



MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM DISPOSITIVO BASEADO NO ATRITO DE COULOMB PARA LIMITAR MOVIMENTOS EXCESSIVOS DE NAVIOS AMARRADOS

João Alfredo Santos

Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel. +351 21 844 3451, Fax. 351 21 844 3019
E-mail: jasantos@lnecc.pt

RESUMO

Demonstram-se nesta comunicação as potencialidades da utilização de guinchos capazes de produzir uma força constante oposta ao movimento, o chamado atrito de Coulomb, no controlo de movimentos de um navio amarrado. Utiliza-se o pacote numérico MOORNAV (Santos 1994) para estudar os movimentos de um navio com um deslocamento de 108 416 m³ amarrado, numa situação exposta, com traveses e regeiras e sujeito a ondas regulares de vante.

Palavras-chave – Navios amarrados, Modelos Numéricos, Guinchos de tensão automática.

1. INTRODUÇÃO

A amarração de um navio é normalmente realizada com um conjunto de cabos que criam um sistema massa-mola cujo objectivo é manter no seu lugar um corpo flutuante de grande massa por forma a permitir a realização de operações de carga e descarga em condições de segurança. Com efeito, o controlo da amplitude dos movimentos do navio amarrado é de importância vital para as operações portuárias.

Para limitar os movimentos excessivos de navios amarrados, têm-se utilizado os chamados guinchos de amarração automáticos, nomeadamente os guinchos de tensão constante e os guinchos de tensão automática. Os primeiros dispositivos aplicam uma força de tracção constante ao cabo a que estão ligados enquanto nos segundos aquela força é diferente consoante o cabo está a enrolar ou a desenrolar do guincho. Assim, os primeiros guinchos têm sido ligados apenas a cabos que funcionam como traveses e os segundos têm sido ligados a lançantes, funcionando então como um dispositivo de dissipação de energia do sistema sempre que a força aplicada pelo guincho ao recolher o cabo seja substancialmente inferior à aplicada quando o cabo é desenrolado.

Contudo, até agora, o valor mínimo da força exercida pelos guinchos de tensão automática tem estado limitado a um terço do valor da força máxima. Ora, a existência de uma força mínima não nula aplicada no cabo de amarração pelo guincho de tensão automática quando enrola o cabo implica que tal cabo pode estar a contrariar a redução de movimento do navio produzida pelo lançante oposto. Idealmente, os guinchos deveriam exercer força apenas para impedir o movimento, logo a força a exercer pelo guincho quando recolhe o cabo deveria ser nula. Nesse caso os guinchos produziriam aquilo que pode designar-se como atrito de Coulomb: uma força constante que se opõe ao movimento.

O objectivo desta comunicação é descrever a utilização do pacote numérico MOORNAV (Santos 1994) no estudo das consequências da utilização de dispositivos daquele tipo no controlo dos movimentos de um navio com um deslocamento de 108 416 m³ sujeito a ondas regulares de vante, numa situação exposta, amarrado com traveses e regeiras.

Após esta introdução, apresenta-se a problemática dos movimentos de navios amarrados e a utilização de guinchos de amarração automáticos como medidas para limitar

esses movimentos e introduz-se o conceito de atrito de Coulomb. Descrevem-se em seguida os testes realizados para avaliar a influência da utilização de guinchos de amarração automáticos na limitação dos movimentos do navio amarrado. Inclui-se uma breve apresentação do modelo numérico MOORNAV utilizado neste estudo, discutindo-se depois os resultados obtidos no mesmo estudo. Por último, apresentam-se as conclusões da comunicação.

2. DISPOSITIVOS PARA LIMITAÇÃO DE MOVIMENTOS

Um porto pode ser definido como uma infraestrutura capaz de manter os navios suficientemente "quietos". Movimentos excessivos de um navio no posto de acostagem podem implicar a interrupção das operações de carga e descarga, a redução de eficiência do posto, deterioração da carga, quebra das amarras e até colisões com navios vizinhos e estragos no navio e na estrutura de acostagem. Daí a importância do estabelecimento, no projecto de um porto, de níveis toleráveis de movimentos do navio e da agitação no interior do porto.

A utilização da altura de onda como um critério de projecto só é justificável como uma abordagem expedita. De facto, apenas os movimentos do navio e as forças no sistema de amarração associadas constituem o único critério de projecto realmente satisfatório. Este critério deve basear-se nos requisitos operacionais do sistema de carga e descarga e a sua satisfação deverá orientar o projecto do porto desde o início do mesmo.

Embora historicamente os movimentos do navio no posto de acostagem tenham sido controlados exclusivamente pela protecção do navio em relação à acção directa das ondas, através da construção de obras dispendiosas, como quebra-mares, um projecto aceitável de um porto, do ponto de vista dos movimentos do navio, pode obter-se com a combinação adequada dos três factores seguintes: abrigo natural, quebra-mares, defensas e/ou amarras.

A construção de quebra-mares para criação de uma zona abrigada onde se procede a operações de carga e descarga de navios é assunto muito discutido, pois os problemas mais importantes com navios amarrados de grandes dimensões devem-se a fenómenos de ressonância, na maioria dos casos associados a ondas longas contra as quais os quebra-mares oferecem uma protecção muito reduzida.

Contudo, os efeitos da ressonância podem ser minimizados, ou até evitados, mercê da correcta modificação do sistema de amarração. Desta forma ressalta a maior importância que, em alguns casos, o sistema de amarração pode ter quando comparado com a construção de quebra-mares.

A Figura 1 apresenta um esquema de amarração onde se encontram os diversos tipos de amarras possíveis:

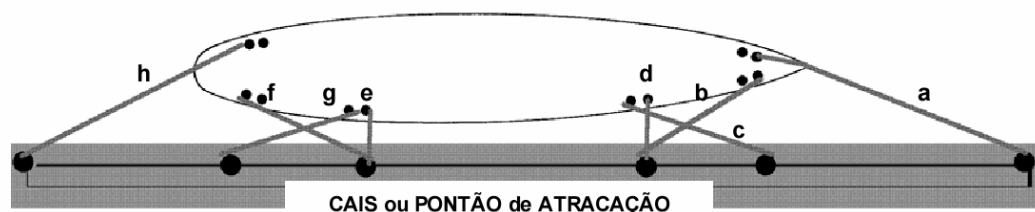


Figura 1 – Esquema de amarração (extraído de SRIP 2005)

- Lançante: cabo de amarração colocado à popa e à proa e que exerce força para a proa – a, lançante de vante (*head line*) – ou para a popa – h, lançante de popa (*stern line*).



- Regeira e contra-regeira (*spring*): a contra regeira exerce força na mesmo sentido do lançante mais próximo enquanto a regeira exerce força no sentido oposto ao desse lançante. A amarra a vante que exerce força para ré, *b*, designa-se por regeira de vante e a que exerce força para vante, *c*, é a contra-regeira de vante. A amarra a ré que exerce força para vante, *f*, é a regeira de ré e a que exerce força para ré é a contra-regeira de ré, *g*.
- Través (*breast line*): amarra que exerce uma força com a maior componente no plano perpendicular ao eixo longitudinal do navio. Consoante a posição, tem-se o través de proa, *d*, ou o través de popa, *e*.

