



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE  
NÁUTICA E MÁQUINAS

## TRABALLO DE FIN DE GRAO

---

# “NAVEGACIÓN CON MAL TEMPO: ESFORZOS ESTRUTURAIS E ESTABILIDADE”

---

**GRAO EN “NÁUTICA E TRANSPORTE MARÍTIMO”**  
MENCIÓN OPERACIÓN NÁUTICA DO BUQUE

**ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA E  
MÁQUINAS**

SETEMBRO – 2019

AUTOR: JAVIER FARIÑA MARTÍNEZ  
DIRECTOR: RAMÓN FREIRE PIÑEIRO



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE  
NÁUTICA E MÁQUINAS

## TRABALLO DE FIN DE GRAO

---

# “NAVEGACIÓN CON MAL TEMPO: ESFORZOS ESTRUTURAIS E ESTABILIDADE”

---

GRAO EN “NÁUTICA E TRANSPORTE MARÍTIMO”  
MENCIÓN OPERACIÓN NÁUTICA DO BUQUE

ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA E  
MÁQUINAS

SETEMBRO – 2019

AUTOR:

DIRECTOR

Fdo.: Javier Fariña Martínez

Fdo.: Ramón Freire Piñeiro

## RESUMO

O mal tempo pode resultar un concepto vago se non se estuda en profundidade. O obxectivo deste texto é poñelo en contexto. Polo tanto, datos reais, como estatísticas e feitos históricos son empregados para identificar o impacto real do tempo no transporte marítimo. Unha vez que queda claro que existe unha necesidade real de evitar os perigos que o tempo meteorolóxico pode supoñer para a navegación, o seguinte paso é identificar os fenómenos perigosos que este induce.

O estudo de ditos fenómenos require dun coñecemento previo do comportamento xeral da ondada e o vento, que son as principais preocupacións dende o punto de vista establecido nos obxectivos. A maioría deles dependen do movemento do buque nos seus seis grados de liberdade, combinados cos parámetros da onda trocoidal. Non obstante, os esforzos e a estabilidade do buque proporcionan unha boa forma de explicar o impacto real destes fenómenos, e por iso se definen como factores críticos.

Finalmente, considerando os métodos de navegación máis comúns en meteoroloxía adversa, estúdase cada caso dende a perspectiva dos esforzos, estabilidade e fenómenos que poidan desenrolarse. Aínda que as conclusións non establecen verdades absolutas sobre como actuar en cada caso, debido á variedade de factores que pode afrontar un buque, proporcionan unha aproximación a como resolver unha situación de meteoroloxía adversa de maneira segura.

## RESUMEN

El mal tiempo puede resultar un concepto vago si no se estudia en profundidad. El objetivo de este texto es contextualizarlo. Por lo tanto, datos reales, como estadísticas y hechos históricos se emplean para identificar el impacto real del tiempo en el transporte marítimo. Una vez que queda claro que existe una necesidad real de evitar los peligros que el tiempo meteorológico puede suponer para la navegación, el siguiente paso es identificar los fenómenos peligrosos que este induce.

El estudio de dichos fenómenos requiere de un conocimiento previo del comportamiento general del oleaje y el viento, que son las principales preocupaciones desde el punto de vista establecido en los objetivos. La mayoría de ellos dependen del movimiento del buque en sus seis grados de libertad, combinados con los parámetros de la ola trocoidal. No obstante, los esfuerzos y la estabilidad del buque proporcionan una buena forma de explicar el impacto real de estos fenómenos, y por eso se definen como factores críticos.

Finalmente, considerando los métodos de navegación más comunes en meteorología adversa, se estudia cada caso desde la perspectiva de los esfuerzos, estabilidad y fenómenos que puedan desarrollarse. Aunque las conclusiones no establecen verdades absolutas sobre cómo actuar en cada caso, debido a la variedad de factores que puede enfrentar un buque, proporcionan una aproximación a cómo resolver una situación de meteorología adversa de manera segura.

**ABSTRACT**

Heavy weather may result a vague concept if it is not studied deeply. The aim of this text is to contextualize it. Therefore, real data, such as statistics and historic events, are used to identify the real impact of the weather on the maritime transport. Once it is clear that there is a real need to avoid the dangers the weather may suppose to the navigation, the next step goes towards the identification of the dangerous phenomena it produces.

The study of such phenomena requires of a previous knowledge of general behaviour of the seas and wind, which are the main concern from the point of view established on the objectives. Most of them depend on the movement of the ship in her six degrees of freedom combined with the parameters of the trocoidal wave. Nonetheless, the stresses and stability of the ship provide a good way to explain the real impact of these phenomena, and that is why they were set as critical factors.

Finally, considering the most common navigation methods in heavy weather, each case is studied from the perspective of the stresses, stability and phenomena which may develop. Although the conclusions do not settle absolute truths on how to act on every case, due to the variety of the factors the ship may find, they come to an approach on how to deal with a heavy weather situation in a safe way.

**INDICE XERAL**

OBXECTO .....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. MECÁNICA E INCIDENCIA DO MAL TEMPO.....	9
2.1. Mecánica e incidencia do vento .....	10
2.2 Mecánica e incidencia das ondas.....	11
2.2.1 Teoría da onda trocoidal .....	13
2.2.2 Parámetros destacados da onda.....	15
2.2.3 Previsión do estado do mar .....	19
2.3 Situacións anómalas.....	22
2.3.1 Ondas anormais.....	22
2.3.2 Ciclóns tropicais.....	23
2.4 Servizos e avisos meteorolóxicos .....	25
3. MOVEMENTO DO BUQUE ENTRE ONDAS.....	28
3.1 Balance .....	29
3.1.1 Estabilidade estática transversal .....	30
3.1.2 Estabilidade dinámica transversal.....	34
3.1.3 Comportamento xeral do buque .....	36
3.1.4 Balance sincrónico.....	37
3.1.5 Diminución da estabilidade na navegación sobre a crista da onda .....	38
3.1.6 Balance paramétrico.....	41
3.1.7 Efecto das superficies libres .....	43
3.1.8 Sistemas de estabilización do buque.....	44
3.2 Cabeceo.....	45
3.2.1 Comportamento xeral do buque .....	46
3.2.2 Cabeceo sincrónico .....	47
3.2.3 “Slamming”, emersión da hélice e embarque de auga.....	47
3.2.4 “Broaching” ou caída ao través.....	49
3.2.5 Risco polo impacto de ondas altas sucesivas .....	51
3.3 Arfada.....	52
3.4 Guinada .....	54
4. ESFORZOS ESTRUTURAIS.....	54
4.1 Forzas xeradoras de esforzos estruturais .....	55
4.2 Tipos de avaría estrutural.....	56

4.3 Esforzos lonxitudinais.....	57
4.3.1. Teoría da flexión da viga casco.....	58
4.3.2. Diagrama de cargas .....	60
4.3.3. Diagrama de esforzos cortantes.....	60
4.3.4. Curva de momentos flexores .....	61
4.4 Esforzos transversais .....	62
4.5 Esforzos de torsión .....	63
4.6 Esforzos locais e estrés térmico .....	64
4.7 Vibración .....	65
5. CASOS PRÁCTICOS .....	66
5.1 Svendborg Maersk.....	66
5.2 Maersk Newport .....	69
5.3 Prestige.....	71
5.4 levoli Sun .....	77
6. MANOBRAS .....	79
6.1 Actuación xeral.....	79
6.1.1 Operatividade do buque .....	80
6.1.2 Supervivencia do buque .....	81
6.2 Navegación con mar a proa do través .....	82
6.3 Navegación con mar a popa do través .....	84
6.4 Navegación ao paio.....	86
6.5 Navegación ao garete .....	86
6.6 Emprego das áncoras .....	87
6.7 Navegación en ciclóns tropicais .....	87
CONCLUSIÓNS FINAIS.....	91
DEFINICIÓNS E ABREVIATURAS .....	99
ÍNDICE DE TÁBOAS .....	103
ÍNDICE DE FIGURAS.....	103

## **OBXECTO**

O obxecto do traballo é proporcionar un achegamento á navegación en condicións meteorolóxicas adversas do buque mercante, de maneira que o capitán ou oficial responsable da garda dispoña dun criterio de actuación e coñeza de antemán a situación coa que se pode atopar. Con esta fin, quérese dar a coñecer os efectos destas condicións sobre o buque, máis concretamente sobre os esforzos e a estabilidade. A elección destes dous elementos como factores críticos, non é arbitraria, senón que se basea na boa estimación que ofrecen do perigo da navegación e do nivel de operatividade do buque.

Para facilitar a súa comprensión e posta en contexto, ofrécese unha aproximación xeral aos puntos máis destacados da meteoroloxía relacionada e aos sistemas de previsión e información. Pola outra banda, co obxectivo de reforzar o carácter práctico do traballo e facer fincapé na situación real, analízanse varios casos de incidentes marítimos relacionados co mal tempo.

Finalmente, apoiándose no contido do texto, o lector debería contar cunha base que lle permita identificar posibles situacións de perigo real e adoptar as medidas oportunas para reducir a fatiga do buque e manter a súa seguridade en condicións de meteoroloxía adversa.



## 1. INTRODUCCIÓN

Baixo unha ollada xeral ao problema da meteoroloxía adversa, poderíase considerar que o problema é unha cuestión de deseño do buque que non afecta á súa operación in-situ, polo feito da imposibilidade de actuar en contra dos seus efectos. Indo máis lonxe, a tecnoloxía actual tería superado os desafíos que a natureza impón sobre a estrutura do buque, polo que a súa derrota permanecería invariable ante unha situación deste tipo. Sen embargo, abonda con bosquejar o panorama marítimo internacional para atopar as primeiras voces contrarias.

“The Swedish Club” é unha aseguradora marítima de carácter internacional. En 2014 publicou un artigo especialmente dedicado ás reclamacións por danos provocados polo mal tempo entre os anos 2005 e 2013 [1]. Nesta publicación, identifícanse os danos á carga como motivo principal de reclamacións derivadas da meteoroloxía adversa, e en segundo plano, os danos ao casco e a outros equipamentos do buque. Atendendo ao primeiro motivo, a figura 1.1 relaciona a través dunha gráfica a frecuencia (frequency) coa que se dá este tipo de reclamacións e o seu custo medio (cost) por cada tipo de buque considerado. Á cabeza dos incidentes máis repetidos sitúanse os buques portacontedores (container) e de carga rodada, cuxo principal motivo de reclamación reside nos correntos de carga ou perda da mesma por caída ó mar, no caso concreto dos primeiros. Pola outra banda, o motivo principal das reclamacións en buques graneleiros ou de carga seca (Bulkier/Dry) é a entrada de auga na bodega por falta de estanquidade.

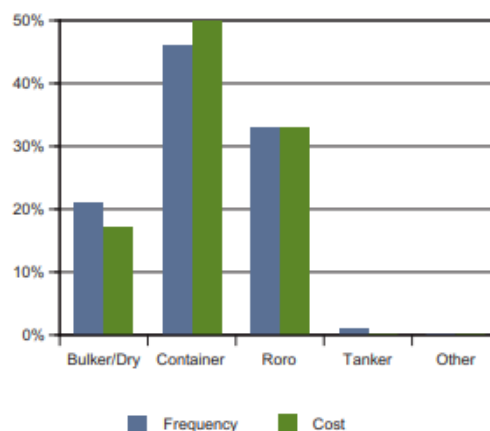


Figura 1.1 – Frecuencia e custo medio das reclamacións por danos á carga (The Swedish Club, 2014) [1]

Na figura 1.2, análoga á anterior, móstrase un pequeno cambio de tendencia para as reclamacións por danos ao casco e equipamento do buque. O incremento que se produce nos buques clasificados como outros (other) débese a buques que transportan cargas pesadas pero, sen embargo, buques de carga rodada e portacontedores seguen estando por enriba dos de carga a granel. Isto non é meramente unha casualidade, senón que hai que considerar que un corremento da carga nun buque de carga rodada ou en contedores pode provocar tamén un dano no casco ou equipamento do buque. Outro factor importante, no que se afonda máis adiante, é a gran velocidade de navegación para a que se deseñan. En xeral, os danos máis comúns rexistrados son os que afectan á zona de proa do buque, aínda que tamén se rexistran danos na popa e ao eixe de cola.

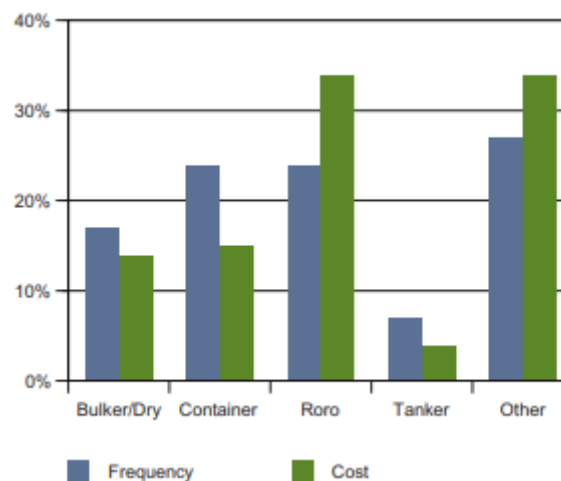


Figura 1.2 – Frecuencia e custo medio das reclamacións por danos ao casco e ao equipamento do buque (The Swedish Club, 2014) [1]

Estes datos supoñen unha primeira mostra da importancia de considerar os efectos do mal tempo, que vén reforzada pola preocupación que a aseguradora expresa sobre a actuación das tripulacións á hora de afrontar este tipo de situacións. Unha velocidade excesiva, un rumbo inadecuado e a asunción de riscos innecesarios perfílanse como factores de erro humano nestes incidentes.

A continuación da análise da presenza internacional do mal tempo no transporte marítimo, leva indubidablemente ó maior expoñente da seguridade deste ámbito, a Organización Marítima Internacional (OMI). No ano 2007, publica a través do

seu Comité de Seguridade Marítima (Maritime Safety Committee – MSC) a circular MSC.1/Circ.1228 [2], documento dedicado integramente a tratar os fenómenos máis perigosos e relevantes con mala mar. Leva por título “Orientación revisada que sirva de guía ó capitán para evitar situacións perigosas en condicións meteorolóxicas e estados do mar adversos”. Esta xa vén a substituír a MSC/Circ.707 [3] do ano 1995 que leva por título “Orientación que sirva de guía ao capitán para evitar situacións perigosas con mar de popa o de aleta”.

Á par destas orientacións, cabe destacar a adopción do “Código de Estabilidade sen Avaría” a través da MSC.267(85) [4], en cuxa “Parte B: Recomendacións aplicables a determinados tipos de buques e outras directrices” se aconsella un conxunto de medidas de “precaucións operacionais con mal tempo” e “manexo do buque con mal tempo”.

Todas as recomendacións formuladas pola OMI nos documentos citados non eximen ao capitán de tomar medidas en condicións máis favorables de estímulo oportuno, pero sentan unhas guías para a actuación de buques, que mesmo sendo cumpridores do conxunto de códigos que lle resultan aplicables, poden verse sometidos a unha situación de perigo de enfrontarse á meteoroloxía adversa. A continuación, búscase poñer en contexto e ampliar o contido destas guías, de maneira que senten unha base para a construción dunha aproximación máis profunda ao criterio de toma de decisións en condicións de mal tempo.

## **2. MECÁNICA E INCIDENCIA DO MAL TEMPO**

En concordancia coa formulación do presente traballo, enténdese por mal tempo aquela situación meteorolóxica adversa que poida poñer a proba a estabilidade e resistencia estrutural do buque en navegación. Deste modo, as principais forzas externas derivadas de dita situación a ter en conta son o vento e a ondada, por entender que o xeo, por ser un risco climatolóxico e xeograficamente limitado, require un estudo segregado.

O obxectivo deste apartado é a introdución das condicións meteorolóxicas adversas dende a súa orixe, coa fin de poder predicilas, ao seu modelado, de maneira que se poidan explicar os seus efectos.

### **2.1. Mecánica e incidencia do vento**

O vento é unha forza externa ó buque de índole meteorolóxica causada pola incidencia do aire en movemento sobre a obra morta. A intensidade desta forza incrementase coa velocidade do vento e a superficie exposta á súa acción. O seu principal efecto é desviar o buque do seu rumbo inicial, o que se coñece como abatemento. Esta acción vese notablemente restrinxida pola resistencia da carena ao seu desprazamento a través dun medio de densidade considerablemente maior á do aire, como é a auga do mar.

A relación da superficie exposta ao vento coa superficie somerxida determina a posición de equilibrio do buque, na que ambas forzas se equiparan. Polo tanto, esta dependerá do asento, francobordo e situación da superestrutura. Buques de gran francobordo, como buques de pasaxe ou Ro-Ro, abaterán máis intensamente, e ademais, debido á distribución uniforme da súa superestrutura ao longo da eslora, farano practicamente ao mesmo ritmo en ambas cabezas. Pola contra, o buque mercante con superestrutura a popa, presentará unha tendencia a orzar, sendo incrementada na condición de lastre e reducida na condición de carga.

Outro dos efectos da acción do vento como forza externa é a de provocar unha escora no buque e mantela, no caso de que a súa actuación se prolongue no tempo. Este fenómeno descríbese con máis profundidade no apartado 3.1.2 Estabilidade dinámica transversal.

O vento defínese tamén como aire en movemento, provocado polos gradientes térmicos e barométricos do interior da atmosfera. A súa intensidade é proporcional á variación de presión ou temperatura. Este constitúe o vento absoluto ou real, que en combinación coa velocidade e rumbo propios do buque

dan como resultante o vento aparente, cuxa dirección e intensidade é a de impacto real sobre o mesmo. A súa acción pode descompoñerse nos eixes de simetría do buque. No eixe lonxitudinal, o vento aparente pode aumentar ou diminuír a súa velocidade, así como inducir movementos de cabeceo de maneira análoga ao acontecido no eixe transversal cos movementos de balance e abatemento. A compoñente vertical, por outro lado, é de escasa relevancia.

Centrada a análise nos puntos críticos considerados no obxecto deste traballo, é preciso identificar ó vento coma unha forza externa capaz de actuar sobre o plano transversal e producir unha escora nun momento determinado. Pola outra banda, en canto aos esforzos, o verdadeiro punto clave do vento é a xeración de ondas, xa que pese ás grandes intensidades que pode alcanzar sobre a superestrutura, o seu impacto sobre o casco do buque non é comparable ao da ondada que orixina. Esta relación directaponse de manifesto na escala Beaufort (Táboa 2.1.1.), onde se pode aproximar a velocidade do vento partindo da observación empírica dos fenómenos que este induce sobre a superficie mariña. Débese ter en conta sen embargo, que outros factores como a corrente poden perturbar esta observación visual, polo que as lecturas dos instrumentos de medida da velocidade e dirección do vento, coñecidos como anemómetros, resulta moito máis fiable.

## **2.2 Mecánica e incidencia das ondas**

Calquera perturbación da superficie mariña, como procesos xeolóxicos ou correntes mariñas, son candidatos a actuar como fonte xeradora de ondas. Sen embargo o vento establécese como a causa principal da formación de ondada en función da súa intensidade, duración e extensión de influencia, coñecida como fetch.

O vento provoca unha perturbación sobre a auga, a través dun traspaso de enerxía irregular, sobre unha zona que se coñece como zona xeradora, habitualmente coincidente cunha area afectada por unha borrasca. O seu efecto é a xeración dun movemento simultáneo de oscilación vertical da superficie mariña e traslado da perturbación a sotavento. A actuación da gravidade como forza

recuperadora, tendendo a devolver o sistema á situación de repouso, induce o comportamento ondulatorio da onda.

<b>ESCALA BEAUFORT</b>				
<b>Forza</b>	<b>Denominación</b>	<b>Velocidade</b>		<b>Efectos do vento en alta mar</b>
		<b>Km/h</b>	<b>kn</b>	
0	Calma	1	1	Mar coma un espello
1	Ventolina	1-5	1-3	Rizos no mar coma as escamas dun peixe, pero sen espuma
2	Frouxiño	6-11	4-6	Pequenas ondas con cristas de aparencia vítrea e sen se romper
3	Frouxo	12-19	7-10	Pequenas ondas con cristas rompentes; espuma de aspecto vítreo que xurde de forma illada
4	Bonancible-moderado	20-28	11-16	Pequenas ondas crescendo
5	Fresquiño	29-38	17-21	Ondas medianas alongadas
6	Fresco	39-49	22-27	Fórmanse ondas grandes e cristas de espuma branca
7	Frescachón	50-61	28-33	O mar crece, a espuma branca procedente das ondas é arrastrada polo vento
8	Temporal	62-74	34-40	Ondas de altura media e máis alongadas; no borde superior das mesmas xa se perciben torbellinos das salpicaduras
9	Temporal forte	75-88	41-47	Grandes ondas; as cristas das ondas rompen en rolos reducíndose a visibilidade coas salpicaduras
10	Temporal duro	89-102	48-55	Ondas moi grandes con longas cristas en penachos; a espuma aglomérase en grandes bancos facendo que a superficie sexa branca ; visibilidade reducida
11	Temporal moi duro	103-117	56-63	Ondas de altura excepcional (pódense perder de vista tras delas barcos de tonelaxe pequeno e medio); mar cuberta de espuma e visibilidade reducida.
12	Temporal furacanado	>118	>64	Aire cheo de espuma, salpicaduras, mar cuberto de espuma; visibilidade moi reducida.

Táboa 2.1.1 – Escala Beaufort (Meteogalicia, 2019) [5]

### 2.2.1 Teoría da onda trocoidal

A teoría da onda trocoidal é un modelo que busca describir o comportamento dos movementos da superficie mariña. O seu fundamento matemático descríbese máis a fondo na publicación de Olivella, J. (1998) [8], na que se basea este apartado, sen embargo, a súa interpretación práctica dá consistencia a moitos fenómenos descritos máis adiante.

En primeiro lugar, coñécese como trocoide a figura xeométrica definida por un punto fixo no interior dunha circunferencia de radio ( $R$ ) a unha distancia constante ( $d$ ) do seu centro cando esta roda sobre unha recta horizontal. O modelo en cuestión xunto cos parámetros citados esquematízase na figura 1.2.1.1, xunto cos parámetros de lonxitude ( $L$ ) e altura da onda ( $H$ ).

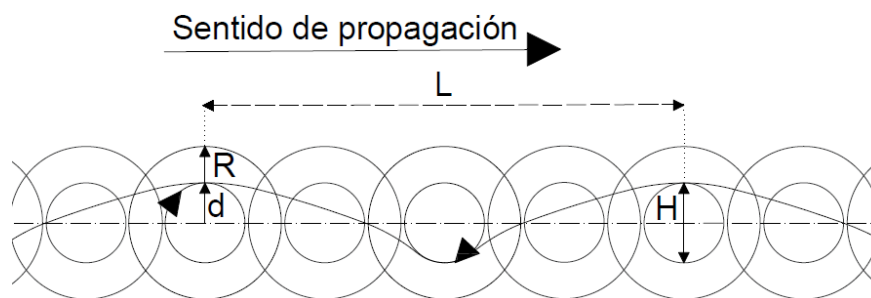


Figura 2.2.1.1 – Onda trocoidal, sentido de xiro e parámetros principais.

A xeometría aquí exposta, corresponde á representación da combinación do movemento das partículas de auga de maneira cíclica co traslado da perturbación. En augas profundas, as partículas da auga desprázanse en órbitas circulares cuxo radio diminúe coa profundidade. Ao mesmo tempo, prodúcese un traslado da perturbación a sotavento sen que ditas partículas se despracen das súas posicións de oscilación. O sentido de xiro será en todos os casos no sentido de propagación da onda na súa parte máis alta, chamada crista, e en sentido contrario na súa parte máis baixa, coñecida como seno. Polo tanto, o buque que se despraza entre ondas experimenta momentos evolutivos alternativos polos efectos de arrastre opostos entre a crista e o seno da onda. Este efecto será máis pronunciado canto maior sexa a altura da onda e máis se aproxime a eslora da nave á semilonxitude da onda.

Para augas pouco profundas, é dicir, cuxa sonda sexa menor á metade da lonxitude da onda, as órbitas redúcense e aplánanse adoptando unha xeometría elíptica tal e como se mostra na sección dereita da figura 2.2.1.2. Na mesma figura, en contraposición, represéntase o comportamento en augas profundas na sección esquerda. O fenómeno do comportamento das órbitas das partículas en augas profundas aumenta o seu movemento horizontal, incrementando a súa capacidade de arrastre, xeración de esforzos e posibilidade de ruptura das ondas.

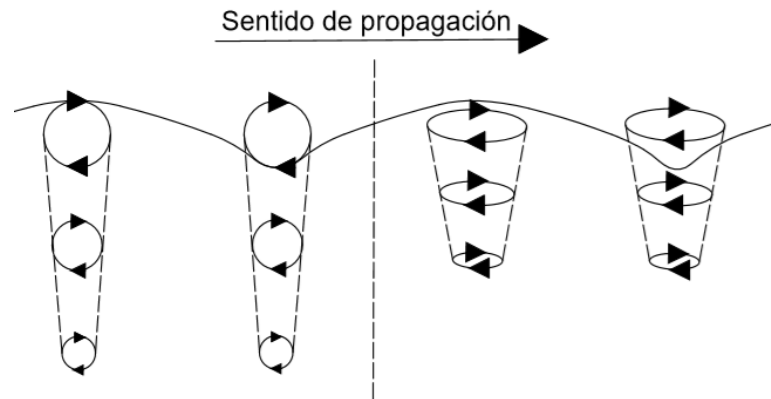


Figura 2.2.1.2 – Órbitas e sentido de xiro das partículas da auga en augas profundas e pouco profundas, respectivamente.

Cabe destacar ademais, que a aparencia da trocoide pode variar e describir tres tipos fundamentais de onda segundo a relación da lonxitude de onda co diámetro ( $2R$ ) da órbita circular. Así, se a súa relación resulta menor de  $\pi$ , obtérase unha trocoide estable; se é igual a  $\pi$ , unha cicloide e finalmente, se é maior ca  $\pi$ , unha trocoide inestable, propia de ondas rompentes; tal e como se mostra na figura 1.2.1.3. (García, L., 2019) [12].

Referíndose ao aspecto máis eminentemente práctico da ondada, o seu efecto inmediato é unha redución da velocidade de navegación para unha potencia dada, consecuencia da perturbación do fluxo hidrodinámico entorno ao casco. Esta perda de velocidade, combinada cos momentos evolutivos impresos polo desprazamento das partículas superficiais pode xerar unha tendencia do buque a atravesarse ó mar. Polo outro lado, a ondada tamén é xeradora de esforzos directos sobre a obra viva e a obra morta en función da súa cantidade de movemento horizontal, e indirectos, derivados dos movementos do buque que esta induce.



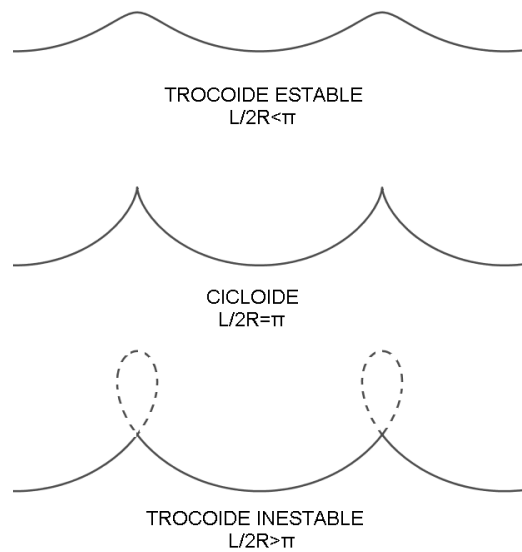


Figura 2.2.1.3 – Perfís da trocoide estable, cicloide e trocoide inestable.

## 2.2.2 Parámetros destacados da onda

Os parámetros relacionados coa posición do buque en relación co perfil da onda en cada momento, permiten comprender mellor cal é o efecto da ondada sobre o casco. Sendo a propagación das ondas un movemento ondulatorio, o seu ciclo establécese entre dúas posicións extremas, dúas crestas ou dous senos consecutivos, ou ben dúas posicións situadas na mesma amplitude da oscilación denominados puntos en fase. Entre os seus parámetros destacados cabe mencionar algúns que se describen a continuación:

- **Altura da onda (H):** Denomínase así á distancia vertical entre a crista e o seno da onda.
- **Lonxitude da onda (L):** Corresponde á distancia horizontal entre dous senos, crestas ou puntos en fase consecutivos. A bordo pode obterse aproximadamente a partir da comparación coa eslora do buque ou ben mediante a medida da distancia entre os ecos das crestas consecutivas das ondas producidos no radar.
- **Pendente da onda (H/L):** Relación da altura coa lonxitude da onda.

