas amarras “moles” tal ocorre para os menores ângulos entre as amarras e o plano horizontal, quando a jangada pode deslocar-se mais. Para as amarras “rijas_d” tem-se sempre tracções maiores que nas amarras “rijas”. Também aqui o argumento relativo á liberdade de movimentos é valido pois a deformação inicial para força quase nula na curva força-deformação das amarras “rijas_d” equivale a uma folga nas amarras que permite maiores movimentos á jangada.

5. CONCLUSÕES

Estudou-se a estabilidade estática e dinâmica de uma jangada (amarrada) de captação de água que colapsou numa situação de temporal. Na ausência de melhores dados acerca da acção do vento, utilizou-se o valor de dimensionamento do projecto da cobertura da jangada (0.90 kN/m²). De igual forma para a geometria do sistema de amarração, o desconhecimento da geometria exacta da amarração no dia do acidente levou á realização de testes com quatro ângulos entre as amarras e o plano horizontal na situação inicial, isto é, na ausência de vento ou ondas. Em todos os testes considerou-se que, na situação inicial, as amarras não estavam traccionadas.

De tudo o que foi analisado e descrito anteriormente, é possível concluir que o acidente sofrido pela jangada de captação de água aquando da ocorrência de ventos muito fortes, foi devido á instabilidade estática e dinâmica da jangada. Com efeito, mesmo para o valor da pressão dinâmica de dimensionamento da cobertura (0.90 kn/m²) verificou-se que:

- Na análise estática, quando as amarras na situação inicial fazem um ângulo com o plano horizontal superior a 75°, o momento que é necessário produzir pela impulsão hidrostática para equilibrar o das forças devidas ao vento e á tracção nas amarras é claramente superior ao que a impulsão nos flutuadores consegue produzir;
- Quando as amarras na situação inicial fazem um ângulo com o plano horizontal entre 45° e 60°, as tracções nas amarras são mais baixas mas os deslocamentos obtidos na análise dinâmica são muito grandes, o que leva a concluir estar-se na presença de uma situação de equilíbrio instável.

Ou seja, a jangada de captação de água estudada tem falta de flutuação e a sua amarração é deficiente.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à S. C. Soares da Costa, S.A. a autorização concedida para a divulgação dos resultados do estudo para ela realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Decreto-Lei N.º 235/83, de 31 de Maio.
- COVAS, J.A. e C. J. FORTES (1989) *Modelo Matemático de Cálculo das Características da Agitação Marítima Gerada pelo Vento (Método de Sverdrup-Munk-Bretschneider)*. Programa SMB89 baseado no artigo "Revision of SPM1984 Wave Hindcast Model to avoid inconsistencies in engineering applications" da autoria de D. P. Hurdle e R. J. H. Stive publicado na revista *Coastal Engineering*, vol. 12, n. 4 de 1984. Relatório 252/89-NPP, LNEC, Dezembro de 1989.
- SANTOS, J. A. (1994). *MOORNAV - Numerical Model for the Behaviour of Moored Ships in Harbours*. Relatório 3/94-B, Projecto NATO PO-WAVES, IH-LNEC, Novembro de 1994.