Uma solução para limitar movimentos excessivos de navios amarrados tem consistido na utilização dos chamados guinchos de amarração automáticos. Destes podemos distinguir dois tipos:

- guinchos de tensão constante (*constant tension winches*) uma vez fixado o nível de tensão no cabo de amarração, F_{max} , o cabo desenrola ou recolhe mantendo este nível de tensão;
- guinchos de tensão automática (*automatic tension winches*) fixa-se o nível de tensão máximo, F_{max} , no cabo de amarração a aplicar quando o cabo desenrola, bem como o nível de tensão mínima quando o cabo recolhe, F_{min} .

Os guinchos de tensão constante são normalmente utilizados apenas em cabos de amarração que funcionam como travezes e nunca como lançantes ou regeiras. Nos lançantes podem utilizar-se guinchos de tensão automática, sendo 1/3 o limite inferior recomendado para a relação F_{min} / F_{max} , Krogstad (1988).

A existência de uma força mínima não nula aplicada no cabo de amarração pelo guincho de tensão automática quando o cabo está a recolher implica que tal cabo pode estar a contrariar a redução de movimento do navio produzida pelo lançante oposto. Idealmente, os guinchos deveriam exercer força apenas para impedir o movimento, logo F_{min} seria nulo. Nesse caso os guinchos produziram aquilo que pode designar-se como atrito de Coulomb: uma força constante que se opõe ao movimento. O objectivo desta comunicação é verificar a capacidade de tais guinchos para reduzir os movimentos de navios amarrados.

3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ATRITO DE COULOMB

3.1 Geometrias testadas

Estudou-se o comportamento de um navio com um deslocamento de 108 416 m³ cujas dimensões principais são

- comprimento 243 m
- boca 42 m
- calado 14 m

e que estava amarrado numa zona de fundo horizontal com 17 m de profundidade com dois travezes (l_1 e l_4) e duas regeiras (l_2 e l_3), como se mostra na Figura 2. Estes cabos de amarração eram de polietileno, tinham uma tracção máxima de 1274 kN e comprimentos semelhantes (logo relações constitutivas semelhantes). A relação constitutiva de um desses cabos é apresentada na Figura 3 a). Na Figura 3 b) apresenta-se a relação constitutiva de cada uma das duas defensas pneumáticas (f_1 e f_2) que completavam o sistema de amarração e cuja força de compressão máxima era 3034 kN. O coeficiente de atrito entre as defensas e o casco do navio era 0.35.

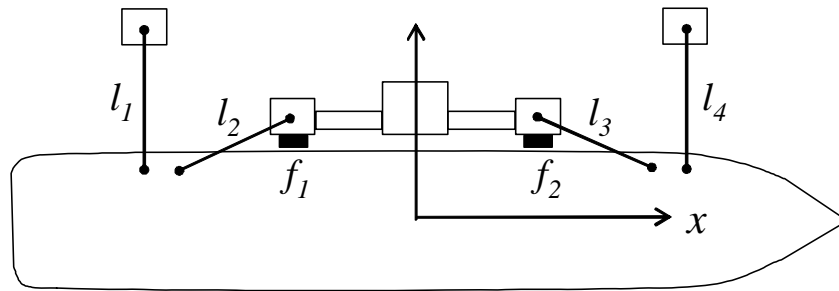


Figura 2 – Esquema de amarração testado

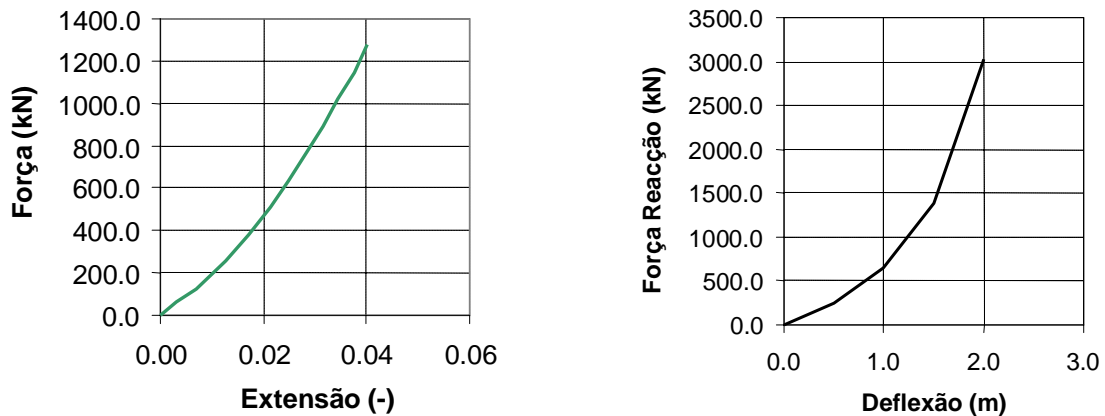


Figura 3 – Relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração. a) Amarras; b) Defensas.

Os pontos de contacto das defensas estavam sobre a linha de flutuação do navio a uma distância de 45 m do meio do navio ao longo do eixo longitudinal deste. No Quadro 1 apresentam-se as coordenadas das extremidades dos cabos de amarração num referencial directo cuja origem está no meio do navio, sobre o plano de flutuação, quando este está em repouso, como se mostra na Figura 2.

Quadro 1 – Coordenadas das extremidades das amarras.

	Posto acostagem			Navio		
	x	y	z	x	y	z
l_1	-85.0	+62.0	+3.8	-85.0	+21.0	+6.0
l_2	-45.0	+29.0	+3.8	-83.0	+21.0	+6.0
l_3	+45.0	+29.0	+3.8	+83.0	+21.0	+6.0
l_4	+85.0	+62.0	+3.8	+85.0	+21.0	+6.0

Testaram-se três configurações diferentes para os cabos onde são aplicadas as forças produzidas pelos guinchos, Figura 4 a Figura 6. Como se pretendia avaliar primeiro apenas a influência de forças adicionais idealizadas no comportamento do navio, os pontos de contacto daqueles cabos com o navio estão todos sobre o eixo longitudinal do navio, assente no plano de flutuação do mesmo: no caso das forças transversais essas extremidades distam 85 m do meio do navio, enquanto para as forças longitudinais as

extremidades distam 110 m do mesmo ponto. Para que a direcção de aplicação dessas forças não variasse muito com o movimento do navio, esses cabos têm um comprimento muito grande (entre 900 m e 1000 m). Nos cálculos realizados desprezou-se a elasticidade dos cabos.