- **Velocidade de fase da onda (c):** A velocidade de propagación da onda individual refléxase na expresión xeral seguinte, na que g fai referencia á aceleración da gravidade (García, L., 2019) [12] :

$$c \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{L}\right)} \quad (2.2.2.1)$$

- **Velocidade de grupo (V<sub>w</sub>):** É a velocidade do conxunto de ondas que se propaga en forma de perturbación cun mesmo sentido de avance. Resulta equivalente á metade da velocidade de fase da onda, quedando a súa expresión simplificada do seguinte xeito (García, L., 2019) [12] :

$$V_w = \frac{gT_w}{4\pi} \quad (2.2.2.2)$$

- **Período da onda (T<sub>w</sub>):** O período de propagación da onda é o lapso de tempo entre o paso de dúas cristas, senos ou puntos en fase consecutivos por un punto de referencia na superficie mariña. Pode obterse a bordo mediante a cronometraxe do tempo transcorrido entre o paso dun obxecto flotante ou mancha de espuma pola crista dunha onda e a súa reaparición sobre a seguinte crista, despois de pasar polo seno da onda. O período pode relacionarse coa lonxitude da onda a través da fórmula (OMI, 2007) [2] :

$$L = 1,56 * T_w^2 \text{ [m]} \text{ ou } T_w = 0,8\sqrt[3]{L} \text{ [s]} \quad (2.2.2.3)$$

- **Frecuencia da onda (ω<sub>w</sub>):** A frecuencia natural da onda é a magnitude indicadora do número de ciclos completos realizados na unidade de tempo con respecto a un punto de referencia situado na superficie do mar. A súa expresión é a seguinte (USNA, 2017) [22] :

$$\omega_w = \frac{2\pi}{T_w} \quad (2.2.2.4)$$

- **Período de encontro da onda (T<sub>e</sub>):** Debido a que o buque navega cunha velocidade determinada, o período da onda non vai corresponderse co intervalo de tempo entre o paso de dúas cristas, senos ou puntos en fase consecutivos por un punto de referencia no casco do buque, o que se coñece como período de encontro (T<sub>e</sub>). Atendendo ás velocidades relativas, o buque verá o período de encontro reducido cando navega co mar a proa do través e

incrementado cando navega co mar a popa do través. Para a súa aproximación visual, tómanse como referencia os períodos de balance ou cabeceo segundo cal sexa o máis directamente inducido pola dirección da ondada. Tamén pode calcularse mediante o diagrama da figura 2.2.2.1 ou a fórmula seguinte, onde  $V$  corresponde a velocidade do buque e  $\alpha$  ao ángulo formado pola quilla coa dirección das ondas, coñecido como ángulo de encontro, sendo  $0^\circ$  o valor correspondente ao mar de proa (OMI, 2007) [2] :

$$T_e = \frac{3 T_w^2}{3T_w + V\cos(\alpha)} [s] \quad (2.2.2.5)$$

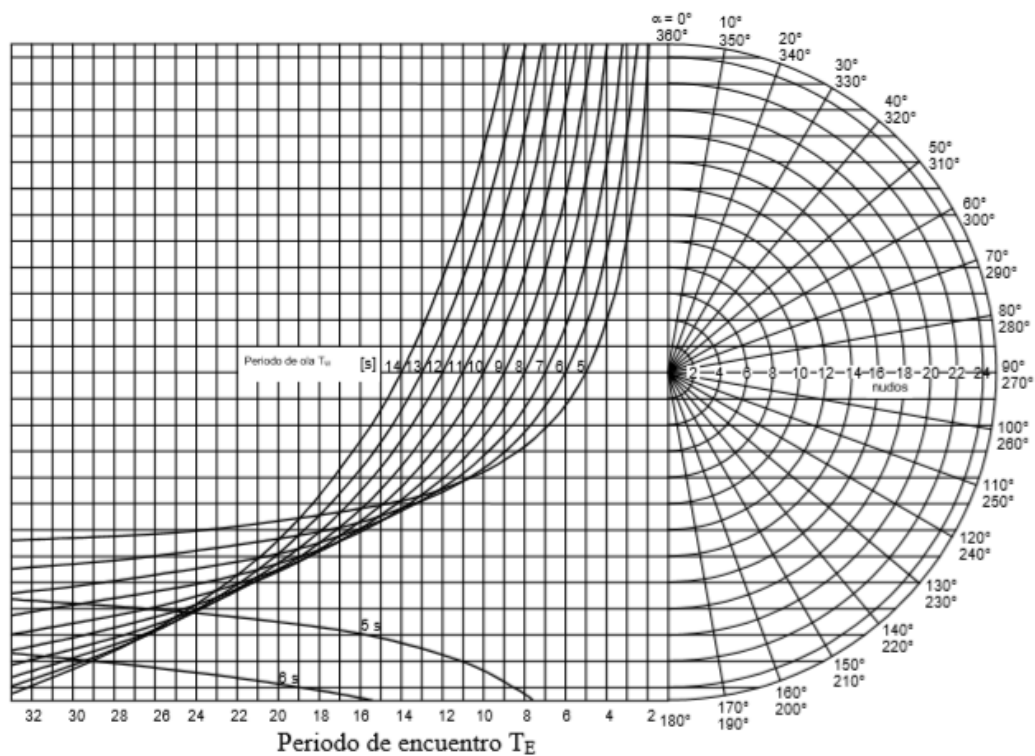


Figura 2.2.2.6– Diagrama para a determinación do período de encontro (OMI, 2007) [2]

- **Frecuencia de encontro da onda ( $\omega_e$ ):** Corresponde ao número de ciclos completos realizados na unidade de tempo con respecto a un punto de referencia situado no casco do buque. Equivale á frecuencia coa que o buque experimenta os efectos da ondada. Pódese calcular mediante a expresión seguinte, onde  $V$  corresponde á velocidade do buque e  $\alpha$  ao rumbo do buque en relación á dirección de propagación da ondada. (USNA, 2017) [22] :

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2 V \cos \alpha}{g} \quad (2.2.2.7)$$

- **Altura significativa da ondada ( $H_s$ ):** Representa a altura das ondas que apreciaría un observador experimentado de maneira visual, polo que resulta a mellor aproximación ao estado real da ondada. Para estimala, con ondada de lonxitude notablemente menor a eslora do buque, resulta recomendable situarse no lugar máis próximo á auga que permita observar as ondas por onde se achegan no momento que o movemento do buque é menos acentuado. Con ondada de lonxitude aproximadamente igual á do buque, recoméndase buscar unha posición de altura tal que as ondas se divisen a nivel do horizonte cando se navega no seno da onda, sendo a altura da onda igual á altura do ollo do observador sobre o nivel da auga nese momento. Máis especificamente, defínese a altura significativa da ondada como a altura media do terzo de ondas máis altas (o 33%) dun grupo de referencia. A altura das ondas en cuestión, e polo tanto a súa relativa intensidade, gradúase na escala Douglas. (OMM, 2014) [[10](#)]

<b>ESCALA DOUGLAS</b>		
<b>Forza</b>	<b>Denominación</b>	<b>Altura en metros</b>
0	Mar chan / mar calmo	0
1	Mar rizado	0 a 0,1
2	Mar ovellado	0,1 a 0,5
3	Marusía	0,5 a 1,25
4	Forte marusía	1,25 a 2,5
5	Media vaga	2,5 a 4
6	Vaga	4 a 6
7	Vagallón / mar arborado	6 a 9
8	Vagallón campal	9 a 14
9	Mar enorme	Máis de 14

Táboa 2.2.2.8 – Escala Douglas (Meteogalicia, 2013) [[5](#)]

De media, sobre o 15% das ondas consideradas igualan ou superan o valor da altura significativa. O 10% das ondas máis altas do grupo, pode chegar a ser dun 30 a un 35% máis alto que este valor. Por último dentro desta porcentaxe, cada certo período de tempo, aproximadamente unha hora, pódese atopar unha onda de case dúas veces o valor da altura significativa (NOAA, 2019) [35]. Disto cabe deducir que, cada certo tempo, resulta posible atoparse cunha onda de altura maior á media de ondas que se observa na superficie do mar.

As observacións meteorolóxicas a bordo, que se requiren para obtención dalgúns destes parámetros, non son representativas soamente dende este punto de vista, senón que, nalgúns casos tamén son cedidas a organismos nacionais para a elaboración de predicións. Co afán de normalización das observacións, a Organización Meteorolóxica Mundial (OMM) publicou en 2014 a “Guía de Instrumentos e Métodos de Observación Meteorolóxicos” [10], actualizada en 2017. No seu capítulo cuarto da segunda parte, afonda nas observacións mariñas e dedica un apartado concreto ás que se realizan dende buques. O seu emprego pode ser realmente útil a bordo como guía para a correcta obtención de información.

### **2.2.3 Previsión do estado do mar**

O modelo da onda trocoidal e os seus parámetros por si mesmos non permiten unha comprensión total da mecánica xeral da superficie mariña. A orixe, desenrolo e esgotamento das ondas tamén son factores importantes a ter en conta para poder predicir a súa acción. Na publicación da OMM que leva por título “Guía para a análise e prognóstico das ondas” [11] de 1998, trátanse estes e outros puntos con maior detalle.

En resumo, a predición do estado do mar nun momento determinado é unha tarefa complexa, xa que os feitos empíricos poñen de manifesto a irregularidade que impera na ondada. Debido á natureza ondulatoria da onda, pódese considerar que o estado do mar é produto da superposición de ondas regulares de parámetros diferentes que interactúan entre si. De feito, o mar de vento, é dicir, a ondada xerada directamente pola acción do vento no momento presente, é un

conxunto de ondas de pequeno tamaño e grandes pendentes que se xeran e rompen continuamente mentres que simultaneamente outras continúan aumentando de altura.

As ondas que continúan aumentando de altura fano en maior medida canto maior sexa a intensidade, duración e área de influencia do vento que as afecta, ata que o mar estea completamente desenrolado ou ata o límite de rotura da onda, que se da para unha pendente de aproximadamente  $1/7$ . Denomínase mar completamente desenrolado á situación de equilibrio enerxético na que a altura das ondas non aumenta aínda que o vento continúe actuando sobre elas e persistencia mínima ao tempo transcorrido para alcanzar dito estado.

A altura de ondas á saída da zona xeradora pode estimarse mediante o uso de ábacos aplicados a mapas sinópticos meteorolóxicos separados un lapso de tempo. O tempo transcorrido entre a hora de referencia dun mapa e o outro proporciona un dato de duración da influencia do vento. Se esta se compara coa persistencia mínima requirida para producir un mar completamente desenrolado, identificarase un mar completamente desenrolado para duracións maiores á persistencia mínima e non desenrolado para duracións menores. No primeiro caso, o ábaco de altura das ondas en función da persistencia mínima proporciona unha boa aproximación, xa que a altura estará limitada por ela. No caso de duracións menores, obtense maior precisión empregando o fetch como factor limitador. En calquera caso, débese ter en conta que os ábacos se refiren sempre a o mar completamente desenrolado, polo que o valor pode non ser exacto. (García, L., 2019) [\[12\]](#)

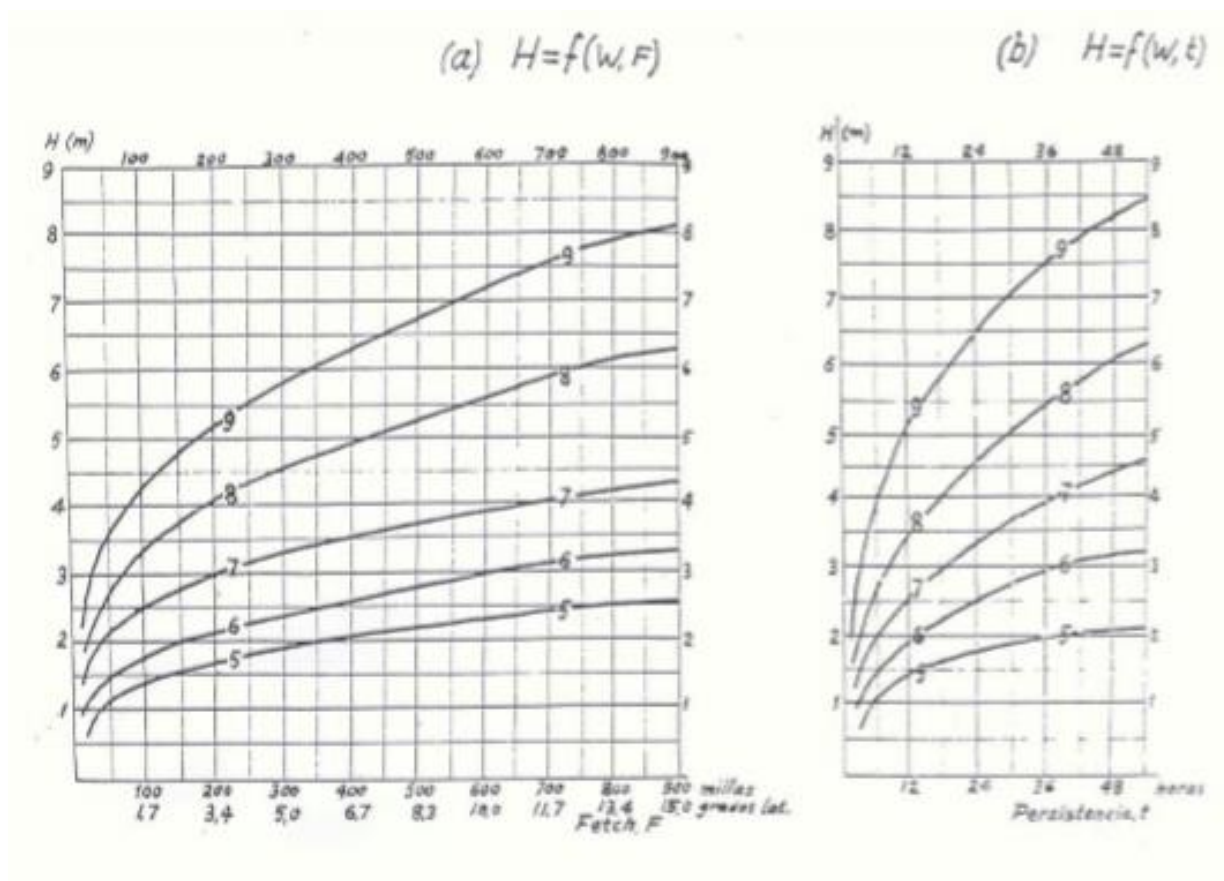


Figura 2.2.3.1 – Exemplo de ábacos relativos ao fetch e á persistencia do vento, respectivamente.

(García, L., 2019) [12]

Cando abandonan a zona xeradora e deixan de ser influídas polo vento, as ondas distribúense segundo un patrón angular e vense sometidas ao amortecemento causado pola fricción das súas partículas internas, dando lugar ao que se coñece como mar de fondo, de perfís máis regulares e pendentes máis suaves, que pode chegar a lugares afastados da zona na que se xerou. No caso de ser afectado por un vento secundario, pode acelerarse o amortecemento ou reactivarse a xeración de ondada en función da dirección deste en relación coa do mar de fondo. De non ser así, pode determinarse a altura do mar de fondo á chegada a un punto de interese tendo en consideración que a súa altura diminúe segundo a expresión:

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{D}{6L}} \quad (2.2.3.2)$$

Onde  $H_0$  corresponde á altura da ondada á saída da zona xeradora e  $D$  á distancia de amortecemento, é dicir, a distancia ata o punto de interese. Desta

maneira pode acharse H, que será a altura da ondada á chegada a dito punto. Analogamente, tendo en conta que o mar de fondo se despraza á velocidade de grupo, pode coñecerse a hora de chegada ó punto de interese tendo en conta cal é a distancia de amortecemento. (García, L., 2019) [\[12\]](#)

O mar de fondo pode afectar ó buque dende lugares distantes, e en ocasións, pode chegar a ser máis perigoso que o mar de vento. Poñendo por exemplo o caso dunha tormenta, esta pode provocar ondas o suficientemente enerxéticas como para supoñer un perigo lonxe do lugar onde se xeraron. Consecuentemente, débese considerar que aínda que o buque navega habitualmente condicionado polo mar de vento, non é o único factor referente á ondada que pode afectarlle.

## **2.3 Situacións anómalas**

Dentro deste traballo, considéranse situacións anómalas aqueles fenómenos que se producen cunha frecuencia relativamente reducida ou que presentan unhas características que os distinguen facilmente da mecánica xeral tratada anteriormente para o mal tempo. A importancia dos dous fenómenos que se describen neste apartado reside na capacidade destrutiva que poden chegar a ter.

### **2.3.1 Ondas anormais**

No interior dunha tormenta, a intensidade do vento pode ser suficiente para que a formación da ondada descrita alcance niveles de desenrolo incrivelmente grandes sobre a altura e a enerxía. Tamén pode suceder que se presente unha forte perturbación da superficie mariña como consecuencia da actividade sísmica. O resultado son ondas altas, que poden chegar aos trinta metros de altura con grandes senos, coñecidas habitualmente como ondas xigantes. Estas non adoitan prolongarse excesivamente no tempo, pero sen embargo, resulta obvio que supoñen un perigo excepcional para a navegación que debe ser evitado. Pódense producir en calquera lugar do mundo, pero tense rexistro das mesmas no Océano Atlántico, Mar do Norte e na rexión antártica.



Outro tipo de ondas xigantes, son as que se coñecen como tsunamis. Estas fórmanse a consecuencia dunha forte perturbación sísmica do fondo mariño, que orixina un desprazamento dun gran volume de auga. Esta perturbación desprázase a gran velocidade cara a costa sen desenrolar unha gran altura. É á súa chegada a augas máis restrinxidas, cando a orografía do terreo forza a onda a adoptar unha altura excepcional. O seu paso pode durar varios minutos. Os buques deberán evitar as augas costeiras en caso de recibir un aviso por un perigo desde tipo, sempre exista un marxe de tempo suficiente. (House, D.J. 2004) [13]

Por último, nalgúns zonas, pódense atopar ondas de altura maior do previsto. De igual maneira que en augas pouco profundas as ondas modifican o seu comportamento, en presenza de certas combinacións de corrente ou ventos, tamén poden presentar alturas maiores e maior cantidade de rompentes.

### **2.3.2 Ciclóns tropicais**

Os ciclóns tropicais son fenómenos meteorolóxicos que se caracterizan pola concentración dunha gran cantidade de enerxía nunha área relativamente pequena. Como o seu nome indica, teñen a súa orixe na zona intertropical. As altas temperaturas que se producen nela en determinadas épocas do ano, segundo o lugar xeográfico, poden inducir un forte quentamento das capas de aire inferiores. O aire quente ascende, acompañado por unha forte evaporación da auga oceánica superficial e favorecido habitualmente por un descenso rápido da temperatura das capas de aire coa altura. A baixa presión relativa inducida polo ascenso do aire, é compensada polo ingreso do aire circundante á estrutura en formación. Posteriormente o aire que ascende, perde temperatura nas capas altas e retorna á superficie a través do centro da perturbación, establecendo unha corrente convectiva.

Debido á excesiva humidade presente, fórmanse nubes que xiran ao redor do eixe central, coñecido como ollo do ciclón tropical, que descargan chuvias torrenciais. O xiro establécese en sentido contrario ás agullas do reloxo no hemisferio norte e en sentido horario no hemisferio sur, debido á aceleración de

Coriolis. Unha vez formados, os ciclóns tenden a seguir unha traxectoria curva cara ao norte e ao este no hemisferio norte e cara ao sur e ao este no hemisferio sur.

Algúns factores que delatan a presenza do acercamento dun ciclón tropical son o alongamento das ondas, a caída progresiva da presión barométrica, o aumento da intensidade do vento en refachos, a distribución confusa de nubes e o aumento progresivo das precipitacións. A situación do seu centro pódese determinar de maneira eficiente a través do vento con axuda da regra de Buys Ballot, segundo a cal, este se situará á esquerda, no hemisferio norte, e á dereita, no hemisferio sur dun observador que se atope situado de costas ao vento. (Molina, J., 2019) [14].

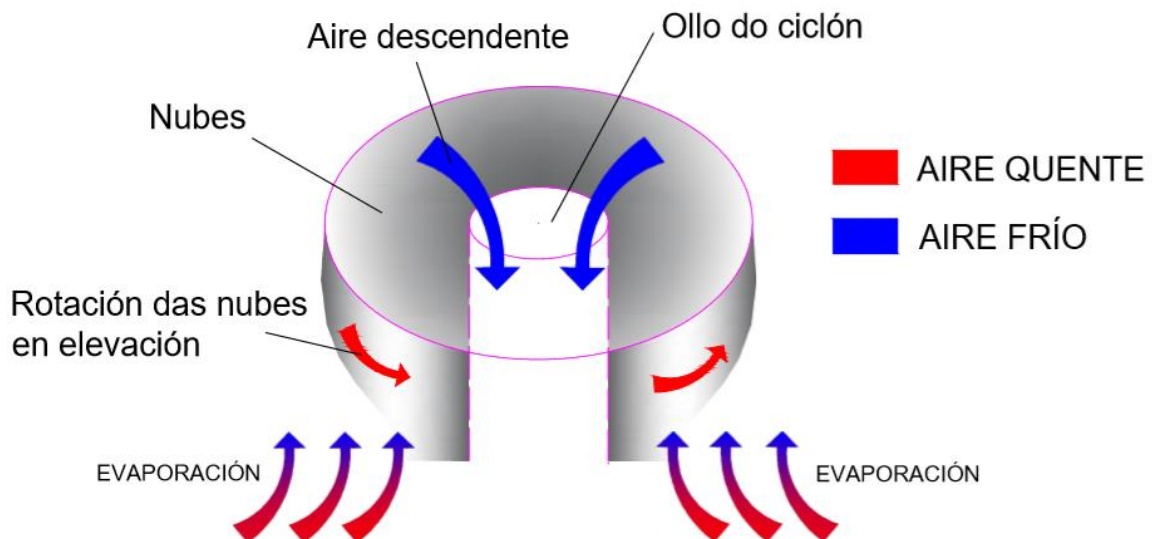


Figura 2.3.2.1 – Diagrama da estrutura da sección vertical do ciclón tropical no hemisferio norte

Os ciclóns son ademais, materia de especial consideración para os servizos e avisos meteorolóxicos que se tratan a continuación, polo cal se disporá dunha axuda adicional para afrontar este fenómeno. A súa exactitude non é absoluta e sofren dunha certa demora no tempo polo que se recomenda contrastar os avisos recibidos con observacións de radar e do vento.

Cabe destacar aquí a regra 1-2-3, unha medida para ter en conta os erros aos que pode estar sometido o parte meteorolóxico a varios días vista. Esta consiste en engadir aos radios de perigo 100, 200 e 300 millas náuticas para o primeiro, segundo e terceiro día tras a emisión do parte, respectivamente. A área obtida

será a zona de perigo que se debe evitar (NOAA, 2019) [17]. As medidas a adoptar posteriormente, descríbense con máis detalle no apartado de manobra.

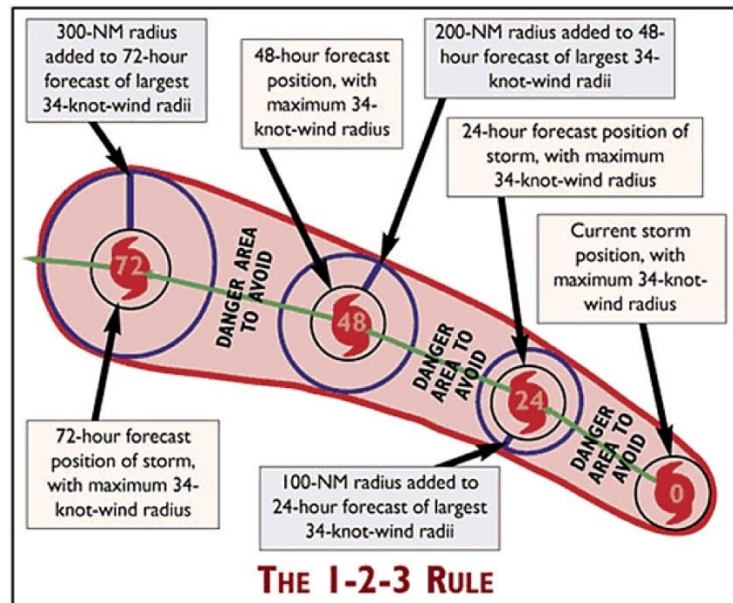


Figura 2.3.2.2 – Regra 1-2-3 que mostra a zona de perigo para os tres días posteriores ao aviso (NOAA, 2019) [17]

## 2.4 Servizos e avisos meteorolóxicos

Debido á importancia de dispoñer dunha previsión meteorolóxica máis ou menos precisa para a navegación e á existencia de avances tecnolóxicos que facilitan a difusión de información, o Convenio Internacional para a Seguridade da Vida Humana no Mar (Safety of Life at Sea – SOLAS) [18] refírese aos servizos e avisos meteorolóxicos na regra 5 do capítulo V. Segundo esta, os gobernos contratantes, comprométense á emisión de información meteorolóxica da súa zona de responsabilidade, ao menos dúas veces ao día, de maneira gratuíta e facendo especial fincapé en situacións meteorolóxicas adversas. A coordinación de ditas áreas de responsabilidade lévase a cabo mediante a determinación de áreas xeográficas marítimas coñecidas como METAREAs, identificadas con números romanos. Os buques xogan tamén un papel importante na elaboración desta previsión, xa que aínda que adoita levarse a cabo a través de modelos matemáticos, requírese a observación tomada dende buques en navegación para a súa confección.

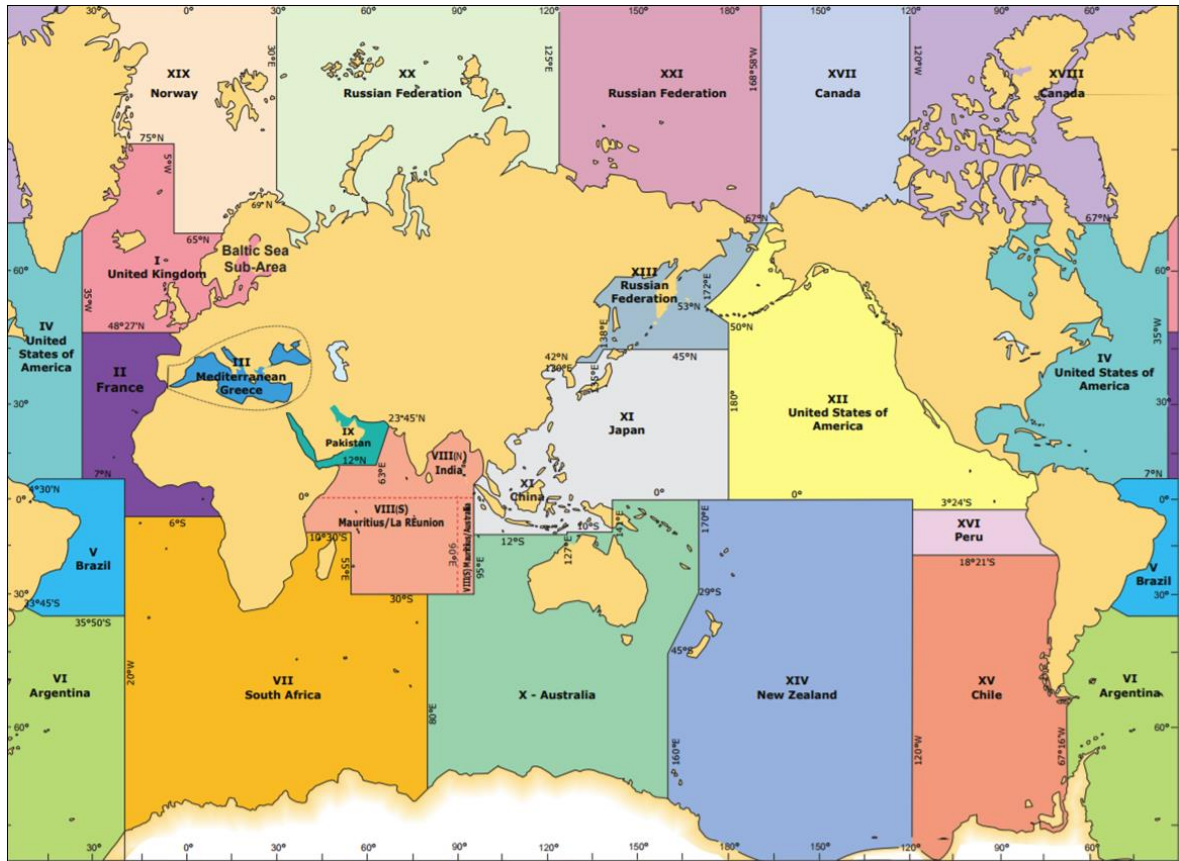


Figura 2.4.1 – Zonas METAREA para a coordinación de radioavisos e prognósticos meteorolóxicos (OHI, 2009) [19]

A disposición desta información meteorolóxica permite adaptar a derrota ás condicións de navegación máis eficientes. Esta pode distribuírse en formato de texto ou de maneira gráfica, permitindo esta última levar a cabo as aproximacións referentes aos ábacos. Os boletíns meteorolóxicos transmitidos a través dun texto seguen un formato determinado para a distribución da información, que pode atoparse no “Manual conxunto OMI/OHI/OMM relativo á información sobre seguridade marítima (ISM)” [19]. Poden empregar abreviaturas normalizadas pola OMM e no caso de ser internacionais o idioma vehicular será o inglés. Ademais dos boletíns transmitidos de maneira regular, transmítense radioavisos en caso de ventos duros ou moi duros de forza 8 ou 9 na escala Beaufort, temporais superiores a forza 10, ciclóns tropicais e opcionalmente para ventos de forza 7. Calquera outra situación de posible risco como restrición na visibilidade ou mala mar tamén pode ser motivo de transmisión dun radioaviso meteorolóxico. Cabe destacar tamén que se alenta a todos os buques que se atopen con ventos

superiores a 50 nós, equivalente a forza 10 na escala Beaufort, a informar sobre dita situación a buques situados nas súas proximidades e ás estacións costeiras.

