



ANÁLISE DA ESTABILIDADE INTACTA DE NAVIOS DE APOIO OFFSHORE
SOB PERSPECTIVA DA SEGUNDA GERAÇÃO DE CRITÉRIOS DE
ESTABILIDADE DA IMO

Flávia Vieira Monteiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Rio de Janeiro
Novembro de 2017

ANÁLISE DA ESTABILIDADE INTACTA DE NAVIOS DE APOIO OFFSHORE
SOB PERSPECTIVA DA SEGUNDA GERAÇÃO DE CRITÉRIOS DE
ESTABILIDADE DA IMO

Flávia Vieira Monteiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança, D.Sc.

Dr. Mauro Costa de Oliveira, D.Sc.

Dr. Marcelo de Araujo Vitola, D.Sc.

Dr. Luiz Cristovão Gomes Coelho, D.Sc..

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2017

Monteiro, Flávia Vieira

Análise da Estabilidade Intacta de Navios de Apoio Offshore sob perspectiva da Segunda Geração de Critérios de estabilidade da IMO/ Flávia Vieira Monteiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

X, 177 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 173-177.

1. Critérios de Estabilidade. 2. Segunda Geração da IMO 3. Modos de Falha de estabilidade intacta. I. Castillo, Claudio Alexis Rodríguez. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Aos meus pais Carmelita e Ansilio e aos
meus irmãos Felipe e Leticia.

Agradecimentos

Ao Prof. Claudio Alexis Rodríguez Castillo, pela orientação e apoio durante o desenvolvimento da minha dissertação e nesta etapa da minha vida acadêmica.

Aos professores do Programa de Engenharia Oceânica, em especial aos professores da área de Hidrodinâmica, pelos conhecimentos e conselhos oferecidos na minha formação acadêmica.

Aos amigos do mestrado, pelos debates e troca de conhecimentos que tornaram as disciplinas menos árduas e mais divertidas.

Aos membros do grupo de investigação de estabilidade dinâmica, o Prof. Marcelo Neves, Mauro, Lula, o Prof. Paulo de Tarso, Bruno e Rafael. Os valiosos debates contribuíram grandemente no meu enriquecimento acadêmico.

Ao Programa de Recursos Humanos (PRH) da Agência Nacional do Petróleo (ANP), à Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (COPPETEC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Aos meus amigos e namorado que inúmeras vezes pacientemente me escutaram falando sobre hidrodinâmica e sempre me deram suporte.

Finalmente e principalmente, à minha família, em especial aos meus pais, Carmelita e Ansilio e meus irmãos Felipe e Leticia, por todo incentivo ao longo do curso de mestrado, sempre me ajudando com conselhos e orientações nas horas de dificuldade e por sempre acreditarem no meu potencial.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DA ESTABILIDADE INTACTA DE NAVIOS DE APOIO OFFSHORE
SOB PERSPECTIVA DA SEGUNDA GERAÇÃO DE CRITÉRIOS DE
ESTABILIDADE DA IMO

Flávia Vieira Monteiro

Novembro/2017

Orientador: Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Programa: Engenharia Oceânica

Um dos principais tópicos de estudo relacionados à segurança, conforto ou operacionalidade de uma estrutura flutuante é a sua estabilidade intacta. Atualmente, as regras em vigor são conhecidas como a primeira geração de critérios de estabilidade da Organização Marítima Internacional (IMO), as quais, em sua maioria, estão embasadas em considerações estáticas. Entretanto, uma série de acidentes relacionados à estabilidade intacta tem demonstrado que os critérios de estabilidade precisavam ser revisados para contemplar modos de falha associados à dinâmica do navio, principalmente em ondas. Assim, em 2002, a IMO propôs uma revisão dos critérios atuais e abriu as discussões para o desenvolvimento de uma segunda geração de critérios de estabilidade, que atualmente estão em fase final de análise e verificação. Os novos critérios avaliam a vulnerabilidade dos navios em de cinco modos de falha de estabilidade: roll paramétrico, perda pura de estabilidade, guinada brusca, estabilidade do navio em condição inoperante e aceleração excessiva. O presente trabalho visa investigar e analisar esses critérios, para o caso de um navio de apoio offshore, tendo como foco o roll paramétrico e a perda pura de estabilidade. Para tal, foi utilizado o programa DSSTAB desenvolvido em paralelo a esse trabalho, tendo como “benchmarking” o porta-contentor C11. Os resultados mostram que o navio PSV estudado não é vulnerável a roll paramétrico e a perda pura de estabilidade, para as condições de carregamento analisadas no primeiro nível. Porém, uma inconsistência aparece entre o primeiro e o segundo nível de perda pura de estabilidade.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF INTACT STABILITY OF OFFSHORE SUPPORT SHIPS UNDER
THE PERSPECTIVE OF THE SECOND GENERATION OF IMO STABILITY
CRITERIA