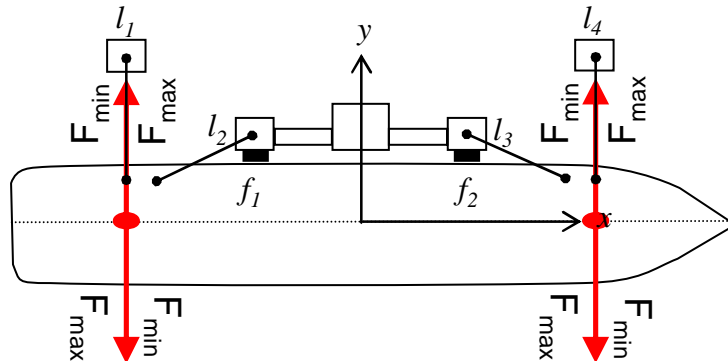


Figura 4 – Pontos de aplicação, direcção e sentidos das forças exercidas pelos cabos ligados aos guinchos na configuração I.

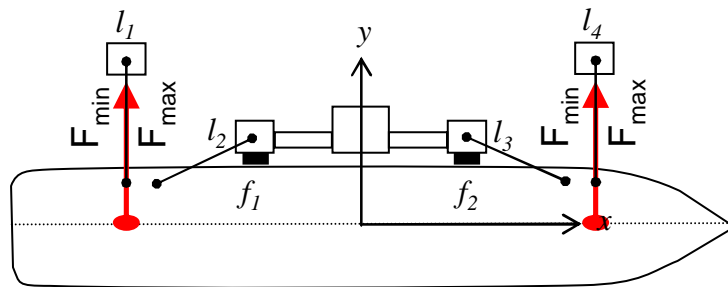


Figura 5 – Pontos de aplicação, direcção e sentidos das forças exercidas pelos cabos ligados aos guinchos na configuração II.

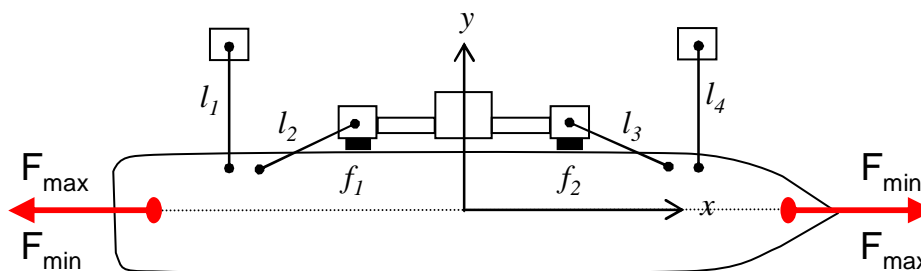


Figura 6 – Pontos de aplicação, direcção e sentidos das forças exercidas pelos cabos ligados aos guinchos na configuração III

Na primeira configuração, Figura 4, têm-se quatro guinchos ligados a cabos que funcionam como traveses. O objectivo da utilização desta configuração era garantir a existência de cabos ligados a guinchos que produzem forças em sentidos opostos sempre que a força exercida ao recolher o cabo é não nula. Trata-se de algo que não ocorre quando os guinchos estão ligados aos traveses das configurações mais clássicas de amarração,

como acontece na configuração II, Figura 5. A última configuração, Figura 6, tem os guinchos a produzir forças em cabos que funcionam como lançantes.

Modelou-se o comportamento do guincho através da força aplicada em cada um daqueles cabos, que se fez depender da variação de comprimento dos mesmos como indicado na Figura 7: Identificada a variação do comprimento do cabo determina-se a força exercida pelo guincho no cabo atendendo às taxas de variação para o aumento ou redução da força aplicada e aos limites existentes para essa mesma força. Assim, se, por exemplo, a força exercida pelo guincho estiver na fase ascendente e ocorrer uma redução do comprimento do cabo em relação ao instante anterior, então o troço de descida não é o representado na Figura 7, mas sim paralelo a este e com a extremidade superior encostada ao eixo F_{guincho} na força correspondente à exercida pelo guincho antes da mudança no sentido da variação do comprimento do cabo.

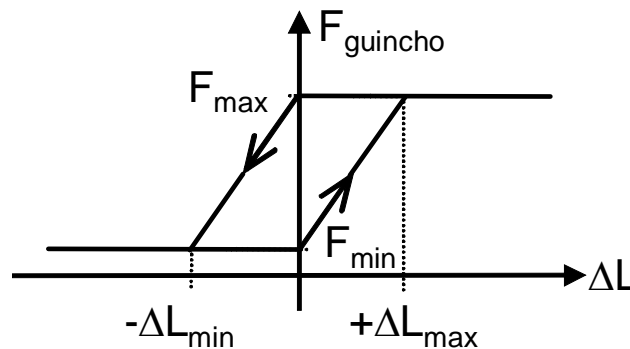


Figura 7 – Esquema de variação da força exercida pelos guinchos com o comprimentos dos cabos a que estão ligados.

Nos testes realizados consideraram-se

- 10 valores para a força máxima a exercer pelo guincho: 30, 60, 90, 120, 150, 180, 270, 360, 450, 900 kN;
- 6 valores para o quociente entre a força mínima e a força máxima a exercer pelo guincho: 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 0.90, 1.00.

Ao valor maior daquele quociente corresponde a utilização de um guincho de tensão constante enquanto ao valor menor corresponde o chamado “atrito de Coulomb”.

Assumiu-se que o aumento mínimo de comprimento do cabo para a aplicação da força máxima, ΔL_{max} , era igual à redução de comprimento mínima do cabo para a aplicação da força mínima, ΔL_{min} , e igual a 0.005 m.

3.2 O pacote numérico MOORNAV

As séries temporais dos movimentos do navio amarrado segundo cada um dos seis graus de liberdade bem como dos esforços nos elementos do sistema de amarração, quer para a situação de ausência de cabos dos guinchos, quer para a situação em que esses cabos já estavam aplicados, foram determinadas utilizando o modelo numérico MOORNAV, Santos (1994). Trata-se de um modelo que utiliza a abordagem de resposta a impulso proposta por Cummins (1962). A implementação dessa abordagem implica a resolução no domínio da frequência dos problemas de radiação e de difracção do navio livre. O primeiro corresponde à oscilação forçada do navio em águas de outra forma paradas enquanto no segundo o navio está imobilizado e sujeito à acção da agitação incidente.

As funções de resposta a impulso, $K_{kj}(t)$, (também designadas por funções de atraso) bem como os coeficientes de massa adicionada para frequência infinita, m_{kj} , associados aos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio são obtidos das transformadas de Fourier dos resultados do domínio da frequência para o problema de radiação. As séries temporais das forças actuantes no navio exercidas pela agitação incidente no navio, $F_k^d(t)$, obtêm-se da sobreposição das forças devidas a cada uma das frequências em que pode decompor-se a onda incidente.

Aquelas séries temporais, juntamente com as funções de resposta a impulso, os coeficientes de massa adicionada e os parâmetros do sistema de amarração (amarras e defensas) permitem a montagem das equações de movimento do navio amarrado.

$$\sum_{j=1}^6 \left[(M_{kj} + m_{kj}) \ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t - \tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{kj} x_j(t) \right] = F_k^d(t) + F_k^m(t) + F_k^f(t) \quad (1)$$

em que M_{kj} e C_{kj} são, respectivamente, as matrizes de massa e de restituição hidrostática do navio e $F_k^m(t)$ e $F_k^f(t)$ são os valores instantâneos das forças devidas aos cabos de amarração (incluindo os cabos ligados aos guinchos) e às defensas. Da resolução destas equações obtêm-se as séries temporais dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio e dos esforços nas amarras e nas defensas.