Os prognósticos recibidos a bordo deben incluír a súa área e período de validez xunto cunha descrición e evolución prevista, durante un período maior a 24 horas, dos seguintes puntos:

- Velocidade ou forza do vento e dirección.
- Estado do mar, coa altura significativa da onda, mar de vento e mar de fondo.
- Visibilidade.
- Acumulación de xeo, se procede.
- Outros fenómenos meteorolóxicos significativos como precipitacións ou ondas anormais.
- Situación e extensión da perturbación no caso de radioavisos por ventos, temporais e ciclóns tropicais.

Principalmente, para a difusión da totalidade do citado anteriormente, empréganse os seguintes sistemas:

- **NAVTEX:** Sistema para a transmisión de información sobre seguridade marítima (Maritime Security Information - MSI) mediante radiotelegrafía de impresión directa en banda estreita dentro da zona costeira na frecuencia internacional 518 kHz no idioma inglés, contemplado na regra IV/7.1.4 do convenio SOLAS.
- **SafetyNET:** Sistema para a transmisión de información MSI mediante o sistema Inmarsat no idioma inglés, de funcionamento global exceptuando a zona marítima A4, sen cobertura de satélites Inmarsat nin cobertura radiotelefónica dunha estación costeira, contemplado na regra IV/7.1.5 do convenio SOLAS.
- **IDBE en ondas decamétricas:** Sistema para a transmisión de información MSI mediante radiotelegrafía de impresión directa en banda estreita, contemplado na regra IV/7.1.5 do convenio SOLAS.

### 3. MOVEMENTO DO BUQUE ENTRE ONDAS

A análise do comportamento do buque entre ondas permite afondar nos esforzos aos que se ve sometido, xa que estes son causados ou agravados directamente pola resposta da estrutura aos efectos da ondada. Os movementos de balance, cabeceo e arfada correspóndense co modelo do movemento harmónico simple, polo cal unha masa desprazada da súa posición de repouso por unha forza externa, experimenta unha forza proporcional recuperadora que tende a devolvela a súa posición inicial. Sen embargo, por efecto da inercia, esta supera a posición de repouso e alcanza a seguinte posición extrema, na que experimenta outra forza recuperadora de sentido oposto. (USNA, 2017) [22]

Na situación real, esta oscilación mantense no tempo ata que os efectos do amortecemento disipan a enerxía inicial e se recupera a posición orixinal. O amortecemento é un efecto polo cal, parte da enerxía do movemento, se perde fundamentalmente a través da xeración de ondas. Concretamente no caso do balance, o amortecemento depende tamén da fricción do casco, xeración de turbulencias e acción dos apéndices, se procede. (Lloyd, A.,1998) [29]

A lonxitude da translación realizada dunha posición extrema á outra denomínase amplitude e o tempo tomado en oscilar dunha posición extrema á outra e volver á inicial denomínase período. Ademais, o buque está constantemente sometido á acción de forzas externas e á oscilación forzada que lle imprimen as ondas. Esta última tende a imprimir un movemento de igual frecuencia ao das ondas e interactúa coa oscilación natural do buque para dar lugar á oscilación real.

En xeral, o buque entre ondas en relación ao movemento, debe adoptar unha velocidade adecuada e evitar os movementos de grande amplitude e período reducido, que resultan perigosos dende varios puntos de vista. Concretamente, a relación que se establece entre os movementos do buque e das ondas, pode derivar en efectos adversos adicionais que haberá que ter en conta. Así, aínda que o aumento da resistencia ó avance provoca unha redución de velocidade para determinado réxime de traballo da máquina, pode ser precisa unha redución adicional de dito réxime de traballo e mesmo unha alteración do rumbo. Ao



mesmo tempo, deberá compaxinarse esta adecuación dende o punto de vista dos esforzos e estabilidade á adecuación dende o punto de vista da manobra, polo cal se deberá manter a velocidade mínima de goberno e contrarrestar as tendencias do buque a atravesarse ó mar.

Coa fin de modelar os movementos do buque, considéranse limitados a seis grados de liberdade, tres de translación e tres de rotación en torno aos eixes dun sistema fixo no buque. Para a descrición do fundamento teórico, empregáronse como fonte de información as publicacións seguintes que figuran na bibliografía: [8], [21], [22], [23], [24] e [28]. A continuación afóndase nos máis relevantes:

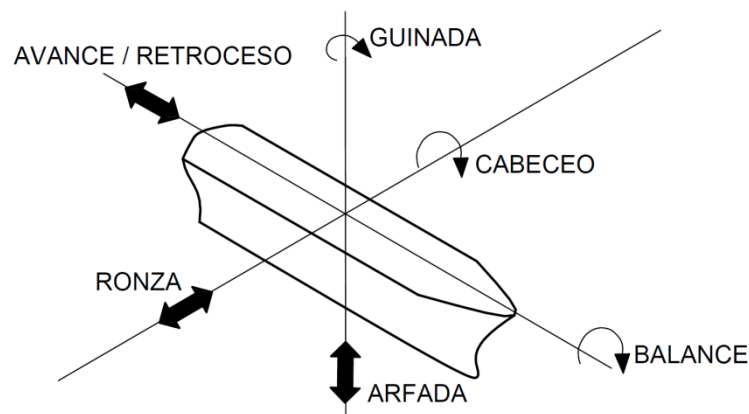


Figura 3.1 – Denominación dos movementos nos seis grados de liberdade

### 3.1 Balance

O balance é o movemento oscilante de rotación do buque en torno ao eixe lonxitudinal consecuencia da reacción do buque á actuación das forzas externas sobre a situación de equilibrio inicial. A situación de partida ven dada pola coincidencia na mesma vertical do centro de gravidade (G) e o centro de carena (C). O centro de gravidade é o punto no que se pode considerar que se aplican o conxunto de todos os pesos do buque cunha resultante de dirección e sentido iguais á aceleración da gravidade. Analogamente o centro de carena (C), resulta o punto, centro do volume somerxido, de aplicación da resultante dos empuxes con dirección perpendicular á liña de flotación e sentido vertical cara arriba. É preciso destacar que a acción do oficial do buque recae sobre a situación do centro de

gravidade, xa que esta depende fortemente da estiba de cargas e reparto de pesos.

Cando o buque experimenta unha inclinación debido á acción das forzas externas, o centro de gravidade permanece na liña central de non producirse movemento de pesos, mentres que o centro de carena, como consecuencia do cambio do volume somerxido, se despraza á banda que se somerxe. Desta maneira, establécese un par de forzas de mesma dirección e sentidos opostos, aplicadas sobre eixes paralelos, que se coñece como par adrizante e que tende a devolver o buque á súa posición de adrizado.

Tal e como establece o modelo do movemento harmónico simple, a posición de adrizado supérase e alcánzase a outra banda cunha nova escora, onde a acción da forza recuperadora comezaría o novo ciclo. Isto alongaríase indefinidamente de non ser polo efecto do amortecemento, que tende a disipar a enerxía do movemento, diminuindo a amplitude das escoras progresivamente. O tempo empregado en oscilar da escora máxima a unha banda á banda contraria e retornar á inicial denomínase período de balance (T). Pode obterse unha aproximación razoable do período de balance natural a través da fórmula empírica seguinte, onde m representa a manga do buque e  $GM_T$  a altura metacéntrica transversal, tratada no seguinte apartado:

$$T = \frac{0,79697 m}{\sqrt{GM_T}} [s] \quad (3.1.1)$$

### 3.1.1 Estabilidade estática transversal

Para poder comprender con maior profundidade a relevancia do movemento de balance, é preciso facer mención á estabilidade do buque, xa que existe unha relación directa entre ambos conceptos. Defínese como estabilidade a capacidade do buque para retornar á súa posición de equilibrio, é dicir, para volver a aliar o centro de gravidade e o centro de carena na mesma vertical, despois de ser perturbados por forzas externas. Esta capacidade vén determinada polo valor do par de forzas adrizante, coñecido como momento adrizante ( $\Delta GZ$ ), que se pode determinar a través da seguinte expresión, na que GZ corresponde ao brazo



adrizante,  $GM_T$  á altura metacéntrica transversal,  $\theta$  ao ángulo de inclinación e  $\Delta$  ao desprazamento do buque.

$$\Delta GZ = \Delta GM_T \text{sen}\theta \quad (3.1.1.1)$$

O brazo adrizante corresponde á mínima distancia entre G e o eixe de actuación do empuxe sobre o centro de carena. Dado que o seu valor depende da escora, a súa variación para un desprazamento determinado pode representarse en función desta nunha gráfica coñecida como curva de estabilidade estática transversal, coma a da figura 3.1.1.3. Débese engadir que a expresión 3.1.1.1 é válida unicamente para pequenos ángulos de inclinación menores de  $10^\circ$ . O conxunto de situacións para o que isto se verifica, coñécese como estabilidade inicial e correspóndese co intervalo da curva que varía proporcionalmente co seno da inclinación, polo que se aproxima moito a unha recta na súa representación. Isto pode apreciarse entre a orixe de coordenadas e a situación (I) da figura 3.1.1.3.

O motivo da limitación da validez da expresión do momento adrizante depende do punto que se coñece como metacentro transversal ( $M_T$ ). Este último defínese como o punto constante de intersección entre a liña central do buque e os eixes de actuación dos empuxes sobre o centro de carena para pequenos ángulos de inclinación. Para ángulos maiores de  $10^\circ$ , faise patente un afastamento do metacentro fóra da liña central do buque como consecuencia da variación irregular do volume somerxido que provocan as formas do casco, polo que, para grandes inclinacións ( $\theta > 10^\circ$ ) a definición anterior corresponde ao renomeado como falso metacentro ( $M'$ ) e o valor de GZ debe calcularse de maneira máis precisa mediante curvas de brazos KN. (George, W. ,1990) [21]

Coñecida a definición de metacentro, pode definirse a altura metacéntrica transversal ( $GM_T$ ), distancia entre o centro de gravidade do buque e o metacentro transversal. Este parámetro é equivalente á estabilidade do buque, é dicir, un buque será máis estable canto maior sexa a súa altura metacéntrica. Depende fundamentalmente da manga e o francobordo do buque, véndose reforzada co aumento destes valores. O aumento de francobordo retrasa a entrada da cuberta

na auga, situación na cal se presenta un punto de inflexión na curva de brazos adrizantes [Véxase figura 3.1.1.3 (II)], a partir dela, redúcese a manga de flotación. A manga, polo outro lado, condiciona directamente os momentos de inercia que determinan a situación do metacentro. Se se relaciona a altura metacéntrica coa expresión do período de balance, pódese deducir que, canto maior sexa o valor de  $GM_T$ , é dicir, canto máis estable sexa o buque, menor será o período de balance e máis rápido se efectuará o movemento, polo que os esforzos serán maiores, a estadía a bordo máis dura e máis probable resultará o risco dun corremento da carga. Por outro lado, a menor  $GM_T$ , maior será o período de balance e o movemento será máis lento.

Cabe destacar que o par de forzas adrizante só se manifesta para un  $GM_T > 0$ , é dicir, para o buque con estabilidade positiva ou equilibrio estable [Véxase figura 3.1.1.2 (a)], que será o caso considerado ao longo de todo o estudo do comportamento do buque, sen embargo, é preciso coñecer os casos de estabilidade nula e estabilidade negativa para pequenos ángulos de inclinación. No caso da estabilidade nula ou equilibrio indiferente ( $GM_T = 0$ ) o centro de gravidade é coincidente co metacentro transversal, de maneira que cando o buque experimenta unha inclinación, non tende a retornar á posición de adrizado, senón que mantén a escora impresa [Véxase figura 3.1.1.2 (b)]. A estabilidade negativa ou equilibrio inestable ( $GM_T < 0$ ) dáse na situación na que o centro de gravidade se sitúa por enriba do metacentro transversal, polo que se o buque experimenta unha inclinación, non só non retornará á posición de adrizado senón que dará lugar á aparición dun par de forzas escorante que tende a aumentar a inclinación [Véxase figura 3.1.1.2 (c)].

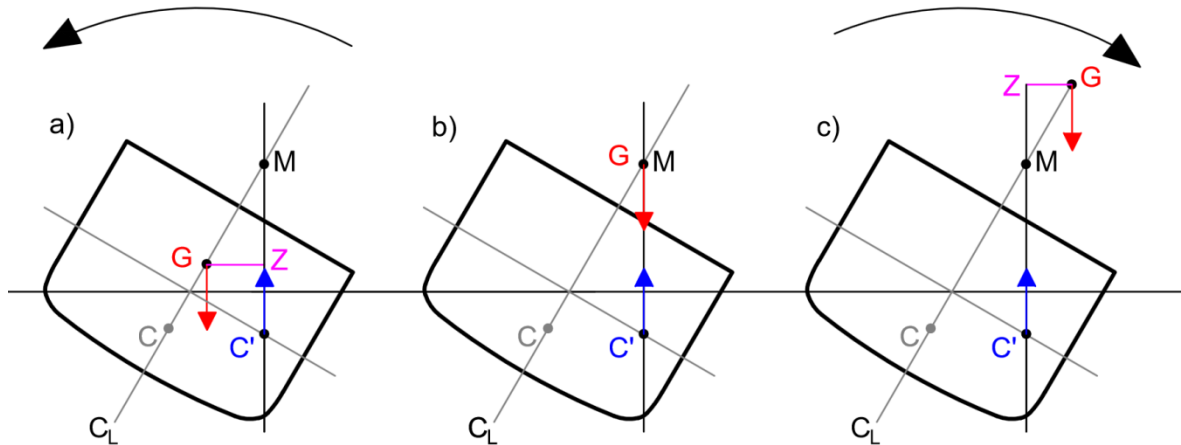


Figura 3.1.1.2 – Comportamento do par de forzas con estabilidade positiva (a), nula (b) e negativa (c).

Afondando na análise da curva de estabilidade estática transversal, empregando os falsos metacentros como referencia, a situación (II) da figura 3.1.1.3, corresponde a un punto de inflexión da curva, inclinación para a cal o buque somerxe a cuberta, coñecida como ángulo de inundación. A partir desta situación o brazo adrizante continúa aumentando, mesmo cando a distancia entre  $G$  e o falso metacentro se reduce progresivamente, ata a situación (III) na cal, o brazo adrizante é máximo. A partir de aquí, faise patente a redución da distancia de  $G$  ao falso metacentro e o brazo adrizante diminúe ata a situación (IV), onde se anula. A inclinación para o que isto ocorre coñécese como ángulo crítico ou ángulo límite de estabilidade, o buque atópase en equilibrio indiferente. Se o buque continúa escorando, alcanza a posición (V), onde entra en equilibrio inestable (Bonilla, A., 1972) [28]. Estas situacións de equilibrio para grandes inclinacións, non deben identificarse cos casos de equilibrio estudados para a estabilidade inicial.

Mesmo se o buque conta cunha estabilidade positiva á saída do porto, esta situación pode alterarse, tal e como se trata máis adiante, polo que, facendo unha valoración de todo o anterior, resulta adecuado atopar un equilibrio entre o mantemento dunha reserva de estabilidade razoable e un período de balance o suficientemente extenso que evite esforzos innecesarios. Na resolución MSC.267(85) [4], pola cal se adopta o Código Internacional de Estabilidade sen

Avaría (2008) establécense os criterios mínimos de estabilidade OMI para a estabilidade estática transversal.

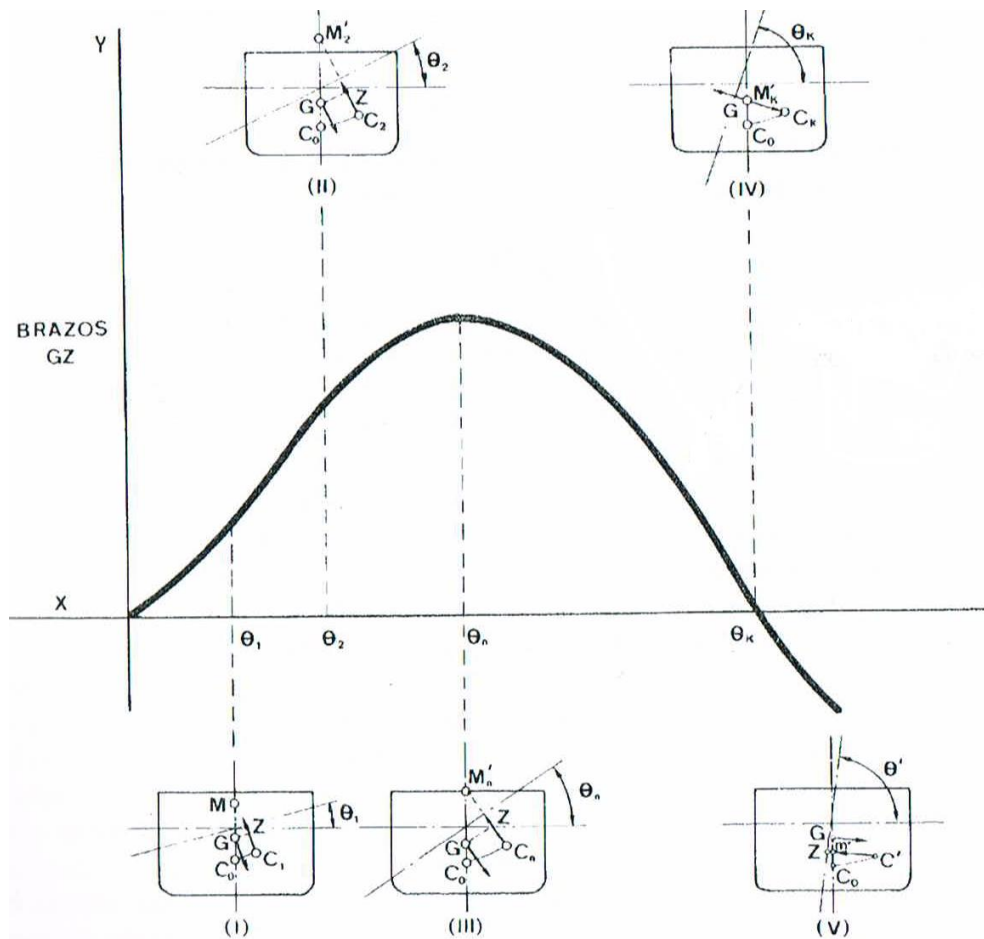


Figura 3.1.1.3 – Curva de estabilidade estática transversal (Bonilla, A. , 1972) [28]

### 3.1.2 Estabilidade dinámica transversal

A estabilidade estática transversal realiza un estudo do equilibrio do buque en relación ás forzas ás que se ve sometido en augas tranquilas, sen embargo, o comportamento do buque en augas axitadas non difire en gran medida do comportamento en augas tranquilas, polo que a curva de estabilidade estática transversal se pode empregar para dar explicación a moitos dos fenómenos que se describen máis adiante. Máis concretamente, a estabilidade en augas axitadas ou estabilidade dinámica defínese como o traballo necesario para provocar unha determinada inclinación no buque, partindo da súa posición de equilibrio, tendo en conta que o traballo realizado pola forza externa durante o xiro é igual e de

sentido oposto a o traballo realizado polo momento resistente. A súa expresión é a seguinte, e obtense mediante o cálculo da área baixo a curva de brazos adrizantes:

$$T = \int_0^{\theta} \Delta GZ d\theta \quad (3.1.2.1)$$

Cando o buque se ve sometido a un vento de través, este imprime unha forza sobre a obra morta nun punto coñecido como centro de gravidade da superficie exposta ó vento ( $W$ ). A consecuencia do efecto de abatemento, xérase unha forza de igual dirección e sentido oposto aplicada sobre o centro de resistencia lateral ( $R_L$ ), situado aproximadamente no centro do volume somerxido. Isto dá lugar a un par de forzas escorante, que provoca unha inclinación a sotavento [Véxase figura 3.1.2.3]. O momento do par será igual á forza producida polo vento en relación ó seu brazo de actuación, distancia entre o centro de aplicación da forza e o centro de resistencia lateral. A súa expresión é a seguinte, sendo  $F_w$  a forza do vento e  $z$  o seu brazo de actuación:

$$\text{Par escorante} = \text{Par}(\theta) = F_w * z * \cos\theta \quad (3.1.2.2)$$

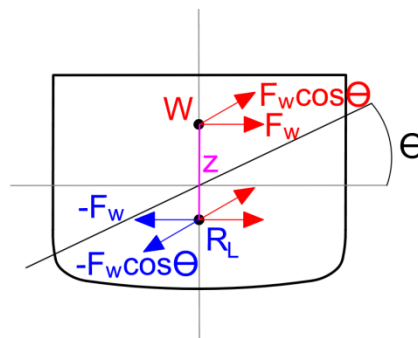


Figura 3.1.2.3 – Par de forzas escorante producido polo vento

Os brazos escorantes poden representarse nunha gráfica empregando a mesma escala xunto coa curva de brazos adrizantes. Reparando na disposición da figura 3.1.2.5, o buque vese sometido a un momento escorante como consecuencia do vento, expresado como:

$$B_e = 0,0195 * V_w^2 * z * \cos^2\theta \text{ [m]} \quad (3.1.2.4)$$

Na expresión,  $V_w$  é a velocidade do vento en nós. Neste intre, o momento adrizante é cero, por atoparse o buque na súa situación de equilibrio. Cando o buque comeza a inclinarse a sotavento, o par escorante diminúe lentamente mentres que o par adrizante aumenta, ata que ambos se igualan. Esta situación coñécese como punto de equilibrio estático (C). Sen embargo, o buque mantén enerxía cinética que o fai continuar xirando ata alcanzar a inclinación  $\theta_2$ , na que se igualan os traballos adrizante (área raiada OAC) e escorante (área raiada CDE), coñecida como inclinación práctica, real ou dinámica. Supoñendo a condición de vento máis desfavorable, polo tanto, pódese coñecer a amplitude máxima do balance para unha condición determinada. Na resolución MSC.267(85) [4], pola cal se adopta o Código Internacional de Estabilidade sen Avaría (2008) establécense os criterios mínimos de estabilidade OMI para a estabilidade dinámica transversal.

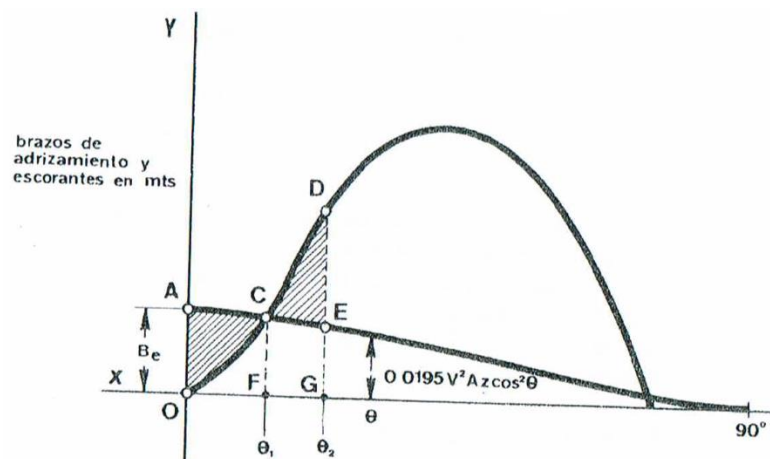


Figura 3.1.2.5 – Curva de momentos adrizantes e momentos escorantes (Bonilla, A. , 1972) [28]

### 3.1.3 Comportamento xeral do buque

Na navegación real, o buque non navega co seu período de balance natural, senón que se ve sometido por constantes forzas externas que modifican o seu balance en oscilación libre. O efecto das ondas regulares sobre o buque, tende a provocar o que se coñece como oscilación forzada, é dicir, que este deixe de oscilar no seu período natural e comece a adaptarse ao período de encontro da ondada ata entrar en resonancia. Tendo en conta que na práctica non se adoitan

presentar ondas deste tipo, o efecto das ondas irregulares pode en maior ou menor medida modificar o período natural de balance do buque.

Supoñendo un buque sometido ao paso de ondas de través, este experimentará un cambio alternativo na superficie de flotación. Á chegada da crista a una das bandas, esta provocará un aumento do volume somerxido nesa banda e como consecuencia, a tendencia do buque a escorar aproximando a súa liña central ( $C_L$ ) á perpendicular á pendente da onda, é dicir, a escorar cara o seno da onda. Esta tendencia acentúase para buques de  $GM_T$  grande, sendo proporcionalmente maior canto máis se aproximen o período natural de balance do buque e o período de encontro da onda, podendo chegar a amplitudes perigosas. Neste caso o buque tende a manterse vertical no seno e na crista da onda. Sen embargo, no caso de buques con  $GM_T$  pequeno, debido á lentitude do movemento de reacción, o balance presenta unha amplitude reducida, escorando levemente cara a crista, ou no caso de que a diferenza sexa notable, mantendo a cuberta máis ou menos horizontal en todo momento, independentemente do movemento das ondas. A pesar de que esta última situación resulta positiva dende o punto de vista dos esforzos debido a ausencia de movementos bruscos, pode dar lugar ao embarque de gran cantidade de auga sobre a cuberta con mar de través

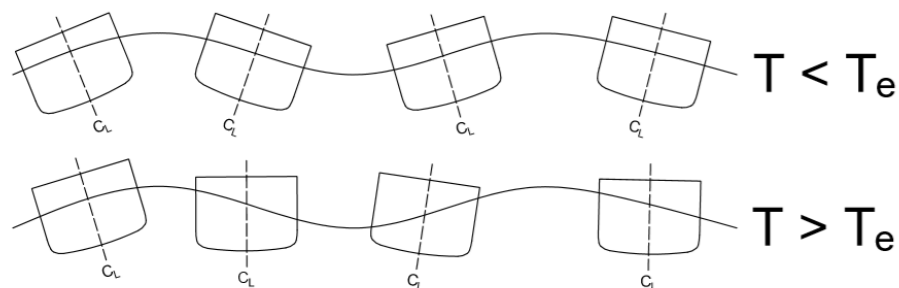


Figura 3.1.3.1 – Comportamento xeral do balance segundo a relación de períodos

### 3.1.4 Balance sincrónico

O sincronismo é unha situación altamente prexudicial pero improbable que se produce cando o dobre período de balance do buque é igual ou moi próximo ao período de encontro das ondas. O paso das cristas das ondas, se estas son regulares e sincronizadas co balance, provoca un aumento sucesivo da amplitude

do balance e movementos violentos que poden chegar a provocar que o buque quede quilla ó sol. Para evitalo, basta con alterar o rumbo ou velocidade para os cales se aprecia dito efecto de forma que se altere a relación entre períodos, cesando desta maneira o aporte enerxético que provoca a resonancia.

Os buques máis grandes e de maior manga, adoitan ter períodos de balance superiores aos das ondas, polo que son menos vulnerables a entrar nunha situación de sincronismo, sen embargo, débese ter en conta que cando se manobra afastando o rumbo da dirección da ondada, o período de encontro aumenta e prodúcense balances máis violentos. Polo contrario, os buques de períodos de balance máis pequenos, adquiren unha situación máis vantaxosa actuando desta maneira, xa que ao afastar o seu rumbo da dirección do mar, o período de encontro aumenta e distánciase do período natural de balance, que adoita aproximarse ao período normal das ondas do mar. A manobra máis adecuada en cada caso dependerá disto e doutros puntos, xa que o estado de carga e outros factores relacionados coa navegabilidade do buque tamén se deben ter en conta. Desta maneira, incluso a manobra máis axeitada para un mesmo buque pode variar dependendo das súas condicións de carga, estabilidade e capacidade de manobra.

### **3.1.5 Diminución da estabilidade na navegación sobre a crista da onda**

Durante o movemento do buque entre as ondas, este situarase sobre a crista da onda cada certo período de tempo con un certo rumbo e velocidade, dependendo dos cales, poderá verse sometido a efectos máis ou menos perigosos segundo as condicións que se dean no momento. A continuación expónse a influencia desta situación sobre o movemento de balance, aínda que tamén afecta a outros movementos do buque que se tratan máis adiante.

A maioría dos buques modernos, contan cunha proa de finos relativamente acusados e ensanchadas na súa parte superior, que serve como protección contra o embarque de auga ó mesmo tempo que dispón unha superficie axeitada para a distribución da maquinaria de manobra e a estiba da carga sobre a cuberta. De somerxerse a parte superior dos finos de proa, polo tanto, prodúcese



un aumento da superficie de flotación, mentres que de aumentar o calado na sección media, non se aprecia un aumento sensible. Isto débese a que o casco presenta costados paralelos no centro da súa eslora. Así, de aumentar o calado nas cabezas, increméntase a superficie de flotación total, sendo máis significativo o cambio canto máis se aproxime a lonxitude da onda á eslora do buque. Na figura seguinte, ilústrase o cambio de xeometría da flotación sobre o casco (amarelo) con respecto a flotación en augas tranquilas (branco), asociándoa co plano de flotación co seno da onda na sección media (azul) e en augas tranquilas (vermello). (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

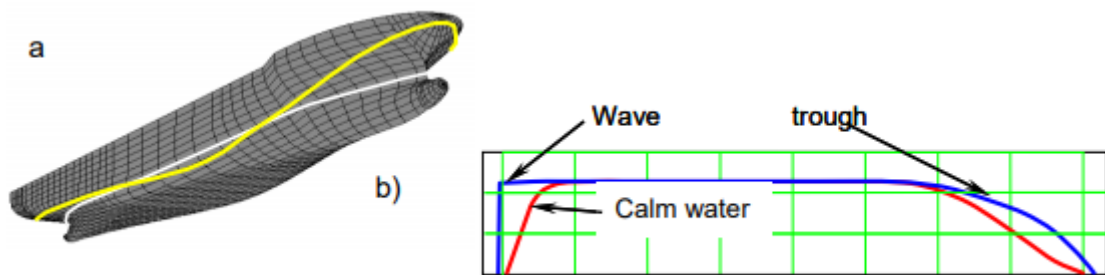


Figura 3.1.5.1 – Xeometría do casco (a) e plano de flotación (b) co seno da onda na sección media (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

A situación contraria prodúcese no caso de que o buque navegue coa súa sección media sobre a crista da onda, de maneira que o aumento de calado na sección media, como xa se dixo, non vai producir un aumento significativo da superficie de flotación en relación coas cabezas. Para unha onda de lonxitude similar á eslora do buque, experimentaríase unha redución do calado de proa e popa por atoparse á altura do seno da onda. A superficie de flotación da proa neste caso, vese reducida considerablemente, debido á reducida manga que presenta coa fin de reducir a resistencia ó avance. Mesmo se se trata dunha proa con bulbo, segue presentándose unha sección menor á da sección media. O mesmo acontece na popa, debido aos requirimentos das formas para o funcionamento eficiente da propulsión. De maneira análoga á figura anterior, a continuación ilústrase o cambio da flotación cando se navega sobre a crista da onda e en augas tranquilas (SDC 3 INF.X, 2015) [27].