Flávia Vieira Monteiro

November/2017

Advisor: Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Department: Ocean Engineering

One of the main topics of study related to the safety, comfort or operability of a floating structure is its intact stability. Currently, the rules in use are known as the first generation of stability criteria of the International Maritime Organization (IMO), which are mainly based on static considerations. However, a number of accidents related to intact stability have clearly demonstrated that stability criteria needed to be revised to address modes of failure associated with ship dynamics, especially in waves. Thus, in 2002, the IMO proposed a comprehensive review of the current criteria and opened discussions to develop a second-generation of stability criteria. The new criteria assess the vulnerability of ships in five modes of stability failure: parametric roll, pure loss of stability, broaching, dead ship condition and excessive acceleration. The present work aims to investigate and analyze these criteria for the case of an offshore support vessel, focusing on the parametric roll and pure loss of stability. For this, the DSSTAB, program developed in parallel to this work, was used, with the container carrier C11 as benchmarking. The results show that the studied PSV vessel is not vulnerable to parametric roll and pure loss of stability for the loading conditions analyzed at the first level. However, an inconsistency is found between the first and second levels of pure loss of stability.

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução	1
1. 1 Generalidade	1
1. 1 Objetivo e organização do trabalho	7
Capítulo 2	8
Critérios de estabilidade da segunda geração	8
2. 1 Modos de Falha	8
2. 2 Perda pura de estabilidade	9
2. 3 Roll paramétrico	11
2. 4 Guinada brusca	14
2. 5 Estabilidade do navio na condição inoperante	21
2. 6 Aceleração excessiva	22
Capítulo 3	24
Critérios de Estabilidade da Segunda Geração: Descrição Matemática.....	24
3.1 Perda pura de estabilidade	24
3.1.1 Primeiro nível	24
3.1.2 Segundo nível	27
3.2 Roll paramétrico:	30
3.2.1 Primeiro nível	30
3.2.2 Segundo nível	33
Capítulo 4	40
Estudo de caso	40
4. 1 Porta-contentor post panamax C11:	40
4.1.1 Perda pura de estabilidade:	40
4.1.1.1 Primeiro Nível:	40

4.1.1.2 Segundo Nível:	42
4.1.2 Roll paramétrico:	47
4.1.2.1 Primeiro Nível:	47
4.1.2.2 Primeiro Nível:	49
4. 2 Navio de Apoio- PSV	58
4.2.1 Perda pura de estabilidade:	61
4.2.1.1 Primeiro Nível:	61
4.2.1.2 Segundo Nível:	63
4.2.2 Roll paramétrico:	69
4.2.2.1 Primeiro Nível:	69
4.2.2.2 Primeiro Nível:	71
Conclusões e Recomendações	80
Apêndice	84
A. Critérios atuais (primeira geração) de estabilidade para um PSV	84
B. Análise da equação linear de roll	85
C. Procedimento para determinar o ângulo de roll com técnica de simulação numérica no domínio do tempo	91
D. Procedimento analítico para determinar o ângulo de roll	99
E. Período Natural de roll	101
F. Método para determinar o caso de onda	103
G. Algoritmo – Perda pura de estabilidade	106
H. Algoritmo e fluxogramas – Roll paramétrico	108
I. Resultados	115
Porta-contentor C11	115
Roll paramétrico	115
Perda pura de estabilidade	124
PSV	132