A solução dos problemas linearizados de radiação e de difracção é obtida com o modelo numérico WAMIT, Korsemeyer et al. (1988) que calcula o potencial associado a cada um desses problemas utilizando um método de painel. A superfície molhada do casco do navio é discretizada por painéis rectangulares e triangulares. No caso do navio estudado, foram utilizados 2694 painéis. A Figura 8 mostra uma perspectiva da discretização daquela superfície.

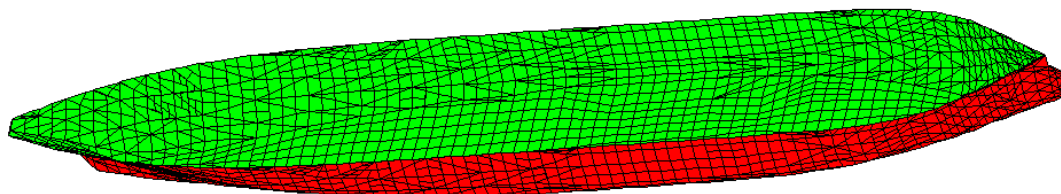


Figura 8 – Perspectiva da painelização da parte molhada do casco do navio estudado utilizada pelo modelo WAMIT

Utilizando aquela discretização para o casco, com o modelo WAMIT resolveram-se os problemas de difracção e de radiação para um conjunto de 63 frequências igualmente espaçados entre 0.0125 rad/s e 0.7875 rad/s. Na Figura 9 apresenta-se a curva com os valores do coeficiente de amortecimento para o modo de avanço obtidos para aquelas frequências, enquanto na Figura 10 se apresenta a correspondente função de resposta a impulso.

Importa referir que, para cada frequência, o modelo WAMIT produz coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para os seis modos principais, bem como para os trinta acoplamentos entre modos, preenchendo-se assim as matrizes respectivas para uma dada frequência. Além disso, uma vez que não é possível resolver o problema de radiação com o modelo WAMIT para frequências muito elevadas, pois tal implicaria a utilização de

discretizações da parte molhada do casco com um número excessivo de painéis, antes da realização da transformada discreta de Fourier da função de variação com a frequência de qualquer um dos coeficientes de amortecimento, necessária para a determinação da função resposta a impulso respectiva, ajustou-se a essa função uma curva representativa do seu comportamento assintótico para frequências altas.

Por último, na Figura 11 apresentam-se com os valores do módulo da força segundo o eixo longitudinal do navio exercida por ondas de vante com 1 m de amplitude. No gráfico estão representadas duas curvas: uma designada por “difracção” e que corresponde aos resultados do problema de difracção, a forma clássica de determinar as componentes da força exercida pelas ondas no navio imobilizado; outra designada por “Haskind” e que corresponde ao resultado de combinar o campo do problema de radiação para a oscilação do navio segundo o eixo longitudinal em águas de outra forma paradas com o campo das ondas incidentes na posição ocupada pelo navio, quando ele lá não está. Trata-se de um método alternativo de determinação das forças exercidas pelas ondas sobre o navio parado que tem a vantagem de utilizar campos cuja variação espacial é mais suave que a do campo associado ao problema de difracção.