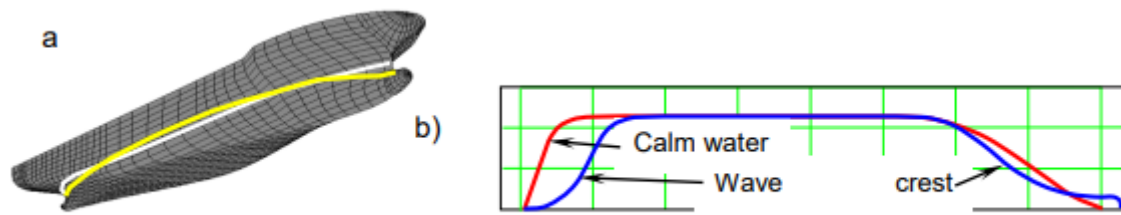


Figura 3.1.5.2 – Xeometría do casco (a) e plano de flotación (b) coa crista da onda na sección media (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

A estabilidade garda unha proporcionalidade co coñecido como momento de inercia, o cal depende da superficie de flotación e fundamentalmente da manga de dita superficie, do que se deduce que o buque verá comprometida a súa estabilidade cando navega sobre a crista da onda. Tal e como se pode apreciar na figura seguinte, o brazo adrizante durante a navegación sobre a crista é menor ao correspondente a augas tranquilas.

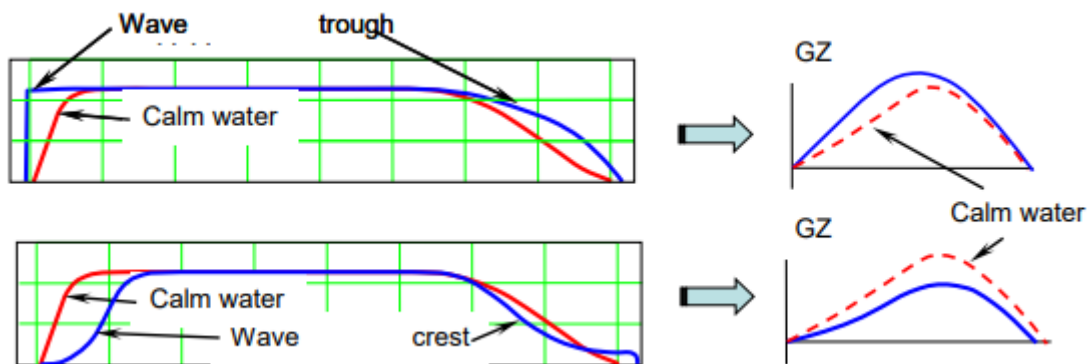


Figura 3.1.5.3 – Relación do plano de flotación navegando sobre o seno da onda (arriba) e sobre a crista (abaixo) coa curva de brazos adrizantes (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

A perda de estabilidade pode chegar a ser crítica para ondas de lonxitude comprendidas entre 0,6 e 2,3 veces a eslora do buque, onde dita perda resulta practicamente proporcional á altura da onda. (OMI, 2007) [2] Especialmente perigosa resulta a situación de navegación con mar de popa na que a velocidade da onda se aproxima á do buque, xa que, neste caso, o buque queda exposto á situación de estabilidade reducida durante un período de tempo maior, no que pode alcanzar grandes amplitudes de balance. Por suposto, unha vez que a crista supera a sección media, recupérase a estabilidade e o buque retornará a súa

posición de adrizado, no caso de non ter escorado por enriba do seu ángulo límite de estabilidade. A descrición deste fenómeno amplíase na súa relación co balance paramétrico.

### 3.1.6 Balance paramétrico

O balance paramétrico é unha situación prexudicial causada polas variacións de estabilidade que experimenta o buque entre o paso da crista e o seno da onda, descritas no apartado anterior, podendo chegar a provocar balances de grande amplitude de maneira súbita. Depende fortemente do grado de sincronización do movemento de cabeceo co movemento de balance, xa que a inclinación inicial adoita ser producida pola entrada da proa na auga cunha certa escora debida ó balance, o que dá lugar a un empuxe desequilibrado entre ambas bandas. Este efecto vese notablemente incrementado en buques de gran manga, codaste aplanado e proa lanzada, xa que experimentan cambios maiores da estabilidade. Polo tanto, buques cun gran coeficiente de bloque como graneleiros ou buques tanque non adoitan experimentar este efecto, mentres que buques portacontenedores e Ro-Ro son os máis vulnerables.

Supoñendo un buque que no momento de adquirir dita inclinación inicial, navega coa súa sección media sobre o seno da onda e as cristas nas cabezas, este experimenta un par de forzas adrizante de grande intensidade como consecuencia de atoparse na situación de maior estabilidade. Ao mesmo tempo o empuxe desequilibrado entra ambas bandas reforza o par. A súa acción é facer que o buque tenda a retornar á posición de adrizado. Posteriormente, ao paso da crista pola sección media, os senos situaranse nas cabezas, producíndose unha redución da altura metacéntrica como consecuencia do cambio da superficie de flotación exposta no apartado anterior. Á súa vez a redución do  $GM_T$  provoca unha redución da resistencia ó balance, o cal, sumado á inercia reforzada do balance producido na situación de maior estabilidade, dá lugar a un balance de maior amplitude da esperada á banda contraria. Iniciando un novo ciclo, o momento adrizante verase reforzado nesa banda, para dar lugar a un balance de maior amplitude na contraria como consecuencia da perda de estabilidade sobre a crista da onda (De Juana, J., 2015) [26].

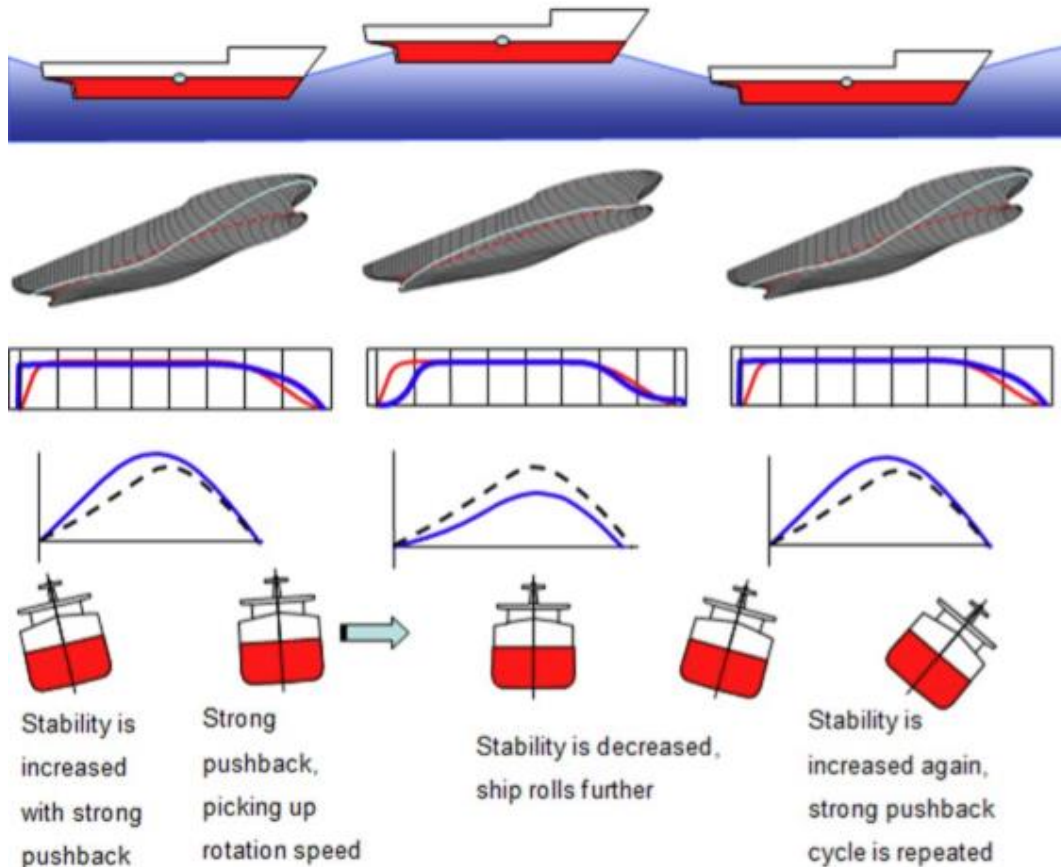


Figura 3.1.6.1 – Evolución do balance paramétrico (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

Para que se presenten as condicións supostas, é preciso que o período de encontro sexa aproximadamente igual ó período de balance do buque ou á súa metade. No primeiro caso, rexístrase un só mínimo na estabilidade sobre o cal se pode producir unha progresiva transición á oscilación forzada e posterior entrada en sincronismo que pode resultar sensible con mar de aleta. Pode darse mesmo para períodos de balance de entre 1,8 e 2,1 veces o período de encontro da onda, xa que o balance irregular favorece a adaptación deste ao período das ondas. (Baltra, G., 2017) [25]. No segundo caso, rexístranse dous valores mínimos na estabilidade en cada período de balance. Navegando de popa ou aleta, isto só acontece no caso de que o período natural de balance sexa o suficientemente grande para igualar o maior período de encontro que se atopa nesta situación, é dicir, pode producirse cando o buque conta cunha reserva de estabilidade pequena. Neste caso tamén se produce unha certa adaptación do período do balance ao da onda.

### 3.1.7 Efecto das superficies libres

Como se pode apreciar nos apartados anteriores, o movemento de balance atópase intimamente relacionado coa estabilidade transversal do buque, o que o converte en obxecto de estudo destacado debido á importancia desta para a seguridade do buque. Se ben dende o punto de vista dos esforzos se considera que a estabilidade reducida é adecuada coa fin de evitar movementos bruscos do buque, manter unha reserva de estabilidade suficiente é fundamental para a seguridade do buque. O obxectivo final de manter unha reserva de estabilidade, é permitir que no caso de producirse unha diminución súbita da mesma, o buque non entre en equilibrio indiferente ou equilibrio inestable, cos perigos que isto implica. Adicionalmente, débese ter en conta que, como se describiu anteriormente, a perda de estabilidade provoca un aumento do período de balance, coa consecuencia que isto ten sobre o comportamento do buque. Unha das causas polas que se pode producir unha redución na estabilidade é o coñecido como efecto de superficies libres.

O efecto de superficies libres é unha consecuencia da liberdade de movemento da superficie de líquidos e certas cargas a granel no buque que provoca unha diminución da altura metacéntrica transversal, comprometendo a estabilidade. Isto pode ocorrer en compartimentos como tanques de lastre, tanques de carga e bodegas que se atopen parcialmente cheos. No seu interior, o movemento do líquido dun lado ao outro do compartimento provoca que o centro de gravidade real do líquido ( $g$ ) se atope máis alto da posición que adoptaría co líquido en repouso, dando lugar a un centro de gravidade virtual ( $g'$ ), e polo tanto, a un centro de gravidade virtual do buque ( $G'$ ). (George, W. ,1990) [21]

A magnitude deste efecto depende fundamentalmente da relación do volume da superficie susceptible de moverse co volume total de desprazamento do buque, sendo notablemente maior canto maior sexa a manga da superficie móbil. Debido á forte influencia da manga no valor final, é común a instalación de separacións lonxitudinais no interior do compartimento para obter unha redución nas superficies libres. Particularmente perigoso resulta o comportamento das cargas a granel que poden licuarse ou producir un corremento, xa que a diferenza dos

líquidos, non recuperan a súa posición orixinal tras o seu desprazamento, o cal dá lugar a unha escora permanente a partir da cal se producen os novos balances. É posible que se produzan novos corrementos, o que deixaría ao buque nunha situación de extremo perigo, podendo chegar a provocar que quede quilla ao sol.

Debido á súa importancia para a estabilidade do buque, é importante reducir as superficies libres ao mínimo con medidas como consumir da menor cantidade de tanques posible ou encher os tanques de lastre ata o seu nivel máximo. De igual modo tamén é necesario asegurar a estanquidade mediante o peche das tapas de escotilla e demais peches estancos de aberturas da cuberta de intemperie, o peche da ventilación, se procede, e un achique eficiente da cuberta para evitar que se formen as superficies libres durante a navegación. Algunhas destas medidas trátanse máis adiante.

### **3.1.8 Sistemas de estabilización do buque**

Os sistemas de estabilización do buque son un elementos adicionais do seu deseño, pensados para reducir as amplitudes do balance. Débese ter en conta que estes métodos, segundo a MSC.1/Circ.1228 [2], non deben empregarse para compensar a escora producida polo vento, a non ser que se dispoña de cálculos que demostren a seguridade do seu emprego nas peores condicións supostas. Isto débese a que un cambio de rumbo con respecto ao vento durante o seu uso podería dar lugar a ángulos de escora perigosos.

Dentro destes elementos atopamos sistemas pasivos e sistemas activos. Os sistemas pasivos non requiren dun aporte de enerxía ou dun control dos mesmos, senón que xeran momentos opostos ao balance por si mesmos. Algúns exemplos son as quillas de balance, os estabilizadores de aleta fixos, os tanques pasivos e os pesos pasivos. Os dous primeiros son apéndices do casco, polo que poden aumentar a resistencia ó avance e son máis propensos aos danos, mentres que os dous seguintes son sistemas internos baseados no movemento dunha masa no sentido oposto ao movemento.

Por outro lado, os sistemas activos son aqueles que empregan un sistema capaz de detectar o movemento de balance, baseado nun xiroscopio, e reduciilo a través dunha actuación, que require aporte de enerxía, sobre apéndices do casco ou desprazamento de masas para xerar o momento preciso. Algúns exemplos son os estabilizadores de aleta activos, os tanques activos e os pesos activos. A actuación destes elementos depende do sistema de control e realízase de forma semellante aos elementos pasivos, pero de maneira voluntaria (Rawson, K.J. e E.C. Tupper, 2002) [30].

### 3.2 Cabeceo

O cabeceo é o movemento oscilante de rotación do buque entorno ao eixe transversal que ten lugar como consecuencia da variación dos empuxes ao longo do casco co paso da onda. O desprazamento do centro de carena neste caso é máis complexo, xa que depende fortemente das formas do casco. O tempo transcorrido na elevación da proa dende a súa posición de repouso na horizontal ata somerxerse por debaixo desta e volver a situación de partida denomínase período de cabeceo.

Así como o balance se encontra fortemente vinculado á estabilidade transversal, o cabeceo é o movemento dependente da estabilidade lonxitudinal. De igual maneira, o metacentro lonxitudinal ( $M_L$ ) sitúase na intersección da liña central co eixe de acción do centro de carena correspondente a unha pequena inclinación. Sen embargo, resulta patente que a situación do metacentro é moito máis elevada nesta situación, e polo tanto, a estabilidade lonxitudinal é moito maior. Por esta razón a estabilidade lonxitudinal non se estuda tan a fondo coma a transversal, pero establece un bo punto de partida para a comprensión do movemento de cabeceo.

Outra diferenza relevante é que o buque adoita navegar adrizado no seu plano transversal, mentres que no plano lonxitudinal, adoita presentar un asento apopante coa fin de mellorar as condicións de navegabilidade do buque. Esta condición afecta ademais á estabilidade transversal, xa que o buque apopado en augas tranquilas sofre un incremento da mesma. Isto débese a que a manga na



popa aumenta rapidamente co calado, mentres que na proa o fai de maneira máis paulatina. Polo tanto, prodúcese un aumento na superficie de flotación a popa e unha redución menor na proa, o que deriva no aumento da altura metacéntrica transversal como consecuencia do aumento da superficie de flotación total.

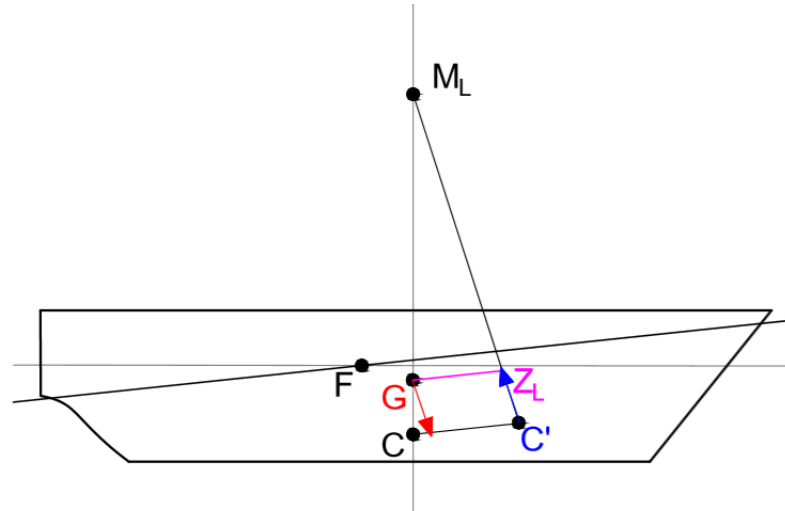


Figura 3.2.1 – Par de forzas na estabilidade lonxitudinal onde F é o centro de flotación

### 3.2.1 Comportamento xeral do buque

Partindo da grande estabilidade lonxitudinal da que dispoñen os buques, o seu período de cabeceo natural é polo xeral menor ao período de encontro coas ondas, adoptando un valor aproximado de entre 1/3 e 2/3 o período de balance. Así, navegando a velocidade moderada, o buque tenderá a seguir o movemento das ondas de maneira tranquila, mantendo o seu eixe lonxitudinal paralelo á pendente da onda. Igualmente, o máximo ángulo de cabeceo non excederá o ángulo da pendente da onda, e en xeral, no seu conxunto serán menores que os ángulos de balance. Sen embargo, no caso de atoparse cun período de encontro menor ao período de cabeceo, como pode acontecer navegando a gran velocidade con mar a proa do través, o buque perde a tendencia de seguir o movemento das ondas. No canto disto, desprázase de maneira tendente ao seu movemento de cabeceo natural, o cal pode provocar un afundimento da proa no mar e a emersión da hélice e o temón coa sección de popa.

En xeral, trátase dun movemento sometido a un gran nivel de amortecemento, debido á xeración de ondas inducidas pola oscilación.



### 3.2.2 Cabeceo sincrónico

De maneira análoga ao sincronismo transversal, cando o período de cabeceo se aproxima ao período de encontro da onda, o movemento de cabeceo farase máis violento, podendo entrar en resonancia. Esta situación deriva nun aumento progresivo da amplitude do cabeceo, podendo provocar embarque de auga pola proa e emersión da hélice. Pódese presentar no caso de aumentar a velocidade con mar de proa e pode evitarse modificando o rumbo ou velocidade de maneira que se altere a igualdade entre períodos.

### 3.2.3 “Slamming”, emersión da hélice e embarque de auga

Cando o buque navega en condicións de ondada, o movemento de cabeceo faise máis patente en proporción á altura das ondas, e os movementos relativos entre este e a superficie da auga fanse máximos nas cabezas. Como consecuencia, as amplitudes do movemento poden ser suficientemente destacadas como para provocar a emersión dunha das cabezas por enriba da superficie da auga. Esta situación preséntase comunmente navegando proa ó mar cunha velocidade elevada, xa que a redución do período de encontro da onda fronte o período de cabeceo do buque, permite que este oscile independentemente do movemento das ondas.

Se a proa queda suspendida ao paso da crista da onda, prodúcese diversos esforzos derivados da falta de soporte da mesma. Ao retornar esta á súa posición orixinal, pódese producir un impacto da quilla sobre a superficie da auga se a velocidade relativa de entrada da proa sobre esta supera certo valor, efecto que se coñece como “slamming”, pantocazo ou machadazo. Dito impacto percíbese a través dunha certa redución na aceleración do buque mentres que dita velocidade relativa non experimenta variación sensible. Os seus efectos son unha forte presión na zona, que induce ó seu desprazamento e a aparición dunha vibración coñecida como “whipping”, consecuencia da tendencia da viga casco a equilibrala. Esta última xera fatiga sobre os materiais, e se a enerxía do impacto é elevada, pódense derivar danos estruturais. A zona máis vulnerable sitúase entre un dez e un vinte e cinco por cento da eslora do buque dende a proa. Tamén se debe puntualizar que ambos efectos poden darse tamén sobre o ensanche da

parte superior de proas de grandes finos, de menor relevancia pero sen necesidade de que se produza unha emersión notable da proa. (Rawson, K.J. e E.C. Tupper, 2002) [30]. A magnitude do efecto global dependerá da sección e flexibilidade do casco nesa zona, da velocidade e ángulos relativos de impacto coa superficie da auga e da capacidade total do casco para amortecer a vibración. (Aláez, J. ,1996) [23].

Outro posible efecto do movemento de cabeceo, é o embarque de auga. Este pode ocorrer en calquera punto da eslora do buque, con maior facilidade naqueles cun menor francobordo. Sen embargo, nas condicións anteriores de navegación a velocidade elevada con mar de proa, prodúcese xeralmente os maiores embarques de auga. En condicións de temporal, demostrouse que en buques de entre 80 e 100m de eslora é posible manter 20 toneladas de auga na cuberta durante 15 segundos por cada onda. Esta pode chegar a bordo como consecuencia de ser proxectada polos movementos do buque ou mesmo como consecuencia de que a proa se somerxa na auga. Mesmo se aparenta que as proas con grandes abanicos que se ensanchan na súa parte superior desprazan grandes cantidades de auga evitando que esta chegue á cuberta, a experimentación de Lloyd, Salsich e Zselezky demostrou que as proas de manga reducida e menor abanico embarcan unha menor cantidade de auga, xa que ao somerxerse no mar, provocan menores perturbacións. Isto constitúe un perigo para a tripulación que se atope en cuberta, para a carga e mesmo para a estrutura do buque, pero fundamentalmente, ten un impacto directo sobre o efecto de superficies libres, polo que debe evitarse a acumulación de auga sobre cuberta. (Lloyd, A., 1998) [29].

Do mesmo xeito que emerxe a proa, tamén pode facelo a popa ao paso da crista da onda. Cando isto ocorre, a hélice elévase sobre a auga en menor ou maior medida, experimentando unha diminución na resistencia á que se vía sometida e disparando as súas revolucións. Ao volver a somerxerse, a hélice experimenta un aumento súbito da resistencia que pode danar o sistema de propulsión do buque. Esta situación provoca un desgaste do sistema de propulsión que se ve

incrementado proporcionalmente coa velocidade de navegación no momento en cuestión. (USNA, 2017) [22]

En resumo, seis impactos fortes da proa durante o slamming ou vinte e cinco emersións da hélice durante cen cabezadas considérase unha situación perigosa. Estes non adoitan producirse de maneira sucesiva, xa que despois de un impacto forte o buque perde velocidade e non experimentará outro ata que a recupere.



Figura 3.2.3.1 – Exemplos de “slamming” e emersión da hélice (varias fontes)

### 3.2.4 “Broaching” ou caída ao través

O broaching, tamén coñecido como caída ao través, é un fenómeno que pode producirse cando o buque navega con mar de popa ou de aleta, consistente nun cambio de rumbo involuntario e adopción dunha grande escora de maneira súbita, de maneira que o buque queda atravesado á dirección das ondas. Este fenómeno ten a súa causa principal no sentido de xiro das partículas que se describiu no modelo da onda trocoidal. Mentres que as partículas se desprazan no sentido de propagación da onda na crista, no seno fano no sentido contrario, polo que o buque se ve sometido a un par de forzas que tenden a atravesalo á dirección das ondas. Esta tendencia será maior canto máis se aproxime a eslora do buque á semilonxitude da onda e maior sexa a súa altura.

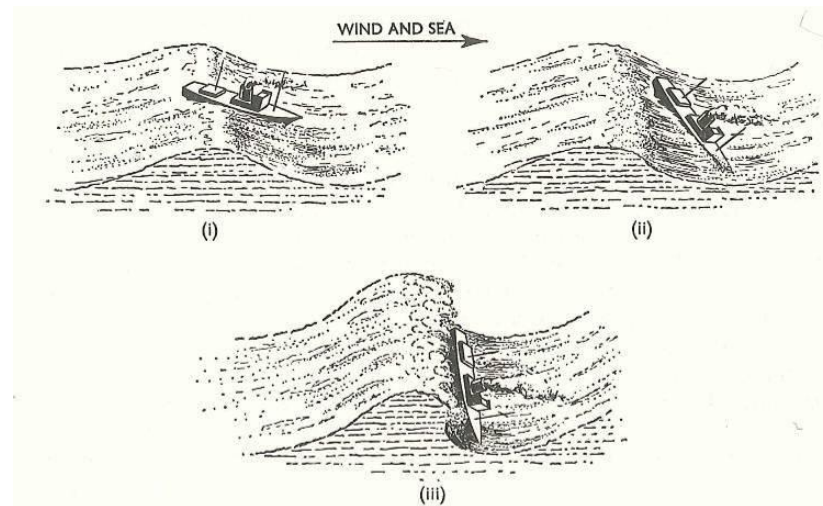


Figura 3.2.4.1 – Representación do “broaching” ou caída ao través (Kosnik, M. , 2016)

Adicionalmente, a perturbación que se produce no fluxo de auga polo temón co mar de popa e as emersións da sistema de goberno que poidan producirse, impiden que o momento evolutivo xerado sexa suficiente para contrarrestar este efecto. Se ademais, a velocidade e lonxitude das ondas se aproxima á velocidade e eslora do buque ou a onda exerce unha forte capacidade de arrastre, este navegará montado sobre a onda durante un relativamente longo período de tempo, o que se coñece como surf-riding. Este fenómeno provoca que o buque sexa desprazado na mesma dirección das ondas, perdendo a maior parte da súa capacidade de manobra e sendo moi susceptible a golpes de mar que poidan inducir unha caída ao través. Sen embargo, particularmente negativo resulta o caso de navegar sobre a crista da onda, xa que, debido á diminución de estabilidade exposta anteriormente, no caso de producirse una caída ao través a amplitude da escora inducida pode ser tal que o buque chegue a quedar coa quilla ao sol. Polo tanto, é recomendable reducir a velocidade do buque por debaixo da de propagación das ondas de maneira que se evite montalas e evitar a navegación sobre a crista da onda. Segundo a OMI, a navegación sobre a crista da onda e a caída ao través poden darse para un ángulo de encontro de entre  $135^\circ$  e  $235^\circ$  e unha velocidade do buque superior á da expresión:

$$(1,8 \sqrt{L}) / \cos (180 - \alpha) \quad (3.2.4.2)$$

Chámaselle  $L$  á eslora do buque e  $\alpha$ , ao ángulo de encontro. Tamén se facilita a seguinte figura, na que a velocidade, o rumbo, ou ambos parámetros deben quedar fóra da zona sombreada, considerada como perigosa (MSC.1/Circ.1228,2007) [2].