Roll paramétrico	132
Perda pura de estabilidade	141
J. Critérios de Estabilidade da Segunda Geração: Descrição Matemática 149	
Guinada brusca	149
Primeiro nível	149
Segundo nível	150
Estabilidade do navio na condição inoperante	154
Primeiro Nível	154
Segundo Nível	155
Aceleração Excessiva	166
Primeiro nível	166
Segundo nível	168
Referência Bibliográfica.....	173

Capítulo 1

Introdução

1. 1 Generalidade

Um dos principais tópicos de estudo relacionados à segurança, conforto ou operacionalidade de uma estrutura flutuante é a sua estabilidade intacta. Tipicamente, a estabilidade intacta é analisada do ponto de vista estático, o que para análise de conforto e operacionalidade, é mais do que suficiente. Para essas análises, os critérios da IMO (Organização Marítima Internacional) da primeira geração são utilizados.

A origem da primeira geração do critério de estabilidade intacta que está incluída no Código Internacional de Estabilidade Intacta, o IS CODE 2008 (IMO, 2009), pode ser rastreada até o trabalho pioneiro de Rahola (1939), assim como a primeira versão do critério ambiental desenvolvida em 1950. A história e o desenvolvimento do critério de estabilidade intacta é descrito em Kobylinski e Kastner (2003); um resumo da origem desses critérios também está apresentado no capítulo 3 das notas de explicação do código internacional de estabilidade (MSC.1 /Circ 1281).

Os critérios da Parte A do IS CODE 2008 baseiam-se numa abordagem empírica/estatística tradicional, com exceção do critério ambiental. Os critérios para as embarcações de passageiros associados ao ângulo de inclinação devido ao agrupamento de passageiros em um bordo da embarcação são formulados com base em um modelo matemático baseado na física da inclinação do navio.

O critério ambiental é baseado no modelo matemático do navio com inclinação devida à rajada de vento súbita depois de ter sido excitado por ondas regulares e vento constante. Os parâmetros do critério ambiental foram "ajustados" utilizando uma amostra de população de navios, o que limita sua aplicabilidade, além das hipóteses utilizadas para modelar o modelo matemático. Em resposta a isto, uma abordagem experimental alternativa para o critério ambiental foi também adotada pela IMO, conforme descrito em MSC.1 / Circ.1200 (2006) e em MSC.1 / Circ.1227 (2007).

A IMO fornece critérios de estabilidade gerais e específicos para algumas embarcações. O critério geral é dado a seguir (IS CODE, 2008):

- A área sob a Curva de Estabilidade Estática (curva CEE ou curva GZ) compreendida entre os ângulos de inclinação de 0° e 30° não deve ser inferior a 0,055 m.rad e a área sob a Curva de Estabilidade Estática compreendida entre os ângulos de inclinação de 0° e 40°, ou entre 0° e o ângulo alagamento (φ_f), quando esse ângulo é menor que 40°, não será inferior a 0.090 m.rad. Adicionalmente, a área sob a Curva de Estabilidade Estática compreendida entre os ângulos de inclinação de 30° e 40°, ou entre 30° e o ângulo de alagamento (φ_f), caso este seja menor do que 40°, não deverá ser inferior a 0,030 m.rad.
- O braço de endireitamento correspondente ao ângulo de inclinação igual ou superior a 30° não deverá ser menor do que 0,20 m.
- O braço de endireitamento máximo deverá ocorrer em um ângulo de inclinação maior ou igual a 25°
- A altura metacêntrica inicial (GM_0) não deve ser menor do que 0,15 m.

Apesar do atendimento aos critérios da primeira geração exigido pelas Administrações Nacionais e sociedades classificadoras, ainda ocorrem muitos acidentes e perdas de navios. A União Internacional de Seguro Marítimo (IUMI), baseada nos dados da lista do Lloyd, publica, anualmente, as estatísticas das perdas e acidentes da frota mundial de navios. O número total de perdas anuais de navios entre os anos de 1999 e 2015 é apresentado na Figura 1. As causas das perdas dos navios são apresentadas na Figura 2.