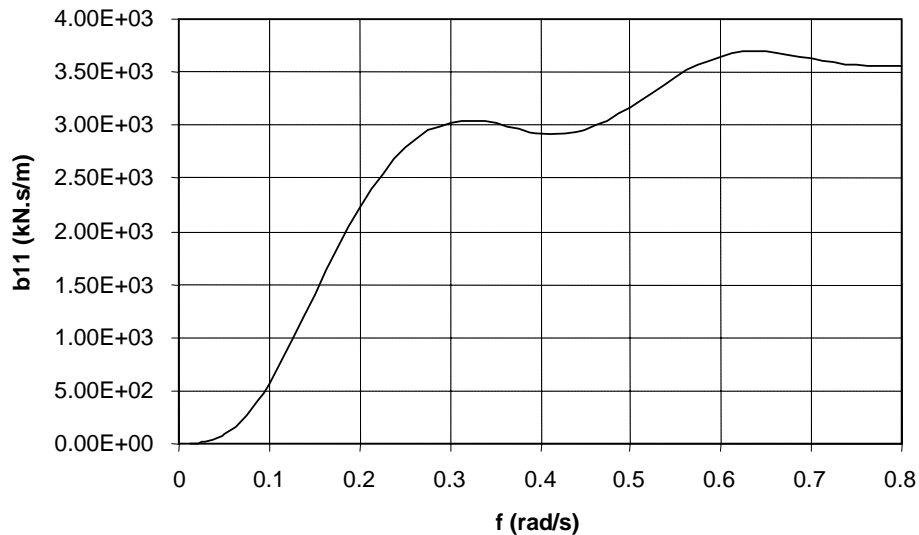


Figura 9 – Coeficiente de amortecimento para o modo de avanço. Navio isolado

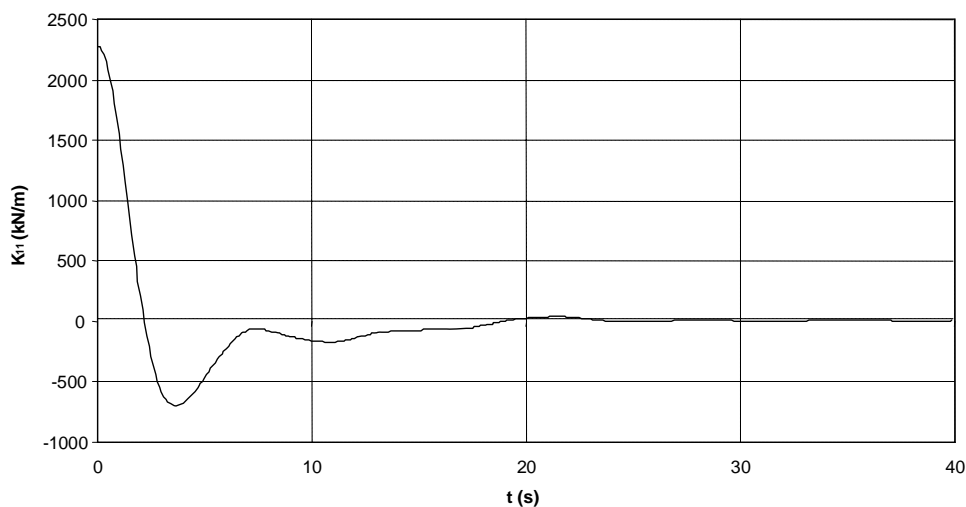


Figura 10 – Função de resposta a impulso para o modo de avanço. Navio isolado

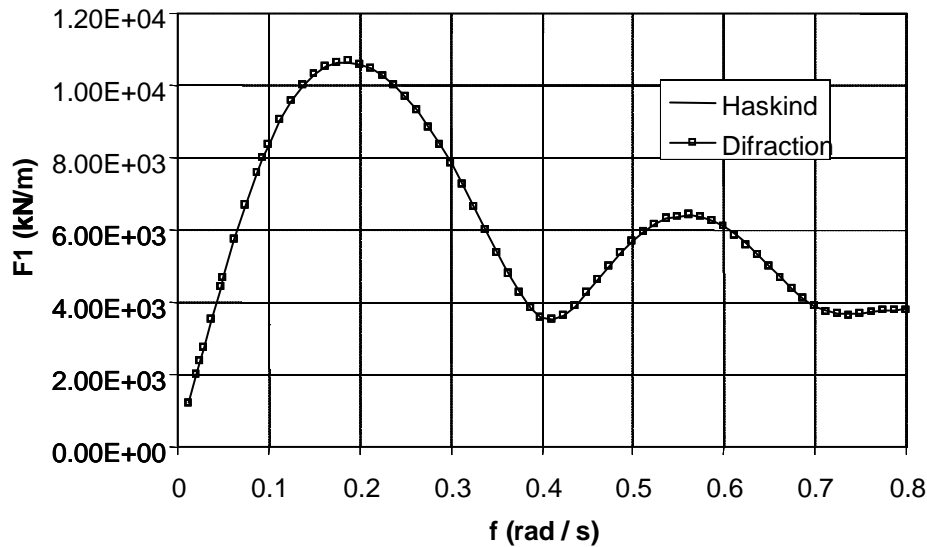


Figura 11 – Módulo da força segundo o eixo longitudinal do navio immobilizado exercida por ondas regulares provenientes de vante e com 1 m de amplitude. Navio isolado.

3.3 Resultados

A análise de resultados apresentada nesta comunicação incide sobre as amplitudes das oscilações do navio segundo cada um dos graus de liberdade, bem como sobre os valores máximos dos esforços nos elementos do sistema de amarração e nos cabos ligados aos guinchos. Aqueles valores foram obtidos no terço final da simulação com o modelo numérico MOORNAV, pois nesse intervalo de tempo já é possível observar um comportamento periódico das mesmas.

As simulações com as configurações de guinchos testadas foram realizadas com ondas regulares de vante com períodos entre 8 e 220 s. A duração de cada simulação numérica variou com o período da ondulação incidente no navio, tendo-se procurado que aquela igualasse 240 períodos da oscilação incidente. Para evitar oscilações excessivas na fase inicial da simulação causadas pela aplicação do valor máximo das forças exteriores, nomeadamente as devidas à ondulação, variou-se exponencialmente com o tempo decorrido desde o início da simulação o módulo das forças exteriores aplicadas no navio durante o terço inicial da simulação. No Quadro 2 resumem-se os valores da duração total da simulação, da duração da fase inicial de transição e do passo de cálculo nas simulações para cada um dos doze períodos da ondulação incidente testados.

No Quadro 3 apresentam-se os resultados das simulações para o navio amarrado com a configuração representada na Figura 2, isto é, sem quaisquer guinchos ligados ao navio. A altura da ondulação incidente no navio não ultrapassou os 3 m e estava sujeita à condição adicional de, na ausência dos cabos dos guinchos, os esforços nos elementos do sistema de amarração fossem inferiores a 90% do valor máximo respectivo.

Naquele quadro pode verificar-se que para períodos inferiores a 27 s nada de realmente interessante se passa com o navio amarrado. Com efeito, mesmo para ondulação com a altura de 3 m, a amplitude da oscilação em qualquer um dos modos horizontais é muito pequena. Os resultados obtidos com a inclusão de forças adicionais exercidas pelos guinchos quando a ondulação incidente tem um período inferior a 27 s revelaram alterações pouco significativas na resposta do navio amarrado. Ou seja, apenas para ondulação de longo período a existência de guinchos tem alguma influência no comportamento do navio amarrado.



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

Quadro 2 – Características das simulações.

Período da ondulação incidente (s)	Duração da simulação		Passo de cálculo (s)
	Fase inicial (s)	Total (s)	
8	640	1920	0.2
10	800	2400	0.2
12	960	2880	0.2
14	1120	3360	0.2
16	1280	3840	0.2
18	1440	4320	0.2
27	2160	6480	0.2
36	2880	8640	0.2
44	3520	10560	0.2
67	5360	16080	0.2
133	10640	31920	0.6
220	17600	52800	1.0

Quadro 3 – Resultados das simulações para navio amarrado sem guinchos.

Ondulação incidente		Amplitude oscilação máxima			Esforços máximos amarras (kN)				Esforços máximos defensas (kN)	
Período (s)	Altura (m)	Long. (m)	Transv. (m)	Guin. (°)	l_1	l_2	l_3	l_4	f_1	f_2
8	3.00	0.09	0.01	0.01	0	39	39	0	7	6
10	3.00	0.14	0.01	0.01	0	65	65	0	8	8
12	3.00	0.28	0.01	0.01	0	120	119	0	13	14
14	3.00	0.37	0.00	0.01	0	164	173	0	15	15
16	3.00	0.52	0.00	0.01	6	249	267	14	19	20
18	3.00	0.89	0.00	0.01	16	529	552	37	36	42
27	1.35	1.49	0.01	0.05	0	1127	1136	11	83	80
36	0.74	1.47	0.01	0.09	1	1122	1124	6	99	91
44	0.25	1.31	0.39	0.60	451	1117	1128	499	486	356
67	0.08	1.12	0.49	0.53	367	939	876	380	415	586
133	0.14	1.69	0.23	0.80	529	1133	1122	600	409	648
220	0.33	1.48	0.30	0.50	316	1027	1114	367	332	324

Para qualquer valor do período da ondulação incidente no navio, os valores máximos dos esforços nas amarras e nas defensas exibem alguma simetria, sendo nas regeiras onde os máximos daqueles valores estão mais próximos dos limites correspondentes.

Uma vez que os limites impostos ao valor máximo dos esforços nos elementos do sistema de amarração leva a que as simulações realizadas para os diversos períodos de ondulação incidente (igual ou superior a 27 s) tenham resultados muito semelhantes, a altura da onda incidente é um bom indicador da proximidade de uma situação de ressonância. Assim, no Quadro 3 fica claro que, para o navio amarrado e sem guinchos, a ondulação com o período de 67 s será a mais interessante pois uma onda com apenas 8 cm leva a valores dos esforços nos elementos do sistema de amarração próximos de 90% do valor limite. Por isso os resultados que se apresentam nesta comunicação se referem apenas a ondulação com um período de 67 s.

3.3.1 Configuração I

Quando os guinchos estão ligados a cabos que produzem forças em sentidos opostos no plano perpendicular ao eixo longitudinal do navio, dos vários valores considerados para o período da ondulação incidente no navio, aquele em que a aplicação daquelas forças produz maior variação na amplitude de oscilação segundo o modo de avanço é o de 67 s.