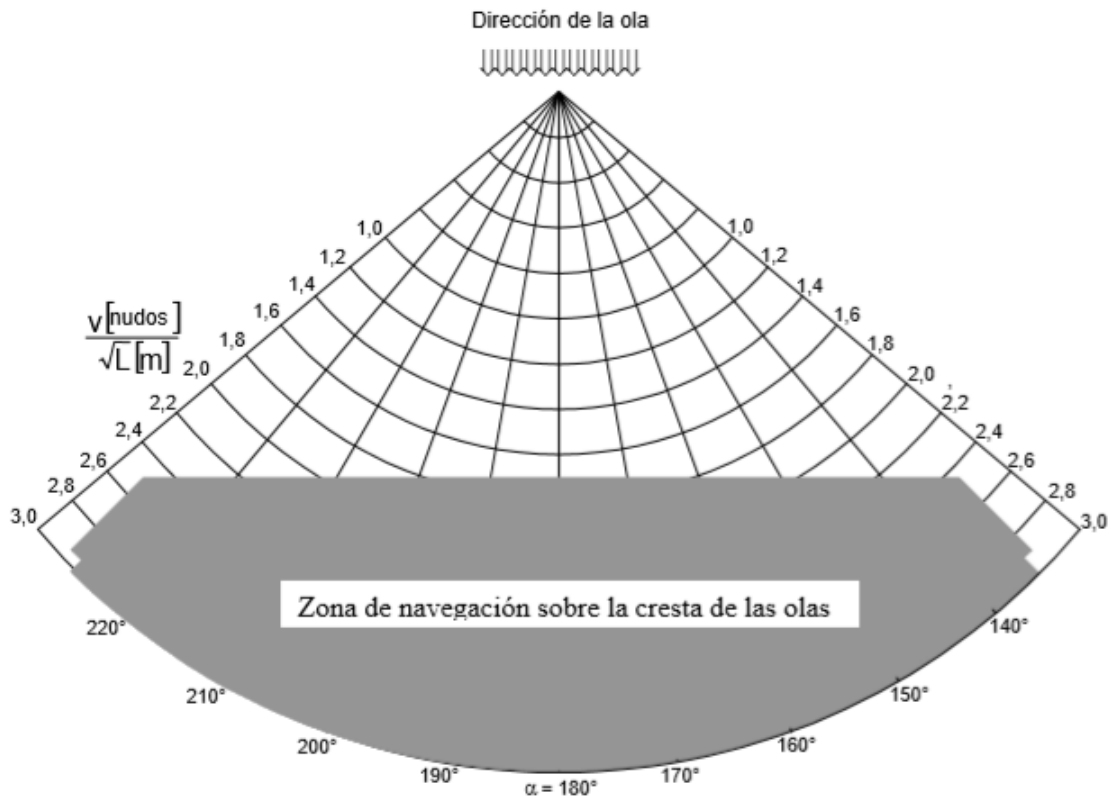


Figura 3.2.4.3 – Diagrama da zona de navegación perigosa sobre a cresta das ondas con mar de popa ou aleta (OMI,2007) [2]

### 3.2.5 Risco polo impacto de ondas altas sucesivas

Cando o buque navega a gran velocidade, máis exactamente, para un período de encontro de aproximadamente o dobre que o período da onda, pode ocorrer que o buque impacte sucesivamente coas ondas podendo inducir efectos de diminución da estabilidade e balance paramétrico ou combinacións de outros efectos adversos. A OMI indica que para unha lonxitude da onda de 0,8 veces a eslora do buque e cunha altura significativa superior a 0,04 veces a eslora do buque, este debe manterse fóra da zona perigosa indicada na figura 3.2.5.1., correspondente a situacións para as cales o período de encontro se atopa entre 1,8 e 3 veces o período da onda. A importancia de evitar esta situación faise máxima no caso de que o buque presente xa un comportamento perigoso, xa que esta pode inducir

sincronismo, perda de estabilidade, balance paramétrico ou combinación de varios efectos adversos. (MSC.1/Circ.1228,2007) [2]

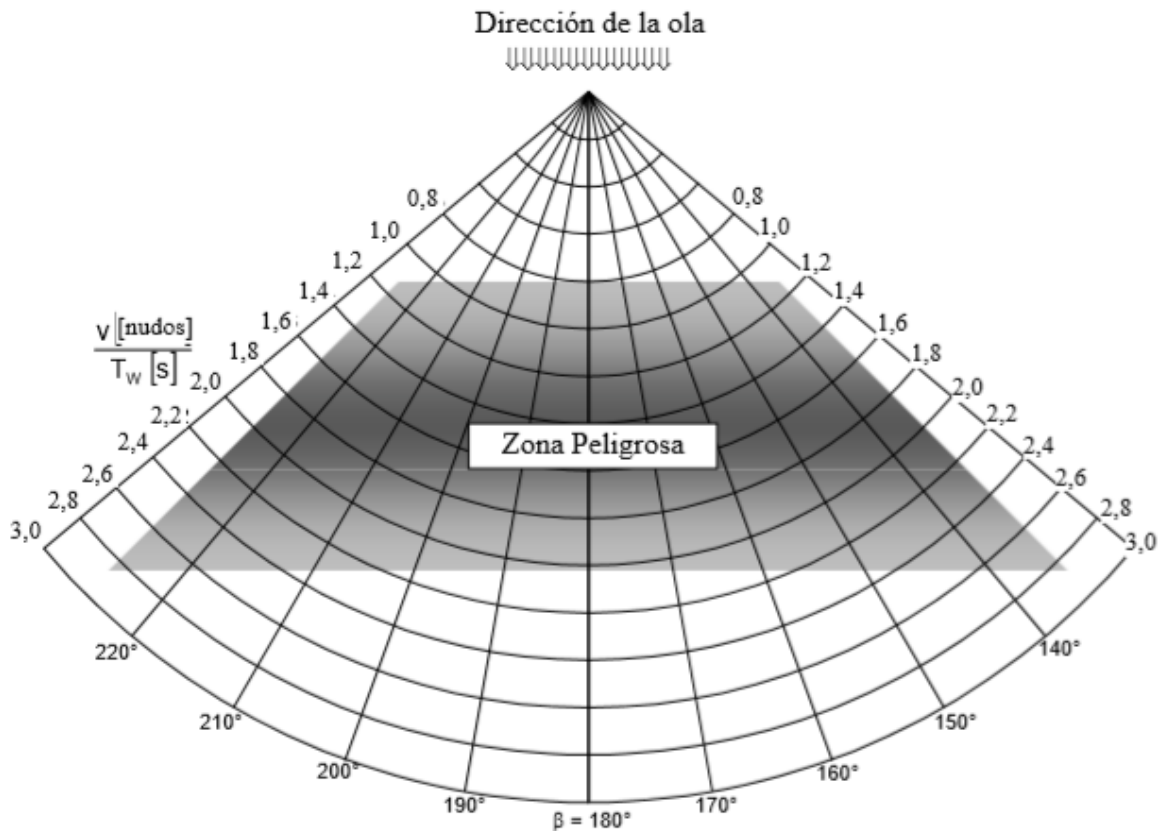


Figura 3.2.5.1 – Diagrama da zona de navegación perigosa polo impacto sucesivo de ondas altas (OMI,2007) [2]

### 3.3 Arfada

O movemento oscilante de translación ao longo do eixe vertical, denomínase arfada. Dito movemento provoca un aumento ou diminución do volume somerxido a través dunha modificación do calado como consecuencia da variación dos empuxes que se producen ao paso da onda. Así, cando o buque navega coa súa sección media sobre a crista da onda, experimenta un exceso de empuxe nesta zona que non se ve compensada pola diminución que se produce nas cabezas [Véxase figura 3.3.1 (b)] Este exceso compénsase entón cunha emersión. Por outro lado, no caso de que o buque navegue coa súa sección media sobre o seno da onda, prodúcese unha perda de empuxe nesta zona que non se equilibra co

aumento que se dá nas cabezas, polo tanto, prodúcese unha inmersión [Véxase figura 3.3.1 (c)]. (Olivella, J., 1998) [8]

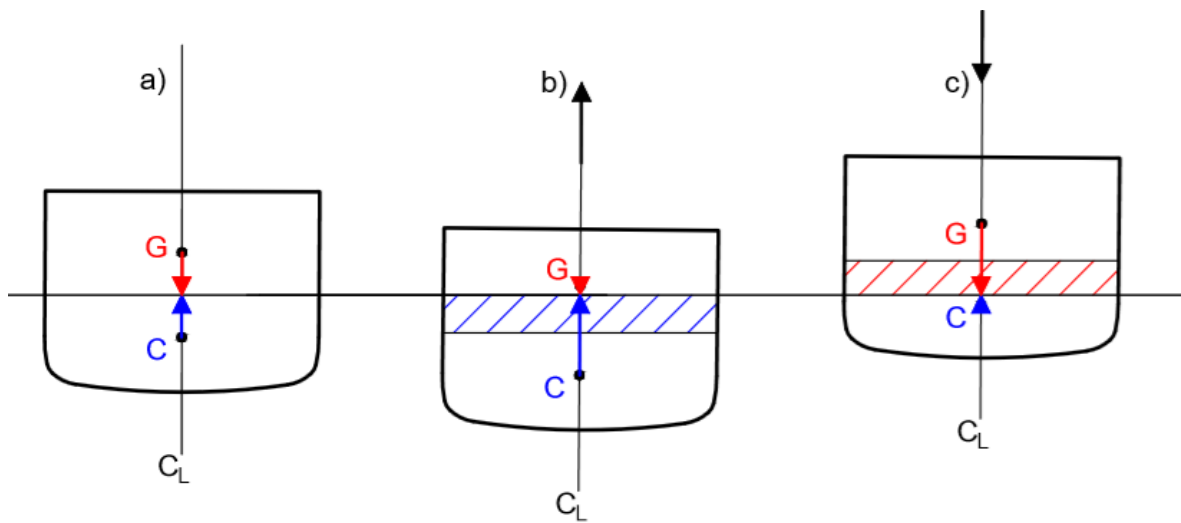


Figura 3.3.1 – Variacións dos empuxes e indución do movemento de arfada

Débase reparar en que, polo tanto, este movemento concorda coa dirección da oscilación propia da onda, polo que, ao seguir á onda no seu movemento o período de arfada concordará co período de encontro das ondas e a amplitude será aproximadamente igual á altura da onda, é dicir, existe sincronismo. Sen embargo, preséntase un forte amortecemento debido á enerxía disipada na xeración de ondas, polo que o sincronismo non debería ser relevante. . Dependendo da superficie de flotación, os buques de maior manga estarán sometidos a maiores aceleracións e períodos máis reducidos en relación con este movemento, mentres que aqueles de superficies máis reducidas experimentarán aceleracións máis suaves debido a que os períodos de arfada son máis longos. (USNA, 2017) [22]. En calquera caso, de percibir un comportamento perigoso do buque, basta con alterar a velocidade ou rumbo do buque de maneira que se evite a sincronización entre distintos grados de liberdade e a igualdade entre períodos de encontro coa onda cos propios do buque.



### 3.4 Guinada

O movemento oscilante de rotación ao longo do eixe vertical, denomínase guinada. Dáse pola influencia de forzas transversais nas cabezas do buque que tenden a desvialo do seu rumbo. A súa importancia reside na combinación coa redución da capacidade de goberno provocada polo cabeceo, que dá lugar a que o efecto da guinada sexa complicado de contrarrestar e o buque navegue en zigzag ou chegue ó punto de atravesarse ó mar, co impacto estrutural que isto pode chegar a ter.

## 4. ESFORZOS ESTRUTURAIS

Ata o de agora, os esforzos estruturais foron nomeados ao longo do traballo como consecuencia de certos efectos e movementos do buque, sen afondar no seu tratamento. Neste apartado, trátase de perfilar o concepto, ata o de agora vago, para coñecer os seus efectos concretos e as fontes que os orixinan. Para elo, consultáronse fundamentalmente as publicacións relativas a teoría do buque seguintes: [8], [21], [28], [30], [31] e [32].

As forzas que actúan sobre o buque provocan unha tendencia á deformación ou perturbación da súa estrutura, é dicir, son causantes directas da xeración de esforzos estruturais. Polo tanto, son un dos condicionantes do deseño da mesma, debendo estar preparada para facerlle fronte a aqueles esforzos que se prevén razoables como consecuencia da actividade propia da nave. Os criterios mínimos desta preparación, no pasado, dependían de cada Sociedade de Clasificación. Na actualidade, estes criterios atópanse máis unificados na Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación (IACS - International Association of Classification Societies). Mesmo se se verifican estes criterios e a resistencia dos materiais e o seu escantillonado é o suficiente; a fatiga, a corrosión e as tensións internas por defectos de fabricación poden diminuír o valor da resistencia de deseño. Por este motivo resulta importante limitar os esforzos dende o punto de vista da operación do buque.



#### 4.1 Forzas xeradoras de esforzos estruturais

Establecer unha clasificación das forzas mencionadas permite obter un criterio máis nítido á hora de evitar certo tipo de esforzos. Segundo a súa natureza, clasifícanse segundo o criterio de Okumoto, Y. et al (2009) [32] en:

- **Forzas derivadas de pesos da estrutura, lastre e carga:** Son forzas inducidas pola gravidade, tratadas anteriormente no movemento nos seis grados de liberdade do buque.
- **Forzas hidrostáticas e hidrodinámicas:** As forzas hidrostáticas son as producidas pola presión que exerce a auga sobre a carena. Son responsables dos empuxes que fan posible que o buque se manteña en equilibrio no seu plano de flotación e teñen un impacto directo sobre a estabilidade estática. A outra cara da moeda son as forzas hidrodinámicas, resultado da interacción da forza das ondas cos movementos do buque. A presión que esta exerce sobre o buque súmase á da presión hidrostática, variando a presión total. Tamén se atopan directamente relacionadas coa estabilidade dinámica e os movementos do buque en xeral.
- **Forzas de inercia da carga e lastre debido ao movemento do buque:** Inducidas como reacción das masas en cuestión ás aceleracións que sofre o buque no seu movemento entre as ondas. Algúns exemplos son a presión sobre os mamparos, sobre outras cargas e o seu impacto xeral da súa distribución na inercia total do buque. No caso de tratarse dun líquido, ademais, debido á súa capacidade para a compresión, tamén se producirán variacións da presión interna do tanque no que se transporta.
- **Forzas de impacto:** Distínguense dúas: o slamming, descrito anteriormente e o “sloshing”. O “sloshing” é un fenómeno polo cal un tanque parcialmente cheo se ve sometido a impactos causados polo movemento libre do líquido do seu interior. Está determinado pola cantidade de líquido en cuestión

## 4.2 Tipos de avaría estrutural

Os esforzos por si mesmos non representan un perigo para supervivencia do buque. Estes son soamente unha condición do comportamento dos materiais fronte a forzas externas. Que se manifesten ao longo do casco, polo tanto, é algo natural que non implica que vaia acontecer un fallo estrutural. Sen embargo, o propio material pode fallar cando estes esforzos se combinan con outros factores, dando lugar á avaría ou fallo estrutural (López, G. e V.Benita) [31]. As máis destacadas son as seguintes:

- **Deformación permanente:** O parámetro coñecido como límite de elasticidade, é unha característica propia do material, indicativa do alongamento que pode adoptar, para despois retomar a súa posición orixinal, cando se somete a un esforzo de tracción. Se este límite se excede, a taxa de alongamento crece rapidamente para pequenos incrementos da forza que o produce. Se esta deixa de actuar, o material queda sometido a unha deformación permanente e non retoma a súa distribución orixinal. (Okumoto, Y. et al, 2009) [32].
- **Pandeo:** O efecto de pandeo é un dos máis presentes ao longo de toda a estrutura do buque, fundamentalmente en pranchas e vigas estruturais. Se se somete unha estrutura a unha forza de compresión, esta pode arquearse e desprazarse transversalmente á actuación da forza para certo valor crítico da mesma. De tratarse dun desprazamento forte, dáse unha deformación permanente e o elemento non retoma a súa disposición orixinal. Este fenómeno tamén pode producirse como consecuencia de momentos flexores, esforzos cortantes e cargas concentradas. (Okumoto, Y. et al, 2009) [32].
- **Fatiga:** Probablemente un dos efectos máis perigosos relativos á avaría, a fatiga pode chegar a producir fracturas na estrutura como consecuencia da repetición cíclica de forzas moito menores á resistencia contra forzas estáticas. É directamente proporcional á dinámica do buque, xa que os movementos relatados anteriormente producen aceleracións de forma periódica. Especialmente relevante é a vibración, debido á súa gran frecuencia

e máis concretamente, o fenómeno do whipping. Tamén se pode ver incrementada pola corrosión. (Okumoto, Y. et al, 2009) [32].

- **Fractura:** En contraposición ó pandeo, producido habitualmente como consecuencia da compresión, as fracturas e gretas adoitan ser consecuencia de esforzos de tracción, esforzos térmicos, tensións internas e tamén da fatiga. Estas aberturas na estrutura preséntanse comunmente no entorno de aberturas existentes ou zonas de soldadura. O risco que implican é posibilitar o desprendemento de elementos estruturais e evitar a correcta transmisión de esforzos ao longo do casco.
- **Sobrecarga:** Cada elemento estrutural, dependendo das súas características, posúe unha carga de rotura que lle é propia, que representa o límite teórico das forzas que pode soportar. Por suposto este límite varía para distintos tipos de esforzos, polo que un elemento moi resistente á compresión, pode non serlo tanto sometido a tracción. Se esta carga de rotura é superada por unha forza aplicada sobre el, prodúcese o colapso do elemento estrutural. Para evitalo, debe evitarse a concentración de cargas e permitir unha ampla marxe de seguridade ente a carga de traballo e a de rotura.

### 4.3 Esforzos lonxitudinais

A estrutura do buque está composta de elementos máis sinxelos coñecidos como membros, cuxos esforzos locais poden ser estudados de maneira individual pero traballan de maneira conxunta. Deste xeito, pódese comparar o comportamento do casco ao dunha viga homoxénea dividida en seccións transversais normais ao plano diametral, coa fin de facilitar o seu estudo. A resistencia lonxitudinal do casco do buque deseñado conforme ás especificacións da IACS debería manter a integridade da súa estrutura sen problema, baseándose en feitos empíricos, sempre e cando se manteña de forma correcta.

Débase ter en conta que estes esforzos son dos máis relevantes a ter en conta, tanto pola súa magnitude, como por feitos pasados, nos que varios buques teñen

naufragado por consecuencia directa duns esforzos lonxitudinais excesivos. Dente este punto de vista, os elementos verticais como os reforzos dos costados e os mamparos xunto cos elementos horizontais máis afastados do eixe neutro, estruturas do dobre fondo e a cuberta, conforman os elementos máis importantes da resistencia lonxitudinal. (Okumoto, Y. et al, 2009) [32].

A continuación desenrolase a teoría de flexión da viga-casco, tendo en conta que non constitúe unha sistematización completa da totalidade de esforzos aos que esta queda sometida, senón que proporciona unha maneira de comprender o seu impacto e aproximalos, sempre e cando se manteña o sistema de cálculos realizados durante o deseño do buque nos métodos empregados a bordo.

#### **4.3.1. Teoría da flexión da viga casco**

En augas tranquilas, a viga-casco vese influenciada polas forzas derivadas da distribución de pesos ao longo da eslora e da presión da auga sobre a carena. Os pesos ( $P$ ) están sometidos a unha forza gravitacional sobre o seu centro de gravidade. Non se engloban tan só aos propios da estiba da carga, lastre e consumo, principais causantes dos esforzos lonxitudinais, senón tamén o peso do propio casco e o seu equipamento. Por outro lado, a presión da auga sobre a superficie mollada imprime unha forza resultante de empuxe ( $E$ ) vertical e cara arriba aplicada sobre o centro de carena.

De forma global, o conxunto de ambas forzas anúlase ou alcanza unha condición de equilibrio para un calado determinado, pero esta premisa non se verifica para cada sección transversal analizada de maneira individual, senón que nalgúns predominarán os empuxes e noutras os pesos. Se cada unha destas divisións fose independente das demais, cada unha tendería a súa condición de equilibrio, variando para elo o calado. Debido a estas diferencias de empuxes en combinación coa elasticidade da viga, indúcese unha tendencia á flexión da mesma con dúas condicións especialmente destacables. A condición de arrufo dáse cando predominan os pesos na medianía da eslora e os empuxes nas cabezas, mentres que na condición de quebranto predominan os pesos nas

cabezas e os empuxes na medianía da eslora. Ambas situacións móstranse na figura 4.3.1.1, onde se esaxera a flexión do casco con afán ilustrativo.

Ambas condicións vense afectadas por outros factores. Os máis destacados son a localización da cámara de máquinas, a eslora e os finos do buque. Así, a localización da cámara de máquinas a popa favorece unha condición de quebranto en lastre, mentres que de atoparse na medianía da eslora, favorece unha condición de arrufo. No caso do buque cargado, adoita producirse unha redución do peso que se carga na zona da cámara de máquinas, polo que a influencia é á inversa. No caso da eslora, os esforzos aos que se ve o sometido o buque serán proporcionalmente maiores canto maior sexa esta, xa que aumentan os brazos de actuación das forzas sobre o casco. Finalmente, os finos das cabezas, propician reducións no empuxe destas zonas, favorecendo a condición de quebranto.

Como consecuencia da flexión da viga, prodúcese unha tendencia ao alongamento da cara convexa, sendo sometida a tracción e ao acurtamento da cara cóncava, sometida a compresión. Ditas forzas actúan con sentidos opostos na parte superior e inferior do casco resultando na aparición dun esforzo cortante entre ambas sobre o eixe neutro (segmento EN), superficie que non se ve sometida a variación de lonxitude. Ademais, os esforzos cortantes afectarán a seccións transversais adxacentes con tendencias opostas, segundo presenten un exceso ou unha falta de empuxe con respecto ao peso da sección.

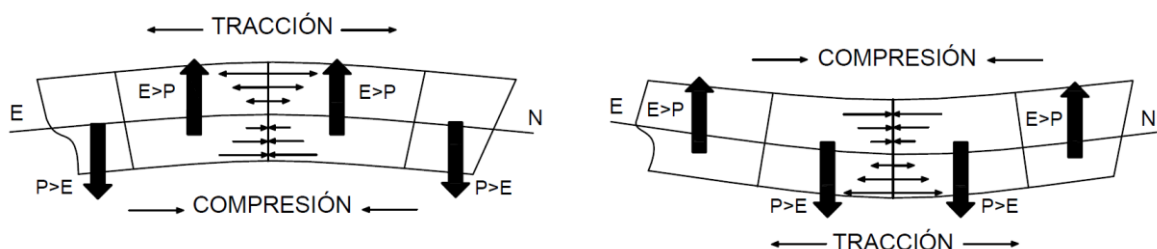


Figura 4.3.1.1. – Distribución de forzas para condicións de quebranto (esquerda) e arrufo (dereita)

En condicións de ondada, os materiais veranse expostos a maior fatiga, xa que os empuxes variarán de maneira continua dependendo da situación do buque sobre a onda en cada momento, podendo incrementar ou diminuír os esforzos

provocados polas condicións anteriores. Desta maneira, os empuxes veranse incrementados na crista da onda, mentres que diminuirán nos senos. As situacións máis prexudiciais presentaranse para a coincidencia da crista da onda na medianía da eslora e os senos nas cabezas para o quebranto e a coincidencia das cristas nas cabezas e o seno na medianía da eslora para o arrufo. Ambas situacións represéntanse na figura 4.3.1.2 onde se esaxera a flexión do casco, novamente con afán ilustrativo. (Olivella, J., 1998) [8]

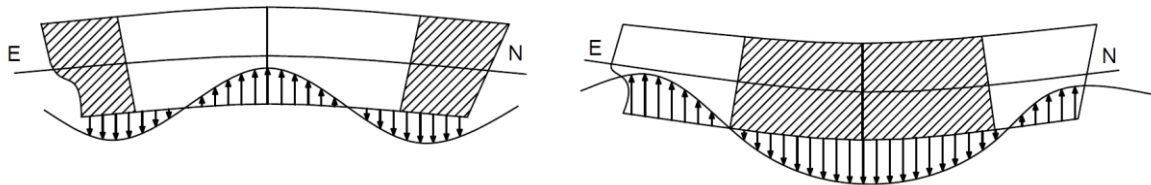


Figura 4.3.1.2. – Situacións máis prexudiciais do buque para condición de quebranto (esquerda) e arrufo (dereita)

#### 4.3.2. Diagrama de cargas

O diagrama de cargas é unha representación gráfica da variación de empuxe ao longo da eslora, produto da diferenza entre o diagrama de pesos e o diagrama de empuxes. Estes últimos poden ser os considerados para augas tranquilas ou ben para as condicións de ondada expostas anteriormente. O valor da carga ( $C$ ) obtérase a partir de:

$$C = P - E \quad (4.3.2.1)$$

Dun xeito inmediato pódese coñecer a partir da representación se o buque se atopa nunha condición de arrufo ou de quebranto, tendo en conta que adoptará valores positivos onde predominen os pesos e negativos onde predominen os empuxes. Por outro lado, canto maiores sexan as diferenzas, é dicir, canto máis se separe a gráfica do eixe de abscisas, maiores serán os esforzos que se deriven delas, sendo máximos na fibra máis distante do eixe neutro (Olivella, J., 1998) [8].

#### 4.3.3. Diagrama de esforzos cortantes

O diagrama de esforzos cortantes (EC) é unha medida da forza que tende a mover dúas seccións adxacentes en sentidos contrarios, obtida a partir da

integración do diagrama de cargas. Os valores positivos do diagrama corresponden a zonas sometidas a pares de forzas que tenden a xirar a peza no sentido das agullas do reloxo. Adopta os seus valores máximos onde a curva de cargas corta o eixe, habitualmente a un cuarto da eslora dende cada cabeza (Olivella, J., 1998) [8].

#### **4.3.4. Curva de momentos flexores**

A curva de momentos flexores (MF) é unha medida da tendencia da viga á flexión, función da distancia do centro de gravidade dos pesos aos membros estruturais, á que se lle enfronta o momento resistente ( $Z$ ), que mide a resistencia de cada sección transversal da viga a dito efecto en función das calidades do material e a súa xeometría. Obtense a partir da integración do diagrama de esforzos cortantes supoñendo un material homoxéneo con igual módulo de elasticidade para a compresión e a tracción e con fibras que flexionan en arcos de centro común e radio moito maior á altura da viga. Os seus valores positivos indican unha tendencia ó arrufo mentres que os negativos denotan esforzos de quebranto.

Ao igual que acontece cos esforzos cortantes, o seu cálculo é útil para comparalo co valor máximo admisible. Dito valor procede de engadir un coeficiente de seguridade ó valor do esforzo correspondente á carga de rotura e superalo podería dar lugar a avaría. O valor máximo correspóndese cun esforzo cortante igual a cero aproximadamente á metade da eslora e presenta unha inflexión para os valores extremos de esforzos cortantes. (Olivella, J., 1998) [8]

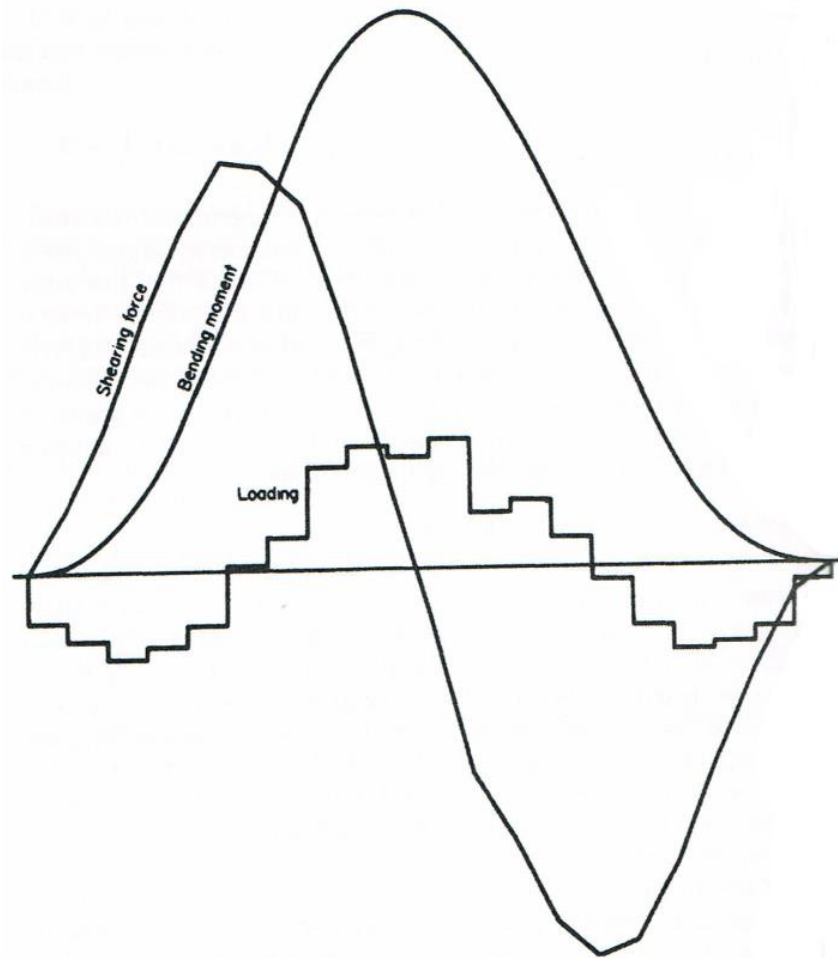


Figura 4.3.4.1. – Distribución típica do diagrama de cargas (loading), esforzos cortantes (shearing force) e momento flexor (bending moment) (Rawson, K.J. e E.C. Tupper, 2002) [30]

#### 4.4 Esforzos transversais

Estes esforzos danse perpendicularmente aos considerados anteriormente en condición de ondada, debido ás diferencias de presión da auga sobre o casco nun e outro costado, provocando tendencias á flexión similares pero de moita menor relevancia. Os causantes fundamentais destas diferencias son o balance do buque e o efecto da propia ondada. O máximo momento dos esforzos transversais é da orde do corenta por cen do máximo momento lonxitudinal e os esforzos que del se derivan, arredor dun trinta e cinco por cen.

A combinación dos esforzos de torsión cos balances do buque, pode provocar tamén un efecto que se coñece como “racking”, consistente nunha tendencia á



deformación da sección cadrada do casco a unha sección romboide. Esta tendencia prodúcese como consecuencia da acción do par adrizante cando o buque balancea, xa que mentres que este exerce unha forza no sentido requirido para adrizar a nave, existe unha forza de sentido contrario debido á inercia do balance cara á banda que escora. Debido a que a forza do par adrizante se fai sensible primeiramente sobre o casco somerxido, o buque experimentará este efecto mentres que a estrutura non transmita na súa totalidade a acción do momento adrizante. Os esforzos derivados deste fenómeno fanse máximos nos marxes da cuberta e o pantoque, onde tamén se combinan cos esforzos lonxitudinais (Rawson, K.J. e E.C. Tupper, 2002) [30].