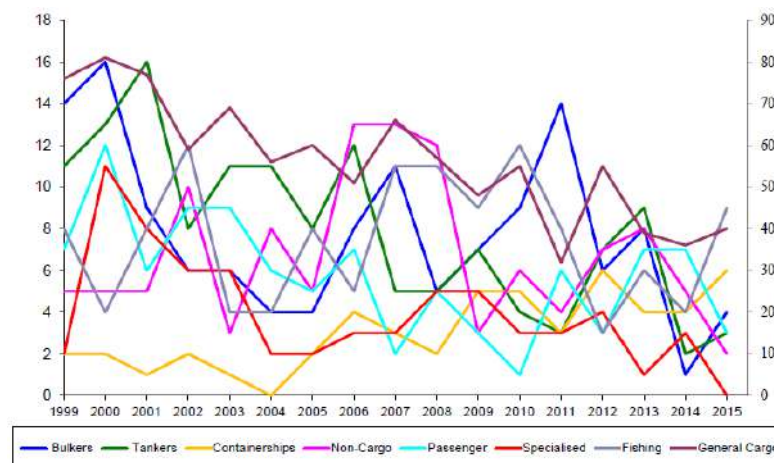


Figura 1- Número total de perdas (Navios maiores de 500 GT), período de 1999-2016. Fonte: (IUMI, 2016)

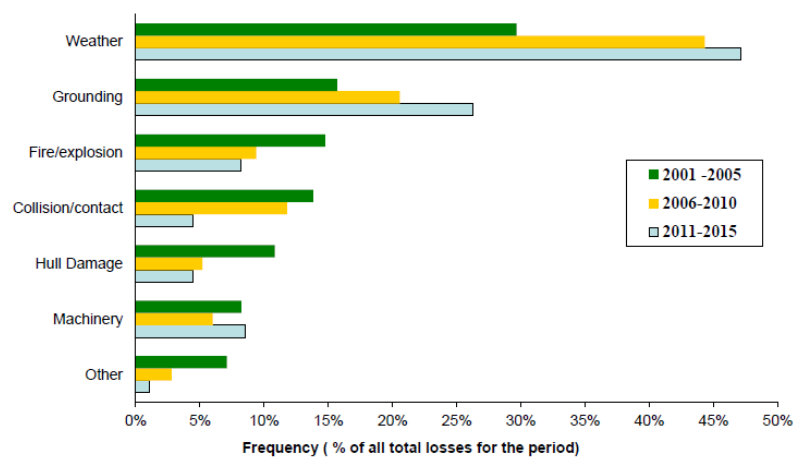


Figura 2- Número de perdas de acordo com a causa para navios maiores de 500 GT, período de 2001- 2015. Fonte: (IUMI ,2016)

Observando as porcentagens de navios perdidos e suas causas, fica evidente que a principal causa de perdas de navios é por motivos ambientais, além disso, o número de perdas vem aumentando nos últimos anos.

Além dos dados apresentados acima, nos últimos quinze anos uma série de acidentes relacionados à estabilidade intacta, envolvendo navios como APL China, M/V Aratere e Chicago Express, demonstram, claramente, que os critérios de estabilidade precisavam ser revisados. Uma das razões é o fato de que os navios contemporâneos apresentam características e modos de operação significativamente diferentes dos navios utilizados como amostra na época da elaboração da primeira geração de critérios de estabilidade intacta, colocando, assim, em dúvida a confiabilidade dos critérios da primeira geração.

O conjunto desses fatores, fez com que a IMO, em 2002, começasse a revisar os critérios de estabilidade e reestabelecesse o grupo de trabalho sobre estabilidade intacta, o Subcomitê de Estabilidade Intacta, Borda Livre e Segurança de Pesqueiros (SLF) (FRANCESCUTTO, 2004). No entanto, a elaboração dos critérios de estabilidade intacta da segunda geração só começou a ser materializada na Sessão 48 do SLF em setembro de 2005. Nessa etapa de elaboração, os critérios de estabilidade da segunda geração foram baseados em somente três modos de falha de estabilidade:

- a. Problemas devidos à variação do braço de restauração (como excitação paramétrica e perda pura de estabilidade);
- b. Estabilidade sob a condição de navio inoperante (como definido no regulamento I-1/3-8;

c. Problemas de manobrabilidade em ondas (como a guinada brusca).