Na Figura 12 apresentam-se as curvas com a evolução da amplitude máxima daquela oscilação para diversos valores da relação entre a força exercida pelo guincho ao recolher o cabo e a força exercida pelo mesmo ao desenrolar o cabo para ondulação incidente no navio com o período de 67 s.

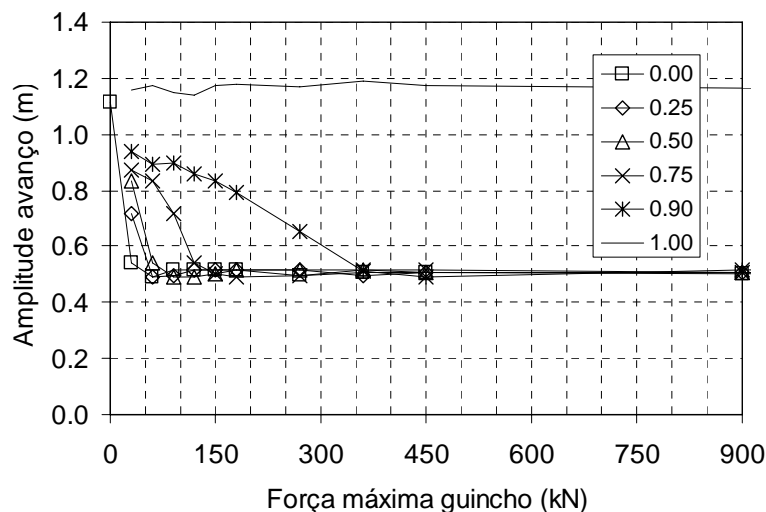


Figura 12 – Evolução, para vários valores da relação F_{\min} / F_{\max} , da amplitude máxima da oscilação segundo o modo de avanço com a força máxima exercível por cada um dos quatro guinchos ligados a cabos transversais ao navio. Ondulação de vante com o período de 67 s.

Aquela figura mostra que quando os guinchos aplicam o chamado atrito de Coulomb o valor mínimo da amplitude da oscilação segundo o avanço desce mais rapidamente do que para os outros guinchos. Contudo, quando a força máxima exercível pelos guinchos é de 60 kN, não há grande diferença entre aquela amplitude obtida para o atrito de Coulomb (0.49 m) e a obtida para guinchos de tensão automática em que $F_{\min} / F_{\max} = 0.25$ (0.49 m) ou $F_{\min} / F_{\max} = 0.50$ (0.54 m). Se os guinchos funcionarem como guinchos de tensão constante, então para qualquer valor da força aplicada pelos guinchos a redução na amplitude daquela oscilação é praticamente desprezável.

A simetria dos esforços nos elementos do sistema de amarração não é alterada significativamente com a introdução das forças exercidas pelos guinchos, qualquer que seja a forma de funcionamento dos mesmos. Assim, para ondulação incidente no navio com o período de 67 s, na Figura 13 a) mostram-se os valores máximos dos esforços na amarra l_1 , enquanto a Figura 13 b) contém os valores máximos dos esforços na amarra l_2 . Dessas figuras pode concluir-se que as forças exercidas pelos guinchos, além de reduzirem a amplitude da oscilação segundo o modo de avanço, reduzem também o valor máximo daqueles esforços. Apenas para os guinchos de tensão constante, a força por eles exercida não tem qualquer influência nos esforços nos elementos do sistema de amarração.

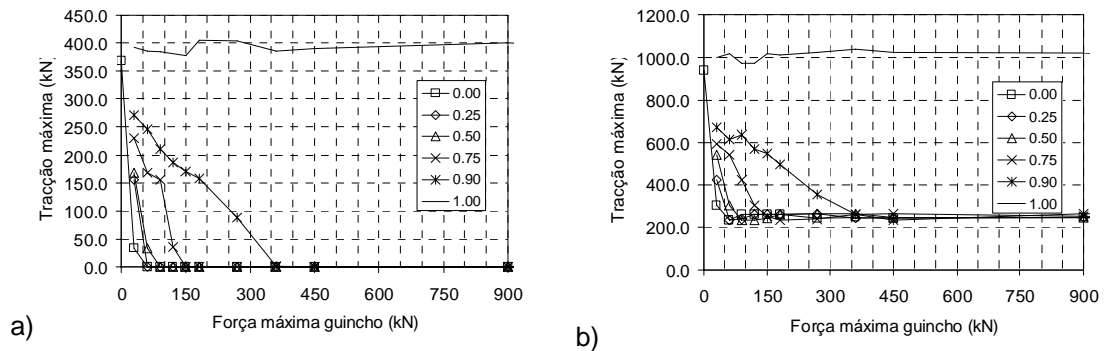


Figura 13 – Evolução, para vários valores da relação F_{\min} / F_{\max} , dos esforços máximos em elementos do sistema de amarração com a força máxima exercível por cada um dos quatro guinchos ligados a cabos transversais ao navio. a) Través de popa; b) Regeira de popa. Ondulação de vante com o período de 67 s.

De realçar que, quando se utilizam guinchos produzindo o chamado atrito de Coulomb, basta que a força máxima exercível pelos mesmos seja 60 kN para que os traverses (que na ausência dos guinchos podiam estar submetidos a uma tracção máxima de 380 kN) deixem de ser necessários. Ou seja, se em vez das amarras normais, que só produzem força no navio quando esticadas para além do seu comprimento inicial, se tiver amarras cujo comprimento inicial pode diminuir, então são necessárias tracções mais baixas nessas amarras especiais e a amplitude da oscilação segundo o modo de avanço é ainda menor do que quando se utilizam as amarras normais.

Utilizou-se a designação força máxima exercível, em vez de exercida, pelos guinchos porque, como pode ver-se no Quadro 4, com a força máxima exercida pelo cabo transversal de vante e de bombordo, nem sempre a força máxima disponível foi aplicada.

3.3.2 Configuração II

Se os guinchos estão ligados a cabos que produzem forças transversais ao navio mas apenas dirigidas para bombordo, o período da ondulação incidente para o qual a redução da amplitude da oscilação longitudinal é maior volta a ser 67 s. Contudo, ao invés do que acontecia na configuração I, os guinchos que produzem o atrito de Coulomb e os guinchos tais que $F_{\min} / F_{\max} = 0.25$ são os que deixam de provocar redução da oscilação longitudinal para os valores mais elevados da força máxima exercível pelo guincho, como pode observar-se na Figura 14.

Embora os guinchos de tensão constante sejam aqueles para os quais a amplitude daquela oscilação é menor, guinchos de tensão automática com $F_{\min} / F_{\max} = 0.50$ produzem amplitudes máximas da oscilação longitudinal semelhantes. Por exemplo, para a força máxima exercível de 900 kN tem-se para os guinchos de tensão constante uma amplitude máxima de 0.20 m enquanto para os guinchos de tensão automática referidos aquela amplitude é 0.21 m.