#### **4.5 Esforzos de torsión**

Os esforzos de torsión son aqueles provocados polas forzas cuxa tendencia é a de facer xirar unha estrutura arredor dun eixe en sentidos opostos nos seus extremos. No caso concreto do buque, os esforzos de torsión son aqueles que provocan unha tendencia de xiro arredor do eixe lonxitudinal de sentidos opostos para dúas seccións transversais consideradas. Poden ser provocados por distribucións irregulares dos pesos ao longo da manga do buque e por efectos hidrostáticos e hidrodinámicos fundamentalmente.

Dunha maneira similar aos esforzos lonxitudinais, os esforzos de torsión varían en condicións de ondada cando o buque navega con mar de amura ou aleta. Neste caso, a onda non avanzará ao mesmo ritmo por ambos costados das seccións transversais, senón que, tomando como referencia a crista da onda, esta imprimirá os seus efectos nunha das bandas antes ca na outra e continuará adiantándose ata que chegados á cabeza oposta, deixe atrás a banda inicial e os efectos continúen a presentarse na banda contraria. Como resulta intuitivo, trátase dunha situación alternativa na que o efecto de empuxe da crista cambia dunha banda a outra co paso da onda, sucedendo de igual modo para o efecto de diminución do empuxe provocado polo paso do seno da onda.

Analizando unha sección transversal individualmente, a banda que reciba primeiro a chegada da crista da onda estará sometida a un maior empuxe que a banda contraria, o que provoca a tendencia de xiro da sección. De igual modo acontece para o seno da onda, aínda que a banda sometida a un maior empuxe é a contraria á da chegada do seno. A combinación das tendencias de xiro a bandas contrarias é a que da lugar a esforzos de torsión, os cales poden agravarse co movemento de balance (Olivella, J., 1998) [8]. Os buques que contan con grandes aberturas en cuberta, como graneleiros e portacontenedores, a pesar de estar reforzados convenientemente con esta fin, son máis vulnerables a este tipo de forzas (Okumoto, Y. et al, 2009) [32].

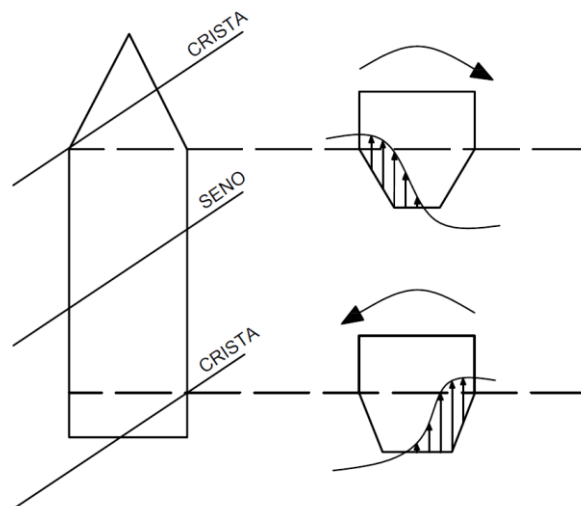


Figura 4.5.1. – Efecto do paso dun tren de ondas coas cristas coincidentes nas cabezas.

#### 4.6 Esforzos locais e estrés térmico

Ademais dos esforzos sufridos polo conxunto da estrutura, os membros da mesma pódense ver afectados por esforzos locais procedentes de golpes de mar, vibracións, requirimentos do deseño, discontinuidades e outros factores. Neste caso é igual de relevante o estudo da peza de maneira individual coma do seu papel dentro da estrutura, xa que todos as cargas extras sufridas deben poder transmitirse aos membros adxacentes de maneira que a peza non se vexa sometida a sobreesforzo. Para que isto sexa posible, débese manter a continuidade da estrutura e reforzar especialmente as aberturas, evitando que as forzas se concentren nelas. Algúns destes esforzos, son consecuencia dos

movimentos do buque expostos anteriormente. Outros, coma os esforzos causados por forzas de impacto, son de moi curta duración, causan vibracións e poden dar lugar a danos na estrutura se a enerxía de impacto excede a resistencia do mesmo. Tamén son relevantes aqueles causados polas tensións internas da propia estrutura como consecuencia da disposición dos seus membros, a calidade da soldadura e outros factores.

O estrés térmico é un esforzo aos que se ve sometido unha estrutura como reacción aos cambios de temperatura. Ao aumentar a temperatura, os materiais dilátanse, mentres que ao reducirse, contráense. Este movemento provoca un deterioro dos materiais e pode chegar a producir roturas para cambios bruscos.

#### **4.7 Vibración**

A vibración é o movemento cíclico das partículas entorno a unha posición de equilibrio, de moita menor amplitude que unha oscilación, que se produce como consecuencia da transmisión de enerxía ao longo dos materiais. O buque, como non podía ser doutra maneira, posúe unha frecuencia natural de vibración que depende directamente da elasticidade da estrutura que o compón. Os esforzos de flexión lonxitudinais, transversais e de torsión provocan vibracións ao longo da estrutura. Isto é consecuencia da alteración da condición de equilibrio e da tendencia a recuperala, non só de maneira global senón a nivel das partículas. Sen embargo, esta non é a única fonte de vibracións relevantes do buque.

Unha das fontes máis relevantes de vibracións é, como cabe supoñer, a propulsión do buque. Deixando de lado que o eixe poida estar desaliñado ou outros problemas mecánicos, a propia acción da hélice provoca perturbacións sobre o codaste que se traducen en vibracións. Nin que dicir ten que no caso de producirse cavitación, as vibracións aumentarán considerablemente. Este fenómeno pode producirse facilmente na navegación proa ó mar debido á alta resistencia ó avance.

Por outro lado, todos os motores provocan vibracións no seu funcionamento. Mesmo se estes se sitúan sobre estruturas que as amortezan, faranse sensibles en maior ou menor medida. (Clark. I.C., 2005) [43]

## 5. CASOS PRÁCTICOS

A continuación expóñense e analízanse varios casos reais relativos á influencia do mal tempo sobre o comportamento estrutural e a estabilidade do buque dende o punto de vista estritamente técnico. A análise lévase a cabo coa fin de comprender mellor o impacto real da teoría de efectos e esforzos exposta.

### 5.1 Svendborg Maersk

A análise deste apartado refírese a investigación levada a cabo pola comisión danesa de investigación de accidentes marítimos, a DMAIB (Danish Maritime Accident Investigation Board) [34] sobre os danos sufridos polo buque “Svendborg Maersk” como consecuencia dos balances violentos experimentados en condicións de mal tempo.

O 13 de febreiro de 2014 o buque portacontedores de bandeira danesa Svendborg Maersk parte do porto de Rotterdam, Países Baixos, con dirección ao canal de Suez. Previamente á saída, tendo en conta que os partes meteorolóxicos anunciaban a posibilidade de fortes ventos e ondada, realizouse a comprobación visual e o reforzo do trincado dos contedores como medida preventiva fronte a meteoroloxía adversa.

Ao longo da mañá do día 14, no tránsito polo Canal da Mancha, as condicións meteorolóxicas tornaron máis desfavorables e foi preciso reducir a velocidade a dez nós, adoptando tamén un rumbo de proa ó mar, de maneira que se reducisen os movementos de balance. Pouco despois recibíuse un radioaviso por tormenta de forza 11 na zona de navegación do buque a través do sistema SafetyNET de Inmarsat. Na tarde dese mesmo día o buque experimentou varias escoras súbitas de grande amplitude (ata 38° a estribor) no transcorrer de seis a oito balances,

durante as cales un gran número de contedores se precipitaron ao mar. Por seguridade, procedeuse a reducir a velocidade sobre a auga a tres nós.

Ás 19.13 o buque experimentou outra secuencia de escoras de grande amplitude (ata 41° a babor) na que se materializou unha nova perda de contedores. Considerando a posibilidade de que se puidese tratar dun fenómeno de balance paramétrico, aumentouse a velocidade coa fin de asegurar o goberno efectivo do buque. Sen embargo, o rumbo non foi modificado polo temor do capitán a incorrer nunha situación máis desfavorable. Finalmente o buque conseguiu superar a situación de perigo con danos estruturais de carácter leve e perda parcial da carga. O buque dirixiuse a Málaga, onde se levaron a cabo as reparacións e demais operacións oportunas.



Figura 5.1.1 – Svendborg Maersk á saída de porto e vista dos contedores a popa no porto de Málaga. (DMAIB, 2014) [34]

De acordo coas observacións da tripulación rexistradas no Caderno de Bitácora, a meteoroloxía variou dun vento S-SW e estado do mar de forza 9 ás 14.00 do día 14 a un vento de forza 12 e estado do mar de forza 10 ás 22.00 dese mesmo día. O parte meteorolóxico inicial non ofrecía indicios de que a operatividade do buque se vise comprometida, polo que non se estimou a necesidade de tomar unha ruta alternativa. Sen embargo, unha vez que o buque se viu sometido á meteoroloxía adversa, a posibilidade de modificar a ruta de maneira eficiente era escasa. Referente á modificación da ruta, a investigación fai fincapé en que os procedementos dispoñibles a bordo teñen un carácter demasiado xeral, dificultando a toma de decisións do capitán. Do mesmo xeito, tampouco se

afondaba nos métodos para evitar o balance paramétrico, só se mencionaba que debía terse en conta.

Por outro lado, o buque estaba dotado de estabilizadores de aleta, aínda que só o de estribor se atopaba operativo. Isto podía chegar a ter unha efectividade do 80% con respecto a operatividade total, sen embargo, viuse comprometida polo escaso tempo de reacción das aletas como consecuencia dos rápidos balances e da redución do momento que estas xeran para velocidades do buque reducidas. Polo tanto, a influencia deste sistema foi escasa ou nula.

Por último, facendo mención á perda dos contedores, esta non se debe a un fallo no procedemento de trincaxe, senón aos grandes balances para os que este non estaba deseñado.

As conclusións persoais extraídas deste caso, baseadas na investigación do DMAIB en relación co obxecto do traballo, comezan por destacar como un buque plenamente operativo e debidamente preparado para a navegación que leva a cabo, pode verse sometido a situacións de risco como consecuencia da meteoroloxía adversa. Máis concretamente, resaltar a importancia do coñecemento do balance paramétrico e o fundamento da súa manifestación. Ó mesmo tempo, para facilitar a toma de decisións, cómpre resaltar a utilidade dun procedemento concreto aplicado ó buque en cuestión, tanto para considerar a adopción dunha nova derrota como para navegar unha vez que se incorre na situación desfavorable.

Adicionalmente, faise patente a necesidade de considerar os erros ou desviacións que presentan os partes meteorolóxicos con respecto á realidade e contrastalos coas observacións propias.

O buque en cuestión contaba tamén cun sistema informático para o cálculo da velocidade e rumbo máis adecuados, así como para a detección de fenómenos perigosos, como o balance paramétrico. No momento do incidente, non estaba completamente integrado, polo que non se empregou. Quizais este non

proporcionaría un aviso coa suficiente antelación para evitar os balances que se produciron, sen embargo, puidera ter servido de apoio para o capitán á hora de alterar o rumbo.

## 5.2 Maersk Newport

O desenrolo deste apartado baséase na investigación levada a cabo pola comisión inglesa de investigación de accidentes marítimos, a MAIB (Marine Accident Investigation Branch) [36], sobre os danos recibidos polo buque portacontedores “Maersk Newport” como consecuencia dunha prevención deficiente fronte a condicións meteorolóxicas adversas.

O 10 de Novembro de 2008 o buque abandona o porto de Le Havre con destino a Alxeciras. O parte meteorolóxico anunciaba ventos do suroeste de forza 5 a 6, con previsión de aumentasen a súa intensidade. Sen embargo, non se aplicaron medidas especiais de preparación contra meteoroloxía adversa, tendo en conta ademais, que o procedemento a empregar con esta fin, non especificaba as circunstancias baixo as que debía ser posto en práctica. Polo tanto, á saída do porto, aseguráronse as áncoras da forma habitual: dispostas na súa posición de estiba, co molinete desengrenado e sobre freo, e aseguradas con trincas de cadea e estopor de guillotina. Por outro lado, as tapas dos escobéns non foron colocadas.

A velocidade de navegación adoptada ás 01.18, de 22 nós, comezou a provocar movementos de cabeceo máis intensos e embarque de auga cando as condicións de vento empeoraron a forza 7. Para evitalo, reduciuse a velocidade a aproximadamente 15 nós ás 03.40 , e mesmo se ás 12.00 o vento aumentou a unha forza de 8 a 9, non se rexistraron movementos violentos e mantívose a velocidade. Aparentemente, durante algún momento desta travesía, a retención da áncora de babor fallou, provocando que caese por debaixo da superficie da auga. Neste movemento tamén, como consecuencia da ondada, esta tería impactado contra o casco do buque producindo tres aberturas de 150 a 250mm e varias deformacións.





Figura 5.2.1 – Portacontedores Maersk Newport e danos na costado de babor vistos dende o castelo (MAIB, 2019) [36]

A avaría comezou a investigarse aproximadamente ás 12.15, cando se disparou unha alarma por alta temperatura no motor da hélice de proa. Neste momento, a cuberta atopábase intransitable como consecuencia do embarque de auga, polo que o capitán alterou o rumbo para minimizalo e para desviarse das rutas de navegación coa fin de proporcionar unhas condicións seguras para a recuperación da áncora. Tamén se lastraron os tanques de popa e se procedeu a unha velocidade reducida. Gracias a estas medidas e ás operacións de control de danos, o buque puido navegar ata Alxeciras para ser reparado.

En resumo, a áncora tería saído da súa posición de estiba como consecuencia do fallo dos seus sistemas de suxeición fronte á vibración e forzas impresas polo movemento de cabeceo. Estes sistemas son a trinca de cadea e o freo do molinete, e non o estopor de guillotina que tamén se empregou para asegurala. Ademais, a ausencia das tapas dos escobéns permitiu a entrada forzada de auga a través dos mesmos, acentuando as vibracións. A velocidade adoptada polo capitán era a adecuada, pois ao parecer, o buque non sufría movementos violentos ou de gran amplitude e o impacto da áncora tampouco foi apreciado. Débese destacar polo tanto a importancia da precisión dos procedementos contra a meteoroloxía adversa e a relevancia de proceder ao reforzo das trincas con antelación, xa que neste caso, no momento que se pretendeu facelo, a cuberta xa resultaba intransitable.



### 5.3 Prestige

O caso exposto a continuación baséase na investigación levada a cabo pola comisión española de investigación de accidentes marítimos (CIAIM – Comisión Permanente de Investigación de Siniestros Marítimos) [37] sobre o afundimento do petroleiro Prestige fronte a costas españolas.

O buque Prestige foi un petroleiro monocasco construído no ano 1976 e con bandeira de Bahamas que se dirixía a Xibraltar, á espera de ordes, procedente de Ventspills (Letonia) en novembro do 2002. Este enviou unha chamada de socorro á saída do Dispositivo de Separación de Tráfico de Fisterra debido á forte escora que presentaba nese momento. A resposta dos medios de salvamento incluíu un complexo remolque de varias millas coa fin de arredar o buque das costas españolas. Sen embargo, a continuación, búscase analizar unicamente o comportamento estrutural do casco á marxe de dita operación, por considerar que esta non representa un caso fiel de navegación en meteoroloxía adversa. Aínda que o remolque puido ter unha relación directa co desenlace final, dende o punto de vista do autor considérase que os factores que se deben destacar se atopaban determinados dende o comezo.

A análise que se efectuou sobre o sinistro, apunta a que a escora que adaptou o buque se produciu como consecuencia dunha abertura nos tanques laterais de lastre que permitiu a entrada violenta de auga. Isto ocorreu despois de que o buque experimentase un movemento violento e se escoitase un forte ruído. Nese momento, o petroleiro navegaba a unha velocidade media de 5 nós en condicións de vento do SW de forza 8 a 9. O informe de CEHIPAR (Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo) , adxunto á publicación do CIAIM, sobre o comportamento dun modelo a escala dotado de sensores de presión nestas condicións, descarta algunhas posibilidades como causa do fallo estrutural. En primeiro lugar, polo propio comportamento descrito da onda trocoidal en augas profundas, o movemento horizontal das ondas é demasiado escaso como para provocar unha avaría no casco do buque. De igual maneira un obxecto flotante en combinación con estas tamén carecería en condicións normais da enerxía precisa para provocala. Por último, a posibilidade de explosión interna queda desbotada

xa que as pranchas do casco se atopaban deformadas cara o interior e a cuberta, que tería resultado danada, non presentaba signos de explosión.

O buque fora sometido a reparacións no estaleiro de Guangzhou (República Popular China) no ano 2001 que afectaron principalmente aos tanques laterais dous e tres, babor e estribor. As reparacións foron propiciadas polo alto desgaste aos que se vían sometidos estes tanques de lastre, xa que adxacente a eles se transportaba fueloil a altas temperaturas, provocando estrés térmico e corrosión.

As operacións levadas a cabo no estaleiro foron estimadas conformes ás especificacións da IACS pola Sociedade de Clasificación do buque American Bureau Of Shipping (ABS). Sen embargo, aínda que conforme ós requirimentos, os perfís que se empregaron para a construción dos reforzos lonxitudinais foron elaborados manualmente, debido á falta de perfís prefabricados, o que diminúe a súa resistencia. Adicionalmente, os espesores das pranchas empregadas na reparación eran nalgúns casos menores aos das retiradas, o que puido xerar tensións locais da soldadura. Este feito atópase relacionado coas imaxes obtidas polo minisubmarino "Nautilo" no lugar do naufraxio, nas cales se pode identificar que algunhas das pranchas se desprenderon ao longo das liñas de soldadura. Estas atopábanse deformadas cara ó interior do tanque semellando que puideron verse sometidas a un esforzo excesivo que non se viu compensado polos reforzos lonxitudinais dos que se fala.

Continuando coa secuencia de eventos, a escora do buque deu lugar á parada da máquina. A falta de propulsión tería sometido ao Prestige á vontade das forzas externas, experimentando fortes movementos de balance e cabeceo que semellan o principal factor que provocou o colapso do mamparo divisorio entre o tanque central número tres, cargado de fueloil, e o tanque lateral de lastre número tres.

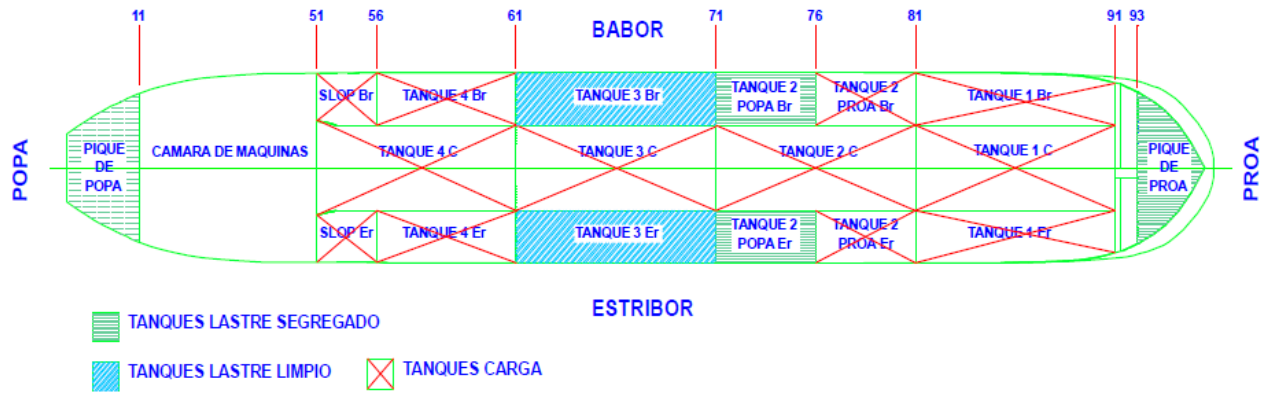


Figura 5.3.1 – Distribución de tanques de carga e lastre do "Prestige" (CIAIM, 2017) [37]

Céntrase a atención agora na sección comprendida entre as cadernas 51 e 91 correspondentes á zona de carga. Os tanques da zona do fallo estrutural sitúanse entre as cadernas 61 e 71. No informe da CIAIM, preséntanse diagramas aproximados dos momentos flexores e esforzos cortantes en augas tranquilas a partir dos datos dispoñibles. Observando a curva de momentos flexores (figura 5.3.2) para o momento anterior á avaría, non se superan os esforzos máximos en ningún punto da eslora. Alcázase un máximo de 117339 toneladas por metro na caderna 56 sendo o valor máximo nesa caderna 172000 toneladas por metro.

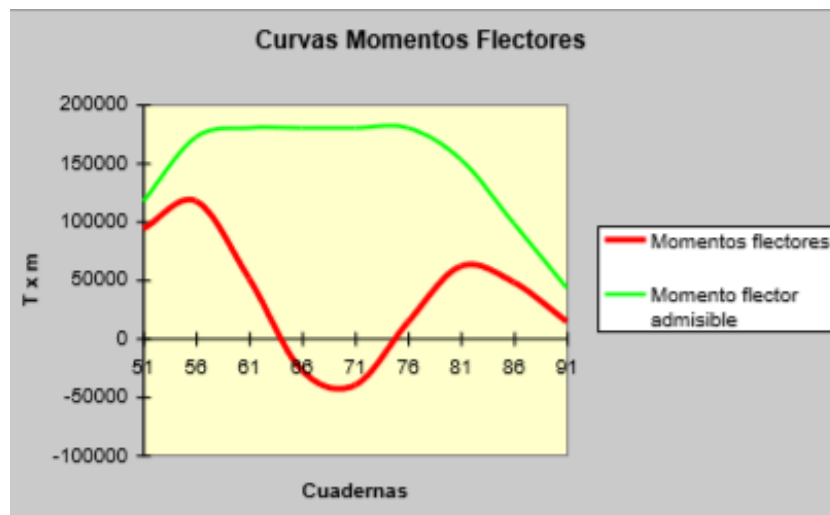


Figura 5.3.2 – Diagrama de momentos flexores anterior á avaría (CIAIM, 2017) [37]

No caso dos esforzos cortantes (figura 5.3.3), alcázase o máximo na caderna 61 cun valor de -5333 toneladas, non chegando ó máximo admisible de -8200 toneladas. Pódese observar tamén a coincidencia dos máximos esforzos cortantes cos puntos de inflexión da curva de momentos flexores e dos máximos

momentos flexores cos valores nulos de esforzos cortantes. A distribución dos esforzos cortantes asemellase á propia dunha situación de quebranto, pero a curva de momentos flexores mostra unha situación máis complexa, cunha maior acumulación de pesos no centro e as cabezas do buque.

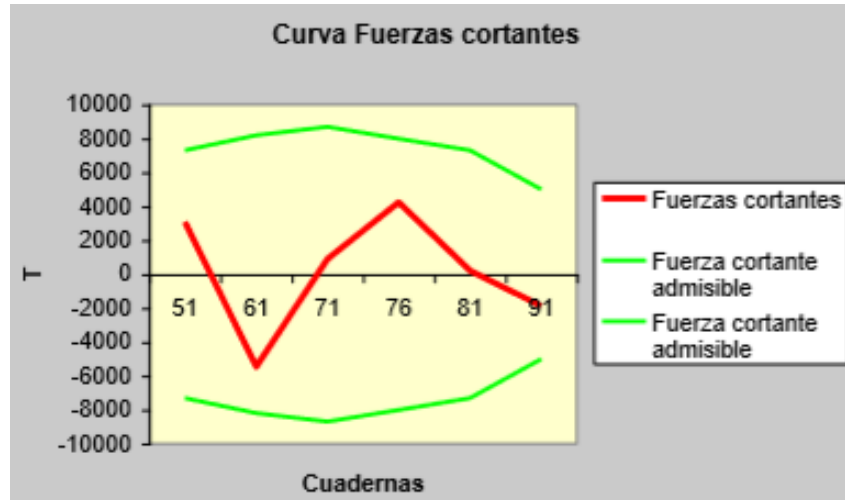


Figura 5.3.3 – Diagrama de esforzos cortantes anterior á avaría (CIAIM,2017) [37]

No momento no que acontece a avaría e a auga penetra nos tanques laterais de lastre (figura 5.3.4), o momento flexor incrementase ata un máximo de 220919 toneladas por metro na caderna 56, un 28,4% máis do valor máximo admisible. Faise patente a forte tendencia da viga casco ao arrufo, producíndose unha forte tendencia á flexión nos tanques situados inmediatamente a popa dos afectados.

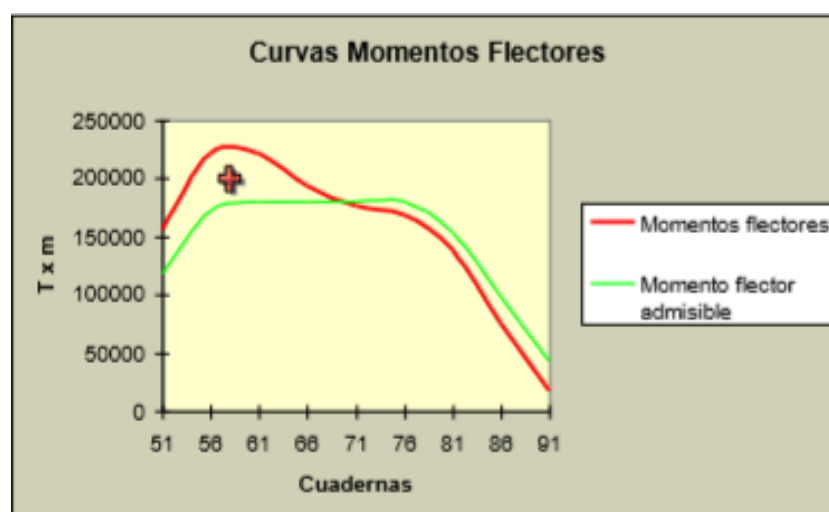


Figura 5.3.4 – Diagrama de momentos flexores posterior á avaría (CIAIM,2017) [37]

Se contrastamos este diagrama co de esforzos cortantes (figura 5.3.5) atopámonos que estes últimos se viron reducidos na zona correspondente á zona afectada. En resumo, neste momento o buque vese sometido a unha forte tracción por debaixo do eixe neutro, facéndose máxima na quilla, e unha forte compresión por enriba deste, sendo máxima na cuberta. Esta situación combínase con movementos do buque violentos navegando ó garet e unha escora a estribor de aproximadamente o ángulo de inundación.

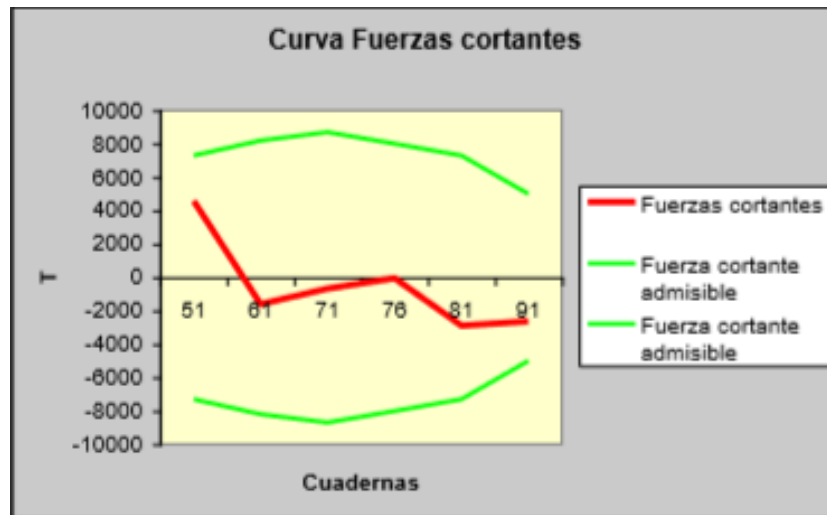


Figura 5.3.5 – Diagrama de esforzos cortantes posterior á avaría (CIAIM,2017) [37]

Coa fin de adrizar o buque, enchéronse por gravidade os tanques laterais de lastre dous e tres de babor. Cabe destacar que para este momento o tanque de carga xa se atopaba en comunicación directa co mar. Na figura 5.3.6 pódese apreciar a magnitude da avaría.



Figura 5.3.6 – Situación do buque "Prestige" tras a avaría (CIAIM, 2017) [37]

Considerando un nivel do 70% nos tanques laterais de lastre dous e tres de babor (figura 5.3.7) o momento flexor dispárase ata un máximo de 306796 toneladas por metro na caderna 61, excedendo un 70,4% o valor máximo admisible. O aumento de peso na sección media provoca que este máximo se desprace lixeiramente cara a proa.

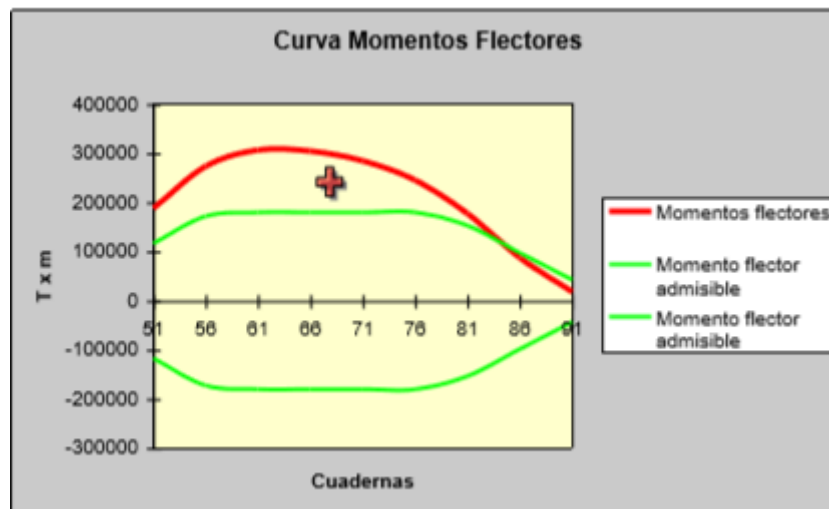


Figura 5.3.7- Diagrama de momentos flexores posterior ao lastrado (CIAIM, 2017) [37]

Comparando o diagrama de momentos flexores co diagrama de esforzos cortantes (figura 5.3.8) pode verse que estes alcanzan un valor moito menor, por debaixo dos valores límites admisibles.