Quadro 4 – Força máxima (kN) exercida pelo cabo transversal de vante e de bombordo. Quatro guinchos ligados a cabos transversais ao navio. Ondulação de vante com o período de 67 s.

Força máxima exercível (kN)	F_{\min} / F_{\max}					
	0.00	0.25	0.50	0.75	0.90	1.00
30.	30.	30.	30	30.	30.	30.
60.	54.	60.	60	60.	60.	60.
90.	60.	77.	90	90.	90.	90.
120.	60.	90.	114.	120.	120.	120.
150.	61.	98.	130.	150.	150.	150.
180.	61.	106.	150.	180.	180.	180.
270.	267.	128.	196.	257.	270.	270.
360.	355.	357.	242.	330.	360.	360.
450.	450.	444.	440.	398.	450.	450.
900.	900.	900.	900.	890.	870.	900.

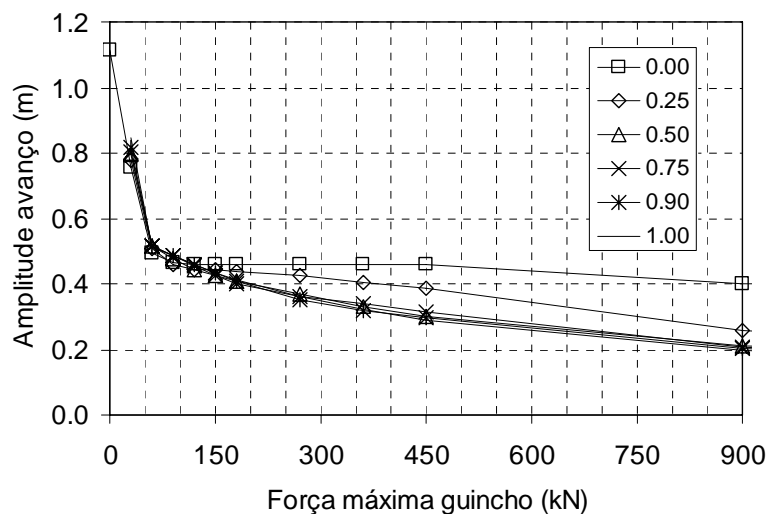


Figura 14 – Evolução, para vários valores da relação F_{\min} / F_{\max} , da amplitude máxima da oscilação segundo o modo de avanço com a força máxima exercível por cada um dos dois guinchos ligados a cabos transversais ao navio. Ondulação de vante com o período de 67 s.

Mais curioso nos valores apresentados no parágrafo anterior é o facto de, para o mesmo período da ondulação incidente no navio, menos guinchos levarem a amplitudes máximas da oscilação longitudinal menores.

Tal como para a configuração I a quase simetria dos esforços nos elementos do sistema de amarração continua a manter-se, apresentando-se na Figura 15 a) a evolução da tracção máxima na amarra l_1 e na Figura 15 b) a da amarra l_2 . Tal como na configuração anterior, a partir de força máxima exercível por cada guincho de 60 kN já é possível substituir os traveseiros por guinchos, agora de tensão constante com F_{\min} / F_{\max} superior 0.50.

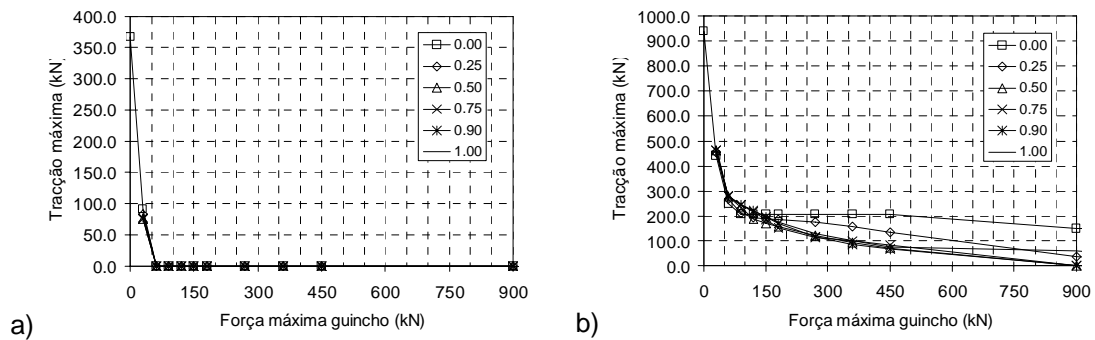


Figura 15 – Evolução, para vários valores da relação F_{min} / F_{max} , dos esforços máximos em elementos do sistema de amarração com a força máxima exercível por cada um dos dois guinchos ligados a cabos transversais ao navio. a) Través de popa; b) Regeira de popa. Ondulação de vante com o período de 67 s.

Uma substituição mais radical pode realizar-se para forças máximas exercíveis por cada guincho de 900 kN: as quatro amarras iniciais (dois travezos e duas regeiras) podem ser substituídos por dois guinchos de tensão automática capazes de exercer aquela força máxima ao desenrolar o cabo e uma força ao recolher o cabo de pelo menos 450 kN.

3.3.3 Configuração III

É nesta configuração, em que os dois guinchos estão ligados a cabos que exercem forças segundo o eixo longitudinal apenas, que as amplitudes máximas da oscilação longitudinal atingem valores mais baixos. Enquanto nas configurações anteriores aquela amplitude estava na ordem de alguns decímetros, nesta configuração elas descem até aos milímetros. Embora a maior redução daquelas amplitudes ocorra para a ondulação com o período de 133 s, continua a apresentar-se os resultados para o período de 67 s.

A Figura 16, com a evolução da amplitude máxima da oscilação de avanço confirma que guinchos de tensão constante não devem ser utilizados como lançantes pois a amplitude máxima da oscilação longitudinal é muito pouco afectada pelo valor da força máxima exercível pelo guincho.

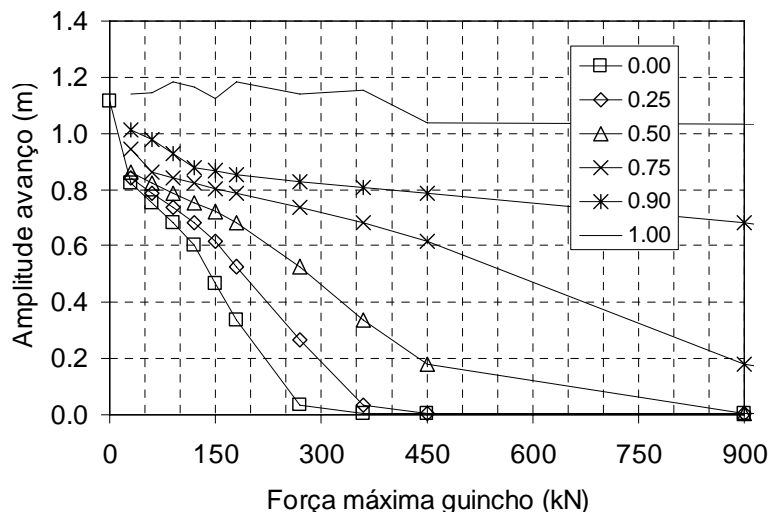


Figura 16 – Evolução, para vários valores da relação F_{min} / F_{max} , da amplitude máxima da oscilação segundo o modo de avanço com a força máxima exercível por cada um dos dois guinchos ligados a cabos segundo o eixo longitudinal do navio. Ondulação de vante com o período de 67 s.