O día 19 de novembro de 2002 o casco partiuse en dous e o buque afundiú a aproximadamente 135 millas das costas españolas despois dunha longa operación de remolque e unha vez que a tripulación xa fora evacuada. A CIAIM establece un fallo estrutural grave nos tanques laterais de lastre 3 e 2 de popa como causa do afundimento. Este tería sucedido como consecuencia da acción do mal tempo sobre un buque que en xeral presentaba deficiencias de mantemento, derivando nun fallo nos reforzos lonxitudinais, que á súa vez terían permitido a deformación e desprendemento das pranchas do costado.

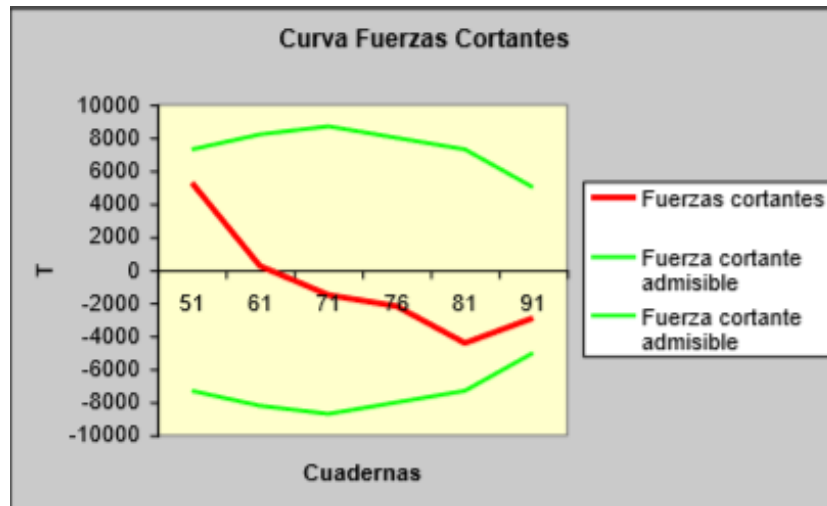


Figura 5.3.8 – Diagrama de esfuerzos cortantes posterior ao lastrado (CIAM, 2017) [37]

En conclusión dende o punto de vista da operación a bordo é importante manter baixo control os esforzos aos que se ve sometido o buque, non só para evitar superar os valores máximos admisibles, senón para intentar mantelos na súa mínima expresión coa fin de alargar a súa vida. Por outro lado, prestar especial atención ao mantemento do buque, para evitar que as súas características de resistencia se vexan reducidas. Ao mesmo tempo tamén prever posibles fallos do equipamento do buque coa fin de que poidan supoñer un risco, como neste caso supuxo a perda de propulsión.

#### 5.4 levoli Sun

A análise levada a cabo neste apartado baséase na investigación da comisión francesa de investigación de accidentes marítimos (CPEM - Commission permanente d'enquête sur les événements de mer) [38] [39] sobre o afundimento do buque tanque italiano levoli Sun na súa ruta de Fawley (Reino Unido) a Berre (Francia) como consecuencia dunha inundación progresiva. Novamente, coma no caso do Prestige, este buque foi sometido a unha operación de remolque que non se busca ter en conta.

O día 28 de novembro do ano 2000 o buque inicia a travesía tras comprobar a previsión meteorolóxica, que a ollos do capitán non supoñía un impedimento para a viaxe. Ás 22.00 dese mesmo día o buque enfrenta ventos de forza 8 que



provocan o embarque de gran cantidade de auga e amplos movementos de cabeceo e balance. Posteriormente o vento aumentaría a forza 9, e cunha velocidade de 5,3 nós o buque comeza a presentar problemas de goberno.

Arredor das 12.30 unha alarma intermitente fai á tripulación coñecedora dunha inundación nos compartimentos do castelo de proa. Nese momento adoptouse un rumbo que permitise a súa inspección e concluíuse que a falta de estanquidade se debeu ás aberturas que dan paso á cadea da áncora. De igual modo, considerouse imposible proceder ó seu achique polo que o buque continuou o seu rumbo inicial. Progresivamente, pese ás comprobacións periódicas da inundación, o buque comezou a presentar un comportamento anormal e unha significativa redución no movemento de cabeceo. A situación continuaría a empeorar ata que foi patente un forte asento aproante que imposibilitaba o control da nave e permitía o embarque de auga de maneira continua. Finalmente, pese o intento de darlle remolque, o buque afundiú unha vez que a tripulación fora evacuada.



Figura 5.4.1 – Imaxe do buque levoli Sun e do seu posterior afundimento (CPEM,2005) [39]

En todo momento o buque mantivo o rumbo da derrota sen adaptarse á ondada e a velocidade non se reduciu ata o último momento, cando xa era demasiado tarde, para navegar ao paio.

A lección máis importante a ter en conta neste caso é a importancia de manter a estanquidade do buque na súa relación cos procedementos contra o mal tempo. No caso de que estes fallen tamén se debe poder contar cun sistema eficiente de achique. Para isto é fundamental contar cun mantemento eficiente, que no caso das ventilacións dos tanques de lastre do levoli Sun, era deficiente. Por outro lado, vólvese facer patente a importancia da manobra na navegación durante o



mal tempo, xa que de ter tomado unha acción para reducir o embarque de auga, o desenlace podería ter sido diferente.

## **6. MANOBRAS**

A actuación máis axeitada para levar a cabo a navegación dun buque en condicións meteorolóxicas adversas está lonxe de ser unha verdade absoluta. A dificultade para modelar a gran cantidade de situacións que se poden presentar e as características propias de cada buque, provoca que en moitos casos a experiencia e o coñecemento do comportamento do buque sexan a mellor ferramenta da que se dispón. Sen embargo, a consideración dos fenómenos descritos anteriormente, pode proporcionar un bo criterio no que basearse para determinar a actuación máis vantaxosa.

Habitabilidade, operatividade e supervivencia son os tres ámbitos a ter en conta para determinar a actuación máis axeitada en cada caso (Aláez, J. ,1996) [23]. Por este motivo, consideráronse os esforzos e estabilidade como factores críticos, xa que teñen un impacto directo sobre a supervivencia e ademais, os movementos do buque que os influencian, son determinantes sobre a habitabilidade e a operatividade.

Para a elaboración deste apartado empregáronse as publicacións anteriores que tratan os movementos do buque e esforzos aos que se ve sometido, as conclusións obtidas das análises de casos prácticos e fundamentalmente as seguintes referencias da bibliografía: [4], [8], [13], [23], [30], [31], [41] e [44].

### **6.1 Actuación xeral**

Se ben é certo que a navegación en condicións meteorolóxicas adversas está sometida a un grande abanico de acontecementos e factores cambiantes, non cabe dúbida de que o primeiro paso para afrontalas, é presentar unhas medidas comúns a levar a cabo cando se espera esta situación. Así, en orde de actuación, a primeira consideración é estudar a posibilidade dunha modificación na derrota que permita evitar a zona de mal tempo. No caso de que non sexa posible ou non

o permita a operatividade do buque, débese preparar a nave para afrontar a navegación a través desta zona, deixando constancia disto no caderno de bitácora e preferiblemente, seguindo un procedemento adecuado, co uso de checklists, de maneira que se leve a cabo dunha maneira organizada.

Por procedemento adecuado quérese dicir que este se deseña para o buque en cuestión e quede claro en que momento debe ser posto en práctica. Ademais debería guiar ao capitán na toma de decisións, identificando as situacións máis perigosas e proporcionando un criterio que lle sirva de base.

A continuación expóñense algunhas das medidas xerais que deberían adoptarse en relación coa operatividade e a supervivencia do buque, por considerar que as medidas que permiten a operatividade do buque son tamén aplicables á habitabilidade.

### **6.1.1 Operatividade do buque**

Para continuar a navegación de maneira efectiva, é preciso actualizar os avisos meteorolóxicos de maneira que se poidan predicir os cambios que se van producir e informar a todos os departamentos da meteoroloxía adversa. Ao mesmo tempo, é importante situar a posición do buque e da perturbación meteorolóxica, se é dunha forza relevante, de maneira frecuente. A importancia de verificar a posición do buque radica en que é probable que se produza unha desviación da derrota como consecuencia do abatemento que inducen os fortes ventos e das variacións do rumbo que provocan as guinadas. Para reducir a posibilidade de que isto suceda, recoméndase o emprego do goberno manual, xa que permite a corrección do rumbo de maneira máis áxil nun momento determinado. Por outro lado, coñecer o desprazamento da zona de meteoroloxía adversa, permite coñecer a magnitude e dirección do abatemento e a derrota máis axeitada.

Para manterse na derrota planificada e evitar incorrer nunha situación de perigo para o buque, débese adaptar o rumbo e a velocidade ás condicións imperantes, tendo en conta o ETA (estimated time of arrival) previsto. Actualmente algúns buques contan xa con programas informáticos que calculan a velocidade e rumbo

máis efectivos dende o punto de vista da seguridade e a economía para uns parámetros determinados de mar e vento. Sen embargo, esta ferramenta deberá ter en conta as características dinámicas e de estabilidade propias do buque no viaxe en cuestión e deberá ser aprobada pola Administración. Os resultados das súas estimacións só deben representar unha axuda para a toma de decisións.

A selección do rumbo e velocidade axeitados en función das características reais do buque, debe permitir que os seus movementos sexan o suficientemente suaves como para permitir o traballo no buque e a estada a bordo. Un punto importante a ter en conta é o traballo sobre a cuberta de intemperie, o cal debería ser reducido ó mínimo en condicións de embarque de auga. En calquera caso, deberase dispoñer de liñas de vida que permitan o acceso á proa e á popa do buque cunha suxeición de seguridade axeitada e manter a cuberta libre de equipamento sen asegurar. Tamén pode ser recomendable adoptar un cambio de rumbo de maneira que se reduza o movemento de cabeceo, e polo tanto, se limite o embarque de auga, no caso de querer acceder á proa.

### **6.1.2 Supervivencia do buque**

A conservación do buque comeza por adoptar un rumbo e velocidade axeitados que permitan a súa operatividade. Adicionalmente, é a estabilidade a que condiciona a supervivencia. Así, o buque debe manter unha altura metacéntrica transversal que lle permita navegar sen movementos violentos ao mesmo tempo que se mantén en equilibrio estable fronte acción das forzas externas. No caso de que a estiba da carga non proporcione dita situación, deberá empregarse lastre.

Os movementos violentos do buque poden dar lugar a correntos de pesos, polo que o equipamento como grúas ou áncoras, así como a carga deberían verse asegurados cun trincaxe reforzado. De producirse un corrento, o centro de gravidade desprazaríase, provocando unha escora permanente. Nesta situación o buque é máis susceptible a adquirir escoras maiores a esa banda, podendo provocar correntos adicionais, co conseguinte perigo de quedar quilla ó sol.

Por outro lado, debe evitarse o efecto de superficies libres. En buques cun gran  $GM_T$  podería considerarse como un método efectivo para reducir a violencia dos movementos do buque, sempre e cando se teñan en conta os esforzos producidos polo líquido no seu movemento no interior do compartimento. Sen embargo, na maioría dos casos resulta un efecto prexudicial, que se debe evitar cun mantemento adecuado das escotillas, portas estancas, tubos de sonda e demais aberturas que comprometan a estanquidade do casco, as cales permanecerán pechadas e aseguradas durante a navegación con mal tempo. Tamén se debe asegurar un achique eficiente da cuberta, a cal adoita presentar unha brusca para dirixir a auga aos embornais, os cales deberán estar limpos para permitir o paso da auga (MSC.267(85), 2008) [4].

## 6.2 Navegación con mar a proa do través

A navegación en condicións meteorolóxicas adversas co mar a proa do través coñécese como capear o temporal. A estrutura da proa deséñase con dúas funcións principais, por un lado, a de ofrecer unha resistencia mínima ao avance marcha avante do buque, e polo outro, dispoñer dunha resistencia estrutural axeitada. A redución da resistencia obtense a través do deseño de formas acusadas da proa, que permite que se expoña unha menor superficie ao mar ao mesmo tempo que se facilita o fluxo da auga ao longo dos costados. Esta acción complementábase co efecto dunha protuberancia do casco situada na proa coñecida como bulbo, cuxa función é a de xerar un tren de ondas que sumado ao xerado pola estrutura da proa anule a resistencia que este produce. Pola outra banda, a resistencia estrutural da proa debe ser suficiente para soportar os golpes de mar propios da navegación con mal tempo, impactos contra o peirao de amarre, varadas, roces da cadea da áncora e nalgunhas ocasións, a navegación entre o xeo. A peza fundamental desta cuestión é a roda, remate da proa que serve de conexión entre ambos costados. A súa unión co resto do casco debe permitir unha transmisión de esforzos efectiva. No caso de que o pé de roda remate nun bulbo, a roda non será tan só unha peza de forte escantillón, senón que se presentará un armazón horizontal e vertical no interior de dita protuberancia (López, G. e V.Benita) [31].

A manobra máis axeitada a levar a cabo consiste en recibir a ondada polas amuras, en lugar de directamente a proa, nun ángulo de entre 25 e 45 graos. O deseño da proa permite que navegando deste xeito, as amuras desvíen a auga cara fóra e a entrada do buque sobre a crista da onda ofrezca menor resistencia. Isto é particularmente importante cando o movemento relativo do cabeceo sobre a ondada induce efectos sensibles de slamming e embarque de auga, xa que estes son menores adoptando este rumbo. No caso de navegar cun rumbo perpendicular ás ondas, o movemento de balance redúcese, pero o movemento relativo do cabeceo podería aumentar o suficiente para provocar que a proa do buque se afunda no seno da onda tras remontar unha crista, dando lugar a un slamming excesivo e un embarque de gran cantidade de auga. Ademais, incrementaríanse os esforzos lonxitudinais derivados da flexión da viga casco, como consecuencia da concentración de empuxes ao longo do paso da onda. Como contrapartida, na navegación de amura, o buque experimenta maiores esforzos de torsión.

Tendo en conta que o período natural de cabeceo adoita ser menor ao período de encontro da onda, débese reducir a velocidade de maneira que se evite que ambos períodos se asemellen, o que aumentaría a violencia do cabeceo e podería derivar nunha situación de sincronismo lonxitudinal. Outra consecuencia da velocidade inadecuada, neste caso excesiva, é a caída do período de encontro da onda por debaixo do período natural de cabeceo do buque, o que provoca que este oscile segundo o seu período de cabeceo natural, con máis posibilidades de somerxer a proa e facer emerxer a popa. Aqueles buques que naveguen en lastre deberán adoptar unha redución maior, xa que son máis propensos a experimentar unha emersión da hélice. Obviamente, o buque experimentará tamén unha perda de velocidade involuntaria como consecuencia do aumento da resistencia ao avance que xera a ondada e da forza do vento sobre a superestrutura. En xeral, a velocidade debe ser suficiente para manter o goberno do buque, fundamentalmente no caso de navegar cun gran asentamento debido ás guinadas que se poden producir. Tampouco debe ser excesiva para evitar os efectos negativos sobre os movementos do buque, a cavitación da hélice e o traballo da propulsión sobre unhas revolucións críticas.

Por último resulta tamén importante atender á relación do cabeceo co movemento de balance, xa que, aínda que as perdas de estabilidade que se produzan sobre a crista da onda non se prolongan no tempo, poden dar lugar a unha situación de balance paramétrico.

Se se pretende manobrar de maneira que se abandone a navegación co mar a proa do través para pasar a navegar co mar a popa, débese virar con bo criterio e da maneira máis rápida posible para evitar os riscos de quedar atravesado ao mar. Por este motivo, cómpre realizar a manobra durante uns dos períodos de máis calma, procurando evitar o impacto de ondas de través, e co máximo ángulo de temón. A velocidade deberá ser adecuada para obter un momento evolutivo suficiente e vencer a resistencia que ofrece o temón metido todo a unha banda pero non excesivamente alta, xa que se podería producir cabezadas violentas. Durante a manobra, cabe esperar un forte balance a sotavento cando o buque se atravesa ó mar.

### **6.3 Navegación con mar a popa do través**

A navegación en condicións meteorolóxicas adversas co mar a popa do través coñécese como correr o temporal. Xeralmente, non presenta movementos tan violentos como a navegación con mar a proa do través, sen embargo, presenta moitos efectos negativos propios a ter en conta. De maneira análoga a navegación de amura con mar a proa do través, neste caso resulta recomendable recibir o vento e a ondada pola aleta para obter un movemento máis relaxado. No caso de que as forzas incidan directamente sobre a popa, poden darse dúas situacións dependendo de se se produce ou non a rotura da onda sobre o casco do buque. No primeiro caso, adoita afectar a buques de pequeno francobordo e que navegan a unha velocidade reducida. O buque cae no seno da onda e non ascende ao paso da crista, senón que recibe o impacto da onda na popa podendo dar lugar a serios danos. No segundo caso, a onda pode inducir o efecto de surf-riding como consecuencia do arrastre que lle imprime ao buque.

Non cabe dúbida que na navegación co mar a popa do través se ve comprometida a capacidade de goberno do buque, xa que, as probables emersións da popa que se producen e a xeración de turbulencias reducen en gran medida o fluxo de auga a través do temón. A consecuencia disto pode producirse o fenómeno de broaching e o risco de desviacións bruscas do rumbo.

Tamén será preciso manter unha velocidade axeitada. Unha velocidade reducida pode provocar a ruptura das ondas na popa do buque e a perda total do goberno do buque. Por outro lado unha velocidade excesiva pode dar lugar ó risco por impacto sucesivo de ondas altas e un incremento das posibilidades de que aconteza o surf-riding e a emersión da hélice. En calquera caso, é importante manter a velocidade mínima que permita o goberno do buque, xa que o efecto do abatemento sobre este será moi destacado. Adicionalmente haberá que adaptar a velocidade de maneira que a relación entre os períodos de cabeceo e encontro da onda reduza a posibilidade de navegación sobre a crista da onda durante longos períodos de tempo, co seu consecuente impacto para a estabilidade. De producirse isto último, o broaching pode resultar máis perigoso, polo que correr un temporal pode resultar inadecuado para buques con estabilidade reducida.



Figura 6.3.1 – Ruptura de ondas na popa do buque (Kosnik, M. , 2016)

Se se pretende manobrar de maneira que se abandone a navegación co mar a popa do través para pasar a navegar co mar a proa, débese reducir a velocidade todo o posible para iniciar a viraxe. Cando o buque navegue atravesado ó mar durante a manobra, cabe esperar un forte balance a sotavento.



## 6.4 Navegación ao paio

Cando as condicións meteorolóxicas comezan a xerar problemas serios, pode que sexa preciso antepoñer a manobra que favoreza a seguridade do buque fronte á derrota prevista dende o punto de vista económico. Preto da costa, nalgúns zonas, pode atoparse abrigo, de maneira que o problema quede solucionado. Sen embargo, haberá que ter en conta o maior efecto de arrastre que xeran as ondas en augas pouco profundas e a maior posibilidade de facer fronte rompentes.

Por outro lado, se o buque se atopa en alta mar, esta manobra consiste en reducir a velocidade á mínima de goberno, mantendo o buque practicamente parado respecto ao fondo navegando proa ó mar. As principais desvantaxes a ter en conta son a posibilidade de que se produza rotura das ondas contra a proa do buque, incremento de esforzos lonxitudinais e movementos de cabeceo máis violentos.

## 6.5 Navegación ao garete

Como último recurso ante unha situación desfavorable, pode decidirse deter completamente a máquina do buque e deixar que este sometido ao movemento que lle imprimen as ondas. Esta actuación basease en que un obxecto que flota, cuxas dimensións son moito máis reducidas que a das ondas, se mantén flotando seguindo o desprazamento destas últimas. Deste xeito o buque sofre unha deriva considerable, polo que non debe ser un método a empregar preto da costa, e adopta unha posición de equilibrio en función das forzas externas. Esta posición debería reducir os esforzos debidos á navegación enfrontando ó mar e minimizar o embarque de auga, xa que a forte deriva evitará que as ondas rompan sobre o casco. Sen embargo, o movemento forzado do buque inducirá balances violentos e pode derivar en sincronismo. Polo tanto, o buque debe contar cunha altura metacéntrica transversal adecuada, un peche estanco permanente en bo estado e unha carga que non sexa susceptible de correrse, de non ser así, este método debe descartarse.



Unha acción adicional en caso de extremo perigo é verter aceite animal ou vexetal na banda de barlovento do buque en cantidade suficiente para reducir a enerxía da ondada e evitar as ondas rompentes. Pode empregarse o aceite lubricante pero débese evitar o uso de aceites pesados e minerais. O seu impacto será variable, pero, no caso do mar de fondo, a súa efectividade será reducida ou inexistente.

## **6.6 Emprego das áncoras**

A decisión de fondear en condicións de mal tempo está continuamente marcada pola posibilidade de garrar cara un obstáculo. Unhas condicións adversas, atopándose o buque fondeado, poden afrontarse fondeando outra áncora, aumentando a lonxitude de cadea fondeada ou empregando o empuxe da máquina como axuda. A función principal da áncora en relación ao tema que se trata, sen embargo, é a de reducir a deriva do buque ou conseguir que este faga cabeza en situación de emerxencia. No caso de que o buque perda a súa propulsión ou esta sexa insuficiente para deter a deriva contra un obstáculo, poden empregarse as áncoras para tratar de controlar o movemento se a profundidade non é excesiva.

Por outro lado, existe o que se coñece como áncora flotante. Trátase dun obxecto flotante que exerza resistencia sobre a auga de maneira que reduza a tendencia a guinar do buque e o abatemento, aproando o buque ao vento. Isto é practicable en buques de pequena eslora, pero non nos grandes mercantes, onde as dimensións de tal obxecto non resultan manexables. Nunha emerxencia, apear as áncoras inmediatamente por debaixo da superficie da auga pode exercer un efecto similar, sen embargo, débese ter en conta tamén a posibilidade de que impacten contra o casco.

## **6.7 Navegación en ciclóns tropicais**

Cando se navega nas inmediacións dun perigo da magnitude dun ciclón tropical, débense ter en conta todas as situacións anteriores e reforzar as medidas xerais

para afrontar situacións meteorolóxicas adversas. Adicionalmente, un fenómeno de semellante complexidade require ter en conta consideracións que lle son características. Así, neste caso, faise fundamental verificar periodicamente rumbo e velocidade do buque e da perturbación coa fin de manter o buque afastado da mesma e máis precisamente, do seu centro. A aproximación ó centro da tormenta, non só supón un aumento da intensidade da mesma, senón que de chegar ao ollo do ciclón preséntase unha situación de ondada extremadamente confusa.

En ocasións pode que non sexa posible tomar un rumbo evasivo con suficiente antelación e o buque se atope dentro do radio da acción da tormenta. Nese caso haberá que dividir a mesma pola súa traxectoria nun semicírculo navegable e un semicírculo perigoso. O semicírculo perigoso é aquel na que a acción do vento e a velocidade da tormenta sobre a traxectoria se suman para tender a levar ao buque cara o centro da mesma. Pola contra o semicírculo navegable é aquel na que ambas velocidades se opoñen, brindando unha situación máis favorable. No hemisferio norte, o semicírculo perigoso será o dereito e o navegable o esquerdo, mentres que no hemisferio sur sucederá ao contrario.

Para determinar a situación do buque en relación á tormenta poden empregarse tres recursos. O primeiro, é comprobar o cambio de presión, de maneira que se esta aumenta, o buque atoparase por detrás do centro da tormenta mentres que de diminuír, se atoparía na súa traxectoria. Outra posibilidade consiste no ploteo do ciclón de maneira que se determine a súa traxectoria. Por último, a regra de Buys Ballot pode proporcionar unha orientación fiable sempre que o buque se atope parado, para evitar que o vento aparente induza a unha acción errónea.

Unha vez determinada a posición relativa do buque, será preciso manobrar de acordo coa situación que se presente máis favorable. O emprego de representacións e cálculos de cinemática coa fin de determinar dita manobra é a base máis fiable para a toma de decisións. A continuación describíense algunhas regras prácticas (Molina, J., 2019) [\[14\]](#)

**a. Buque situado no semicírculo perigoso**

Recoméndase adoptar o rumbo que deixe o vento pola amura de estribor ( $045^{\circ}$  relativo) no hemisferio norte e pola de babor ( $315^{\circ}$  relativo) no hemisferio sur. O buque verase sometido con grande probabilidade ás condicións do apartado 6.2 (Navegación con mar a proa do través) cun impacto incrementado debido á intensidade das forzas externas. O maior desafío neste caso para manter o rumbo serán os fortes movementos de cabeceo xunto cos seus efectos de slamming e emersión da hélice que darán lugar a aceleracións e desaceleracións bruscas e perda de capacidade de goberno.

**b. Buque situado no semicírculo navegable**

Recoméndase deixar o vento pola aleta de estribor ( $135^{\circ}$  relativo) no hemisferio norte e pola de babor ( $225^{\circ}$  relativo) no hemisferio sur. Neste caso o buque verase sometido con maior probabilidade ás condicións establecidas no apartado 6.3 (Navegación con mar a popa do través) cunha maior relevancia debido á intensidade das forzas externas. Manter o rumbo previsto será moi dificultoso debido á forte tendencia a guinar e deberase ter especial coidado con atravesarse ó mar e as perdas de estabilidade.

**c. Buque situado por diante da traxectoria do ciclón**

Para abandonar rapidamente a traxectoria inmediata sen expoñerse ao risco de navegar de través déixase o vento pola aleta de estribor ( $160^{\circ}$  relativo) no hemisferio norte e pola de babor ( $220^{\circ}$  relativo) no hemisferio sur. Unha vez chegado ao semicírculo navegable procédese como na situación b.

**d. Buque situado por detrás da traxectoria do ciclón**

Búscase afastarse do centro da tormenta polo rumbo que resulte unha navegación máis adecuada dende o punto de vista da economía, a operatividade, a habitabilidade e a supervivencia do buque, tendo en conta a traxectoria prevista do ciclón en cada hemisferio.

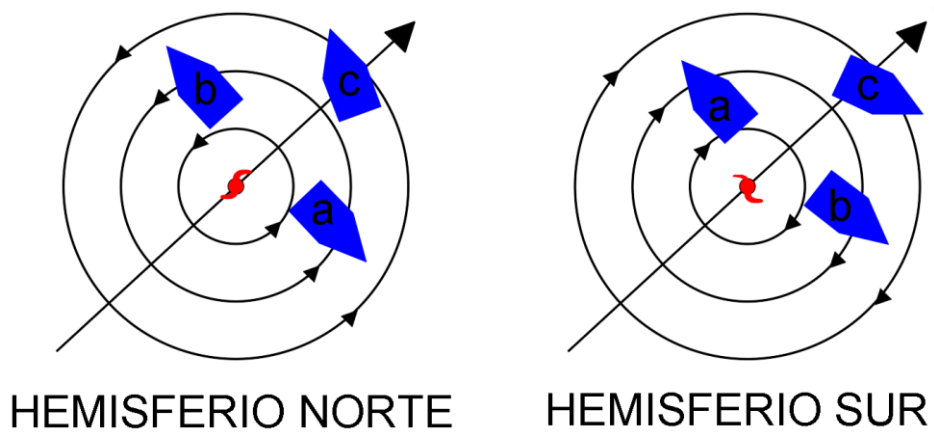


Figura 6.7.1 – Manobras para afastarse da traxectoria do ciclón tropical

## CONCLUSIÓNS FINAIS

Partindo das premisas iniciais sobre a importancia da meteoroloxía adversa no transporte marítimo, demostrouse a mesma dentro do ámbito internacional e histórico. As recomendacións da OMI en combinación coa publicación da aseguradora The Swedish Club, poñen de manifesto a preocupación que existe sobre o punto de vista operativo fronte a meteoroloxía adversa. Queda desbotada polo tanto a posibilidade de que esta sexa unha preocupación unicamente do deseño e que fose superada polos avances tecnolóxicos actuais. Como reforzo, os casos prácticos mostran ata que punto o factor humano sobre a navegación con mal tempo pode causar un desenlace fatal.

Analizando a elección da estabilidade e os esforzos estruturais como factores críticos para o estudo deste tema, faise patente que se repiten en cada apartado, debido á súa relevancia. A súa íntima relación co criterio de actuación final e entre si, tece o desenrolo de toda a exposición. Polo tanto, non sería precipitado falar de que un oficial preparado precisa ter moi presentes estes dous factores á hora de afrontar unha situación de meteoroloxía adversa, aínda que non sexan os únicos.

Os esforzos que experimenta o buque durante a navegación entre ondas deberían ser soportados polo seu deseño sempre que este se manteña correctamente e non se someta a sobrecargas, dende o punto de vista da distribución dos pesos ou da propia navegación. A fatiga dos materiais asume un papel preponderante na limitación da vida útil do buque, polo que resulta recomendable reducir os principais factores que a inducen, os esforzos lonxitudinais e as vibracións.