Na mesma figura verifica-se a capacidade dos guinchos que produzem o atrito de Coulomb para obter valores baixos da amplitude máxima da oscilação longitudinal com forças máximas exercíveis pelo guincho mais baixas do que para os outros guinchos de tensão automática. A figura mostra também que para uma força máxima exercível de 450 kN a amplitude obtida com os guinchos de tensão automática tais que $F_{\min} / F_{\max} = 0.25$ (0.003 m) é igual à obtida com os guinchos que produzem o atrito de Coulomb.

Apresentam-se na Figura 17 a) e na Figura 17 b) as curvas com a evolução da tracção máxima nas amarras l_1 e l_2 . Dessas figuras pode concluir-se que, tal como na configuração anterior, os guinchos de tensão automática podem substituir os dois traveses e as duas regeiras utilizadas pois quando os guinchos exercem uma força máxima de 450 kN e uma força mínima de 112.5 kN as tracções máximas nos traveses são inferiores a 0.1 kN e nas regeiras inferiores a 2 kN.

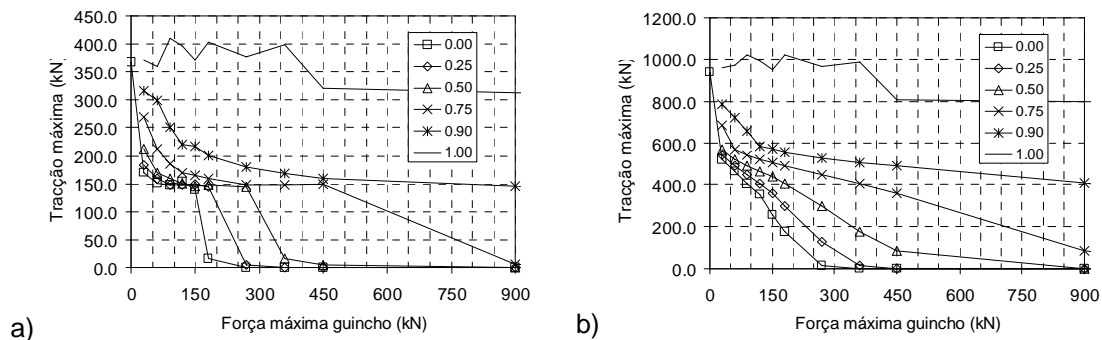


Figura 17 – Evolução, para vários valores da relação F_{\min} / F_{\max} , dos esforços máximos em elementos do sistema de amarração com a força máxima exercível por cada um dos dois guinchos ligados a cabos segundo o eixo longitudinal do navio. a) Través de popa; b) Regeira de popa. Ondulação de vante com o período de 67 s.

Ao contrário das configurações anteriores, a força máxima exercida por cada guincho atinge o valor máximo exercível, qualquer que seja o nível de força máximo ou a relação F_{\min} / F_{\max} .

4. CONCLUSÕES

Descreveu-se nesta comunicação a aplicação de um modelo numérico para o comportamento de navios amarrados na avaliação da influência das forças exercida por guinchos de tensão automática na limitação dos movimentos de um navio amarrado.

Consideraram-se diversos valores para a força exercida pelo guincho ao recolher o cabo, o que permitiu simular, para além de guinchos de tensão automática normais (em que a força exercida ao desenrolar o cabo é maior do que a exercida ao enrolar o mesmo), guinchos de tensão constante e guinchos que produzem o chamado atrito de Coulomb (o guincho não exerce força ao recolher o cabo).

Apresentaram-se resultados para um navio amarrado com dois traveses e duas regeiras e sujeito a ondulação regular de vante com um período de 67 s. Dos valores obtidos para a amplitude da oscilação longitudinal do navio e para as tracções máximas nas amarras para três configurações esquemáticas dos cabos de elasticidade desprezável que ligavam os guinchos ao navio verificou-se:

- Os guinchos ligados a cabos transversais ao navio são capazes de reduzir a amplitude da oscilação longitudinal do navio. Essa redução é mais importante quando todos cabos exercem força no mesmo sentido apenas do que quando pares de cabos podem exercer força em sentidos opostos;



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

- Se os cabos transversais ao navio permitem que os guinchos exerçam forças em sentidos opostos, então os guinchos mais eficientes são os que produzem o chamado atrito de Coulomb. Nesse caso, os cabos ligados aos guinchos podem substituir os traveses da amarração do navio, sendo a força máxima exercida por cada um dos quatro guinchos apenas 60 kN;
- Se os cabos transversais exercem força num sentido apenas, então os guinchos mais eficientes são os que funcionam como guinchos de tensão constante. Se cada um dos guinchos exercer uma força de 900 kN no navio então todas as amarras podem ser dispensadas;
- Os guinchos ligados a dois cabos que exercem forças segundo o eixo longitudinal do navio são os mais eficientes para reduzir a amplitude máxima da oscilação longitudinal. Nesse caso, apenas os guinchos de tensão constante não conseguem reduzir significativamente aquela amplitude. Tal como na configuração anterior, todas as amarras podem ser substituídas por cabos ligados a guinchos. Deste os que necessitam de forças mais baixas são os que não exercem força ao recolher o cabo (isto é, que produzem o atrito de Coulomb).

Importa referir que, dos resultados apresentados se pode concluir que mesmo nos casos em que o atrito de Coulomb produz os melhores resultados, guinchos de tensão automática que exercem uma força ao recolher o cabo igual a um quarto da força exercida ao desenrolar o cabo são capazes de produzir resultados não muito diferentes para o mesmo nível de força máxima exercível.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A., a autorização concedida para divulgar resultados dos estudos por ela encomendados ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e ao Eng^o. João Marinho, as trocas de impressões sobre este assunto bem como a motivação para o seu estudo.

BIBLIOGRAFIA

- Cummins, W.E. (1962) – “Impulse response function and ship motions”, Schiffstechnik, vol. 9, pp. 101-109.
- Korsemeier, F.T., Lee, C.-H., Newman, J.N., Sclavounos, P.D. (1988) – “The analysis of wave effects on tension-leg platforms”, 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, pp. 1-14.
- Krogstad, I. (1988) – “Ship deck machinery design forces, arrangement and equipment”, in Advances in Berthing and Mooring of Ships and Offshore Structures (ed. E. Bratteland), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 404-440.
- Santos, J.A. (1994) – Numerical Model for the Behaviour of Moored Ships. Report 3/94-B Project NATO PO-WAVES, IH-LNEC, 30 p.
- SIRP - Serviço de Informação e Relações Públicas da Marinha (2005) –Manual para Jornalistas.