En canto a estabilidade é un factor básico na supervivencia do buque. Manter unha estabilidade estática transversal positiva debe ser sempre unha prioridade. Con esta fin se establecen os criterios de estabilidade da OMI, pero non se debe esquecer que se trata de criterios mínimos, e que o buque se pode ver exposto a situacións excepcionais. Tamén se lle debe unha especial mención ao efecto de superficies libres e á perda de estabilidade na crista da onda. Estes son factores

que requiren que o buque conte cunha reserva de estabilidade que lle permita saír airoso en caso dunha diminución da altura metacéntrica.

O coñecemento, mesmo de carácter xeral, da mecánica do mal tempo resulta básica para comprender a motivación da actuación a levar a cabo. O criterio de actuación baséase en evitar os efectos negativos que xera a ondada, e o seu estudo sen un coñecemento previo dos parámetros da ondada resultaría infrutuoso. É máis, a determinación dunha derrota adecuada, primeira medida de seguridade contra a meteoroloxía adversa, pasa indubidablemente por un coñecemento básico do seu comportamento.

En definitiva, a navegación con mal tempo comeza pola prevención. O emprego dos servizos e avisos meteorolóxicos permite anticipar as condicións de navegación que o buque vai atopar na súa travesía. Mesmo se estes prognósticos están sometidos a pequenos erros, o oficial debe poder identificar unha situación de risco potencial e interpretar os resultados das súas observacións. Desta maneira, a elección da derrota é o primeiro paso a tomar.

Outras preparacións pasan por contar cun Sistema de Xestión da Seguridade eficiente que contemple a meteoroloxía adversa como un procedemento concreto, aplicado ó buque en cuestión e que estableza claramente cando e como debe ser usado. Desta maneira o capitán ten á súa disposición un recurso eficiente como apoio á toma de decisións e redúcense as posibilidades de que se produza algún tipo de erro na preparación contra o mal tempo.

Nos casos nos que non sexa posible evitar incorrer no risco, o buque atoparase preparado para facerlle fronte. O oficial debe saber identificar os fenómenos perigosos que se nomean no traballo e como reaccionar a eles, preferiblemente, contando cun procedemento de apoio. En xeral, a velocidade reducida de navegación e a adopción dun rumbo de aleta ou amura son as actuacións máis destacadas.

De maneira máis concreta, pódese concluír que a navegación co mar a proa do través produce esforzos estruturais maiores que navegando de popa. Isto débese

a fenómenos como o slamming, a emersión de hélice e o embarque de auga. Todos eles son fenómenos dependentes do movemento de cabeceo. Pola contra, a navegación con mar de popa ao través está fortemente influenciada pola perda de estabilidade, a caída ao través, o surf-riding e a perda de goberno.

Finalmente, pódese concluír, que empregando o coñecemento teórico subxacente aplicado á identificación dos fenómenos perigosos, o buque pode trazar unha derrota eficiente sen incorrer en riscos innecesarios. En cada momento, o oficial será consciente de que factores comprometen a navegación e onde centrar a súa atención. Desta maneira, a navegación con mal tempo deixa de ser unha situación difusa para perfilarse como un risco real, pero que pode ser afrontado se se opera dunha maneira adecuada.

## Bibliografía e referencias

[1] The Swedish Club, (2014) “Heavy weather” *The Swedish Club* [En liña] dispoñible en:

[https://www.swedishclub.com/media\\_upload/files/Publications/Loss%20Prevention/Heavy%20Weather\\_2014-06-30.pdf](https://www.swedishclub.com/media_upload/files/Publications/Loss%20Prevention/Heavy%20Weather_2014-06-30.pdf) [Data de consulta: 08/07/2019]

[2] Comité de Seguridade Marítima Organización Marítima Internacional, (2007) “MSC.1/Circ.1228: Orientación revisada que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas en condiciones meteorológicas y estados de la mar adversos” *IMODOCS*. [En liña] dispoñible (previo rexistro gratuíto) en:

<https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=41706> [Data de consulta: 29/06/2019]

[3] Comité de Seguridade Marítima Organización Marítima Internacional, (1995) “MSC/Circ.707: Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas” *Transports Styrelsen* [En liña] dispoñible en:

<https://www.transportstyrelsen.se/contentassets/ba27c65623914233bf04cb2885e4b26d/707.pdf> [Data de consulta 29/06/2019]

[4] Comité de Seguridade Marítima Organización Marítima Internacional, (2008) “MSC.267(85): Adopción del Código Internacional de Estabilidad sin Avería” *Boletín Oficial del Estado* [En liña] dispoñible en:

[https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-5295](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-5295) [Data de consulta: 29/06/2019]

[5] Meteogalicia “Prognósticos marítimos. Manual de estilo” (2003) en *Meteogalicia* [En liña] dispoñible en:

[https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/meteo/docs/prediccion/maritima/manual\\_estilo\\_gl.pdf](https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/meteo/docs/prediccion/maritima/manual_estilo_gl.pdf) [Data de consulta: 01/04/2019]

[6] AEMET “Escalas de viento y oleaje” (2015) en *AEMET* [En liña] dispoñible en: [https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/maritima/escalas\\_de\\_viento\\_y\\_oleaje.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/maritima/escalas_de_viento_y_oleaje.pdf) [Data de consulta: 01/04/2019]

[7] Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos. Delegación en Galicia. (2008) “Diccionario Galego de Construción Naval” *Diccionario Galego de Construción Naval* [En liña] dispoñible en:

<http://www.diccionarionavalgalego.ingenierosnavales.com/?lang=gl> [Data de consulta: 07/08/2019]



- [8] Olivella, J., (1998) *Teoría del buque. Ola trocoidal, movimientos y esfuerzos*. Barcelona, Edicións UPC
- [9] Ministerio de Fomento, Gobierno de España, (2019) “FAQ - redes de medida/predicciones” en *Puertos del Estado* [En liña] dispoñible en: <http://www.puertos.es/es-es/Paginas/FAQ.aspx> [Data de consulta: 30/06/2019]
- [10] Organización Meteorolóxica Mundial, (2017) “Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorolóxicos” *Organización Meteorolóxica Mundial* [En liña] dispoñible (previo rexistro gratuito) en: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3664](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3664) ou [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=5280#.XVf8VOgzaUk](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=5280#.XVf8VOgzaUk) [Data de consulta: 02/07/2019]
- [11] Organización Meteorolóxica Mundial, (1998) “Guía para el análisis y pronóstico de las olas” *Organización Meteorolóxica Mundial* [En liña] dispoñible en: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3108](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3108) [Data de consulta: 02/07/2019]
- [12] García, L., (2019) “Curso de meteorología y oceanografía”. *Armada Española* [En liña], dispoñible en: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/ShowBinaryServlet?nodePath=/BEA%20Repository/Desktops/Portal/ArmadaEspañola/Pages/mardigitalbiblioteca/06oceanografia/06oceanografia-es/doc999curmetoceanoo//archivo> [Data de consulta: 05/07/2019]
- [13] House, D.J. (2004) *Seamanship techniques. Shipboard and marine operations*. Terceira edición. Oxford, Elsevier (Butterworth Heinemann)
- [14] Molina, J., (2019) “Ciclones tropicales” *Divulgameteo* [En liña] dispoñible en: <http://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Ciclones-tropicales-JMolina.pdf> [Data de consulta: 14/08/2019]
- [15] Landsea, C. (2019) “¿Cómo se forman los ciclones tropicales?”. *National Oceanic and Atmospheric Administration* [En liña] dispoñible en: [https://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A15\\_esp.html](https://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A15_esp.html) [Data de consulta: 14/08/2019]
- [16] National Aeronautics and Space Administration (2019) “¿Cómo se forman los huracanes?” *NASA Spaceplace* [En liña] dispoñible en: <https://spaceplace.nasa.gov/hurricanes/sp/> [Data de consulta: 14/08/2019]

- [17] National Oceanic and Atmospheric Administration (2019) "What is the Mariner's 1-2-3 rule?" *National Ocean Service* [En liña] disponible en: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/mariner123.html> [Data de consulta: 14/08/2019]
- [18] Organización Marítima Internacional (2014) *Convenio SOLAS*. Sexta edición. Londres, OMI.
- [19] Organización Hidrográfica Internacional (2009) "Manual conjunto OMI/OHI/OMM relativo a la información sobre seguridad marítima (ISM)". *Organización Hidrográfica Internacional* [En liña], Mónaco, Bureau Hidrográfico Internacional, disponible en: [https://www.iho.int/iho\\_pubs/standard/S-53-Jul09-S.pdf](https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-53-Jul09-S.pdf) [Data de consulta: 03/07/2019]
- [20] Louzán, F. e Iglesias, S. (2015) *Manual de comunicaciones marítimas*. Segunda edición. A Coruña, Ediciones Cartamar.
- [21] George, W. (1990) *Stability and trim for the ship's officer*. Terceira edición. Centreville, Cornell Maritime Press.
- [22] United States Naval Academy (2017) "Principles of Ship Performance" [En liña] disponible en: [https://www.usna.edu/NAOE/\\_files/documents/Courses/EN400/00.0%20EN400%20Course%20Notes,%20May%202017.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/00.0%20EN400%20Course%20Notes,%20May%202017.pdf) [Data de consulta: 25/03/2019]
- [23] Aláez, J. (1996) "Comportamiento del buque en la mar". Repositorio Universidade da Coruña [En liña], A Coruña, disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/8921/CC20art2ocr.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Data de consulta: 15/04/2019]
- [24] Ministerio de Fomento, Gobierno de España, (1999) "ROM 3.1-99 Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación". *Puertos del Estado* [En liña] Madrid, disponible en: [http://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%203\\_1-99.pdf](http://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%203_1-99.pdf) [Data de consulta: 23/05/2019]
- [25] Baltra, G. (2017) "Resonancia paramétrica (parametric rolling)". *Revista de Marina* [En liña], disponible en: <https://revistamarina.cl/revistas/2005/5/baltra.pdf> [Data de consulta: 14/07/2019]
- [26] De Juana, J. (2015) "Fenómenos dinámicos de estabilidad de un buque en olas longitudinales: resonancia paramétrica, influencia en el proyecto y equipo.

Guía operacional al capitán“ *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (Universidad Politécnica de Madrid)* [En liña], dispoñible en:

[http://oa.upm.es/39821/1/JAVIER\\_DE\\_JUANA\\_GAMO.pdf](http://oa.upm.es/39821/1/JAVIER_DE_JUANA_GAMO.pdf) [Data de consulta: 14/07/2019]

[27] Sub-Committee on ship design and construction, Organización Marítima Internacional (2015) “Finalization of second generation intact stability criteria” *IMODOCS* [En liña], dispoñible en:

<https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=95017> [Data de consulta: 28/07/2019]

[28] Bonilla, A. , (1972) *Teoría del buque*. Segunda edición. Cádiz.

[29] Lloyd, A., (1998) *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*. Segunda edición. Hampshire, ARJM Lloyd.

[30] Rawson, K.J. e E.C. Tupper, (2002) *Basic ship theory*. Quinta edición. Pondicherry, Butterworth Heinemann.

[31] López, G. e V.Benita. *Estructura del buque. Tecnología y cálculo*. Cádiz. JIMÉNEZ-MENA

[32] Okumoto, Y. et al., (2009) *Design of Ship Hull Structures. A Practical Guide for Engineers*. Springer

[33] Freire, R. “Apuntes de Teoría do Buque” ETS Náutica e Máquinas. A Coruña.

[34] Danish Maritime Accident Investigation Board, (2014). “Maritime Accident Report. September 2014. SVENDBORG MÆRSK. Heavy weather damage on 14 February 2014.” *DMAIB*. [En liña] dispoñible en:

<https://dmaib.com/media/9104/svendborg-maersk-heavy-weather-damage-on-14-february-2014.pdf> [Data de consulta: 21/08/2019]

[35] National Oceanic and Atmospheric Administration, (2019) “Significant Wave Height” *National Weather Service*. [En liña] dispoñible en:

<https://www.weather.gov/mfl/waves> [Data de consulta: 21/08/2019]

[36] Marine Accident Investigation Branch, (2019) “Report on the investigations of heavy weather damage on board the container ship Maersk Newport 50 miles west of Guernsey on 10 November 2008 and fire alongside at the container berth in Algeciras, Spain on 15 November 2008” *GOV.UK* [En liña] dispoñible en:

<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c71c640f0b60241000151/MaerskNewportReport.pdf> [Data de consulta: 22/08/2019]

- [37] Comisión Permanente de Investigación de Siniestros Marítimos, (2017) “INFORME SOBRE EL ACCIDENTE DEL BUQUE “PRESTIGE” en el Dispositivo de Separación de Tráfico de Finisterre. el día 13 de noviembre de 2002” *Ministerio de Fomento. Gobierno de España*. [En liña] dispoñible en: [https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/pdf/407AF7E2-D2FC-496A-B327-5F29F8C963A1/55204/Prestige13Nov2002.pdf](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/pdf/407AF7E2-D2FC-496A-B327-5F29F8C963A1/55204/Prestige13Nov2002.pdf) [Data de consulta: 23/08/2019]
- [38] Permanent Commision of Investigation into Accidents at Sea (2015) “Total loss of the Italian chemical tanker IEVOLI SUN in the English Channel. 30 October 2000” *BEAmer* [En liña] dispoñible en: [http://www.bea-mer.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/RET\\_IEVOLI\\_SUN\\_En\\_Site.pdf](http://www.bea-mer.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/RET_IEVOLI_SUN_En_Site.pdf) [Data de consulta: 25/08/2019]
- [39] Commission permanente d’enquête sur les événements de mer, (2015) “Perte totale du navire Chimiquier italien IEVOLI SUN Survenue en Manche le 30 octobre 2000” *BEAmer* [En liña] dispoñible en: [http://www.bea-mer.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/RET\\_IEVOLI\\_SUN\\_Site.pdf](http://www.bea-mer.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/RET_IEVOLI_SUN_Site.pdf) [Data de consulta: 25/0/2019]
- [40] Barass, B., (2000) *Ship Stability: Notes and Examples*. Terceira edición. Butterworth Heinemann
- [41] House, D.J. (2002) “Manoeuvring the vessels in heavy weather at sea”. *Scribd* [En liña] Dispoñible en <https://es.scribd.com/document/292089665/Manoeuvring-the-Vessels-in-Heavy-Weather-at-Sea> [Data de consulta: 10/08/2019]
- [42] Babicz, J., (2011) *Ship stability in practice*. Gdansk, Baobab Naval Consultancy.
- [43] Clark. I.C., (2005) *Ship dynamics for mariners*. Londres, The Nautical Institute
- [44] Carracedo, S. “Apuntes de Manobra I” ETS Náutica e Máquinas. A Coruña.

## DEFINICIÓNS E ABREVIATURAS

- **Abanico:** Ensanche dos finos da proa na súa parte alta.
- **Abatemento:** Efecto do vento de desviar ó buque do seu rumbo inicial.
- **ABS:** American Bureau of Shipping.
- **Amortecemento:** Efecto que tende a reducir progresivamente as amplitudes das oscilacións.
- **Amplitude:** Distancia entre as posicións extremas dun ciclo.
- **Apéndice:** Elemento que sobresa da estrutura do casco.
- **Arribar:** Caer a proa na dirección oposta a onde vén o vento.
- **Arrufo:** Situación na que o buque experimenta maior empuxe nas cabezas que na sección media.
- **Barométrico:** Que garda relación coa presión.
- **Borrasca:** Zona de baixas presións.
- **Buque de cagas pesadas:** Buque especializado no transporte de cargas sobredimensionadas.
- **Buque graneleiro:** Buque que transporta carga a granel.
- **Buque mercante:** Buque dedicado ao transporte de mercancías ou pasaxeiros cun fin económico.
- **Buque portacontedores:** Buque dedicado ao transporte de mercancías en recipientes denominados contedores.
- **C:** Centro de carena.
- **c:** Velocidade de fase da onda.
- **C':** Centro de carena tras a inclinación.
- **Cabeza:** Refírese a un dos extremos da estrutura do buque, proa ou popa.
- **CEHIPAR:** Centro de Experiencias Hidrográficas del Pardo.
- **CIAIM:** Comisión Permanente de Investigación de Sinistros Marítimos.
- **Circ.:** Expresión que emprega a OMI para denominar as circulares.
- **C<sub>L</sub>:** Liña central
- **Corrente mariña:** Traslado dunha masa de auga dun lugar a outro como consecuencia de gradientes de temperatura e salinidade.
- **Crista:** Máximo de altura da onda.
- **D:** Distancia de amortecemento.

- **Desprazamento:** Peso do buque para unha condición determinada de carga ou lastre.
- **DMAIB:** Maritime Accident Investigation Board.
- **E:** Empuxe.
- **EC:** Esfuerzo cortante.
- **Eixes de simetría:** Eixes fixos no centro do buque aos que se referencian as súas coordenadas.
- **Embornais:** Aberturas que permiten o desaloxo da auga que queda acumulada na cuberta ó exterior.
- **EN:** Eixe neutro.
- **Escala Beaufort:** Medida da intensidade do vento.
- **Escala Douglas:** Medida da altura das ondas.
- **Escobén:** Conexión da cuberta do castelo co exterior do casco para o paso da cadea da áncora.
- **Escora permanente:** Escora sobre a que balancea o buque no caso dunha distribución irregular dos pesos.
- **Estabilidade inicial:** Conxunto de inclinacións menores a  $10^{\circ}$
- **Estabilizador:** Apéndice do casco de menor extensión lonxitudinal que a quilla de balance e que sobresa máis. Pode ser fixo ou retráctil.
- **Estopor:** Sistema de trincado da cadea que evita que a tensión actúe directamente sobre o molinete cando se fondea.
- **F:** Centro de flotación.
- **Fetch:** Zona sobre a que actúa o vento.
- **Finos:** Formas das cabezas que se distancian da sección cadrada co casco.
- **Forza recuperadora:** Forza que tende a devolver un sistema á súa situación de equilibrio.
- **Fricción:** Efecto de rozamento que presentan dúas masas en contacto.
- **g:** Aceleración da gravidade / centro de gravidade do compartimento.
- **G:** Centro de gravidade.
- **g':** Centro de gravidade virtual do compartimento.
- **GM<sub>L</sub>:** Altura metacéntrica lonxitudinal
- **GM<sub>T</sub>:** Altura metacéntrica transversal

- **Gradiente:** Variación dun parámetro.
- **GZ:** Brazo adrizante
- **H/L:** Pendente da onda.
- **H:** Altura da onda.
- **Hidrodinámica:** Conxunto de forzas relacionadas con augas axitadas.
- **Hidrostática:** Conxunto de forzas relacionadas coas augas tranquilas.
- **H<sub>o</sub>:** Altura das ondas á saída da zona xeradora.
- **H<sub>s</sub>:** Altura significativa da ondada.
- **IACS:** International Association of Classification Societies.
- **L:** Eslora do buque (na fórmula no que se indica)
- **L:** Lonxitude da onda .
- **Liña de auga:** Cada un dos resultados da intersección de planos horizontais paralelos á cuberta co casco do buque.
- **Liña de flotación:** Liña de auga da que flota o buque.
- **m:** Manga do buque no apartado 3.1.1
- **m:** Metros
- **M':** Falso metacentro.
- **MAIB:** Marine Accident Investigation Branch.
- **Mar completamente desenrolado:** Situación na que as ondas non aumentan de tamaño aínda que siga actuando o vento.
- **METAREAs:** Zonas de responsabilidade sobre os servizos meteorolóxicos.
- **MF:** Momento flexor.
- **M<sub>L</sub>:** Metacentro lonxitudinal.
- **Molinete:** Maquinaria de cuberta que permite o izado e arriado da cadea.
- **Momento evolutivo:** Efecto da forza sobre un brazo de actuación que tende a variar o rumbo do buque.
- **Movemento harmónico simple:** Modelo físico que explica o movemento ondulatorio.
- **MSC:** Maritime Security Committee, Comité de Seguridade Marítima
- **M<sub>T</sub>:** Metacentro transversal.
- **OHI:** Organización Hidrográfica Internacional
- **OMI:** Organización Marítima Internacional
- **OMM:** Organización Meteorolóxica Mundial.

- **Orzar:** Caer a proa na dirección da que vén o vento.
- **P:** Pesos
- **Par( $\theta$ ):** Par escorante
- **Perturbación sísmica:** Liberación de enerxía como consecuencia de fenómenos xeolóxicos.
- **Puntos en fase:** Puntos que comparten a mesma amplitude de oscilación en distintos ciclos.
- **Quebranto:** Situación na que o buque experimenta maior empuxe na sección media que nas cabezas.
- **Quilla de balance:** Apéndice fixo do casco á altura do pantoque.
- **R:** Radio
- **Regra 1-2-3:** Regra empregada para identificar a zona de perigo nun parte meteorolóxico a varios días vista sobre un ciclón tropical.
- **Regra de BuysBallot:** Regra empregada para localizar o centro dun ciclón tropical.
- **Ro-Ro:** Roll on – Roll off, buque de carga rodada.
- **Sección media:** Zona central da vista lonxitudinal do buque.
- **Semilonxitude:** Metade da lonxitude
- **Seno:** Mínimo de altura da onda.
- **SOLAS:** Safety of Life at Sea.
- **S-SW:** Sur-suroeste.
- **Superestrutura:** Calquera tipo de construción que se eleva por enriba da cuberta de intemperie.
- **Superficie de flotación:** Superficie do casco sobre a que flota o buque.
- **SW:** Suroeste.
- **T:** Período de balance
- **Tanque pasivo / tanque activo:** Método de estabilización que emprega o movemento da auga nun tanque especialmente deseñado.
- **T<sub>e</sub>:** Período de encontro da onda.
- **Trocoide:** Figura xeométrica definida por un punto fixo no interior dunha circunferencia de radio (R) a unha distancia constante (d) do seu centro cando esta roda sobre unha recta horizontal.
- **T<sub>w</sub>:** Período da onda.



- **V**: Velocidade do buque.
- **Velocidade mínima de goberno**: Velocidade mínima requirida para que o buque responda ó temón.
- **Vento absoluto ou vento real**: Vento provocado pola mecánica da atmosfera.
- **Vento aparente**: Resultante da combinación da velocidade e rumbo do buque coa dirección e velocidade do vento real.
- **V<sub>w</sub>**: Velocidade de grupo da onda.
- **Z**: (Referido a esforzos) Momento resistente
- **Zona xeradora**: Zona na que se xera a ondada.
- **ΔGZ**: Momento adrizante
- **θ**: Ángulo de inclinación
- **ω<sub>e</sub>**: Frecuencia de encontro onda.
- **ω<sub>w</sub>**: Frecuencia da onda.

## ÍNDICE DE TÁBOAS

[Táboa 2.1.1](#) – Escala Beaufort (Meteogalicia, 2019 [5])

[Táboa 2.2.2.1](#) – Escala Douglas (Meteogalicia, 2013 [5])

## ÍNDICE DE FIGURAS

[Figura 1.1](#) – Frecuencia e custo medio das reclamacións por danos á carga (The Swedish Club, 2014) [1]

[Figura 1.2](#) – Frecuencia e custo medio das reclamacións por danos ao casco e ao equipamento do buque (The Swedish Club, 2014) [1]

[Figura 2.2.1.1](#) – Onda trocoidal, sentido de xiro e parámetros principais. (Orixinal do autor)

[Figura 2.2.1.2](#) – Órbitas e sentido de xiro das partículas da auga en augas profundas e pouco profundas, respectivamente. (Orixinal do autor)

[Figura 2.2.1.3](#) – Perfís da trocoide estable, cicloide e trocoide inestable. (Orixinal do autor)

[Figura 2.2.2.6](#)– Diagrama para a determinación do período de encontro (MSC.1/Circ.1228, 2007) [2]

[Figura 2.2.3.1](#) – Exemplo de ábacos relativos ao fetch e á persistencia do vento, respectivamente. (García, L., 2019) [12]

[Figura 2.3.2.1](#) – Diagrama da estrutura da sección vertical do ciclón tropical no hemisferio norte (Orixinal do autor)

[Figura 2.3.2.2](#) – Regra 1-2-3 que mostra a zona de perigo para os tres días posteriores ao aviso (NOAA, 2019) [17]

[Figura 2.4.1](#) – Zonas METAREA para a coordinación de radioavisos e prognósticos meteorolóxicos (OHI, 2009) [19]

[Figura 3.1](#) – Denominación dos movementos nos seis grados de liberdade (Orixinal do autor)

[Figura 3.1.1.2](#) – Comportamento do par de forzas con estabilidade positiva (a), nula (b) e negativa (c). (Orixinal do autor)

[Figura 3.1.1.3](#) – Curva de estabilidade estática transversal (Bonilla, A. , 1972) [28]

[Figura 3.1.2.3](#) – Par de forzas escorante producido polo vento (Orixinal do autor)

[Figura 3.1.2.5](#) – Curva de momentos adrizantes e momentos escorantes (Bonilla, A. ,1972) [28]

[Figura 3.1.3.1](#) – Comportamento xeral do balance segundo a relación de períodos (Orixinal do autor)

[Figura 3.1.5.1](#) – Xeometría do casco (a) e plano de flotación (b) co seno da onda na sección media (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

[Figura 3.1.5.2](#) – Xeometría do casco (a) e plano de flotación (b) coa crista da onda na sección media (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

[Figura 3.1.5.3](#) – Relación do plano de flotación navegando sobre o seno da onda (arriba) e sobre a crista (abaixo) coa curva de brazos adrizantes (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

[Figura 3.1.6.1](#) – Evolución do balance paramétrico (SDC 3 INF.X, 2015) [27]

[Figura 3.2.1](#) – Par de forzas na estabilidade lonxitudinal onde F é o centro de flotación (Orixinal do autor)

[Figura 3.2.3.1](#) – Exemplos de “slamming” e emersión da hélice

(<https://jamaicacruiseexcursions.com/cruise-ship/carnival-glory/carnival-crash/>)

(<https://3kbo302xo3lg2i1rj8450xje-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2009/01/cruising-nightmare-2.jpg>)

[Figura 3.2.4.1](#) – Representación do broaching ou caída ao través (Kosnik, M. ,

2016)(<https://wiki.mq.edu.au/download/attachments/218039901/worddavic28120278731ee47e775954fea14eee3.png?version=1&modificationDate=1467322097000&api=v2> MACQUAIRE University)

[Figura 3.2.4.3](#) – Diagrama da zona de navegación perigosa sobre a crista das ondas con mar de popa ou aleta (MSC.1/Circ.1228,2007) [2]

[Figura 3.2.5.1](#) – Diagrama da zona de navegación perigosa polo impacto sucesivo de ondas altas (MSC.1/Circ.1228,2007) [2]

[Figura 3.3.1](#) – Variacións dos empuxes e indución do movemento de arfada (Orixinal do autor)

[Figura 4.3.1.1.](#) – Distribución de forzas para condicións de quebranto (esquerda) e arrufo (dereita) (Orixinal do autor)

[Figura 4.3.1.2.](#) – Situacións máis prexudiciais do buque para condición de quebranto (esquerda) e arrufo (dereita)

[Figura 4.3.4.1](#) – Distribución típica do diagrama de cargas (loading), esforzos cortantes (shearing force) e momento flexor (bending moment) (Rawson, K.J. e E.C. Tupper, 2002) [30]

[Figura 4.5.1.](#) – Efecto do paso dun tren de ondas coas cristas coincidentes nas cabezas.

[Figura 5.1.1](#) - SVENDBORG MÆRSK á saída de porto e vista dos contedores a popa no porto de Málaga. (DMAIB, 2014) [34]

[Figura 5.2.1](#) – Portacontedores Maersk Newport e danos na costado de babor vistos dende o castelo (MAIB, 2019) [36]

[Figura 5.3.1](#) – Distribución de tanques de carga e lastre do “Prestige” (CIAIM, 2017) [37]

[Figura 5.3.2](#) – Diagrama de momentos flexores anterior á avaría (CIAIM, 2017) [37]

[Figura 5.3.3](#) – Diagrama de esforzos cortantes anterior á avaría (CIAIM,2017) [37]

[Figura 5.3.4](#) – Diagrama de momentos flexores posterior á avaría (CIAIM,2017) [37]

[Figura 5.3.5](#) – Diagrama de esforzos cortantes posterior á avaría (CIAIM,2017) [37]

[Figura 5.3.6](#) – Situación do buque “Prestige” tras a avaría (CIAIM, 2017) [37]

[Figura 5.3.7](#)- Diagrama de momentos flexores posterior ao lastrado (CIAIM, 2017) [37]

[Figura 5.3.8](#) – Diagrama de esforzos cortantes posterior ao lastrado (CIAM, 2017) [37]

[Figura 5.4.1](#) – Imaxe do buque levoli Sun e do seu posterior afundimento (CPEM,2005) [39]

[Figura 6.1](#) – Diminución da velocidade en meteoroloxía adversa segundo o rumbo relativo (Rawson, K.J. e E.C. Tupper, 2002) [30]

[Figura 6.3.1](#) – Ruptura de ondas na popa do buque (Kosnik, M. , 2016) (<https://wiki.mq.edu.au/download/attachments/218039901/worddav8f4e3a9ff47e88dbce6323c1a158a0d2.png?version=1&modificationDate=1467322098000&api=v2> MARCQUAIRE University)

[Figura 6.7.1](#) - Manobras para afastarse da traxectoria do ciclón tropical (Orixinal do autor)