Durante o desenvolvimento inicial dos critérios, houve um consenso geral de que os critérios de segunda geração deveriam basear-se na física dos fenômenos específicos que conduzem à falha da estabilidade. O projeto e os modos de operação de navios novos assumem características que não podem, com confiança, depender exclusivamente das estatísticas de falhas e métodos baseados em regressão. Além disso, houve um consenso geral quanto à conveniência de relacionar os novos critérios com a probabilidade ou com outras medidas da probabilidade de falha de estabilidade, uma vez que os métodos de análise de risco ganharam maior aceitação e tornaram-se ferramentas padrão em outros setores. (IMO SLF 48/4/12, 2005).

Essas considerações levaram à formulação do plano de trabalho para o critério de estabilidade de segunda geração, descrito em SLF 50/4/4 (2007) e discutido na 50ª sessão do SFL (2007). Os elementos principais tratados foram a distinção entre os critérios baseados em desempenho e paramétricos, entre os critérios probabilísticos e os determinísticos. Os critérios probabilísticos receberam especial atenção; se reconheceu, pela primeira vez, o problema da raridade das falhas e foi proposta uma definição. Também, devido à raridade das falhas de estabilidade, a avaliação da probabilidade de falha com ferramentas numéricas foi reconhecida como um desafio significativo.

Nessa época, a indústria marítima já tinha experiência com problemas de estabilidade dinâmica. Após um acidente com a embarcação APL China, devido a roll paramétrico, a classificadora ABS (*American Bureau of Shipping*) desenvolveu um guia de avaliação da ocorrência de roll paramétrico para navios do tipo porta-contentores (ABS, 2004). O guia baseou-se em um procedimento de avaliação em vários níveis. O primeiro nível foi construído com base na avaliação da mudança de GM em ondas regulares e na equação de Mathieu. Se se verificasse que o navio é susceptível ao fenômeno de roll paramétrico, então um critério mais complexo devia ser aplicado, abrangendo o cálculo da curva GZ completa em ondas e a integração numérica da equação de roll. Se a resposta do roll fosse significativa, então simulações numéricas avançadas teriam que ser aplicadas e um guia operacional específico para o navio era desenvolvido usando um programa como o *Large Amplitude Motion Program* (LAMP) (LIN e YUE, 1990). Também naquela época, o trabalho de Germanischer Lloyd foi focado em procedimentos de avaliação numérica utilizando o código numérico avançado GL Simbel (BRUNSWIG e PEREIRA, 2006). Além disso, o desenvolvimento da Germanischer

Lloyd centrou-se na preparação de orientações operacionais específicas de navio para evitar roll paramétrico (SHIGUNOV, 2009).

A primeira formulação dos critérios de vulnerabilidade foi formulada no artigo de Belenky, De Kat e Umeda (2008). Esse documento forneceu uma ampla revisão do motivo físico dos modos de falha de estabilidade dinâmica considerada. Devido ao seu grande detalhamento, esse documento forneceu "notas explicativas" ao SLF 50/4/4 (IMO,2007) e foi apresentado à 51ª sessão do SLF (IMO, 2008) como informação adicional.

A estrutura de trabalho para o desenvolvimento dos critérios de estabilidade intacta da segunda geração foi baseada no trabalho do grupo de correspondência internacional (IMO,2008). Este documento formalizou os conceitos contidos no SLF 50/4/4; em particular, foi feita uma distinção clara entre um critério e um padrão, sendo o primeiro um "instrumento de julgamento", enquanto o último é um limite entre aceitável e inaceitável.

Em 2005, a sociedade de arquitetos navais e de engenheiros oceânicos do Japão (JASNAOE) estabeleceu um comitê de investigação estratégica sobre os métodos de estimativa de risco de emborcamento para a nova geração de critérios de estabilidade para a IMO. O resultado deste programa foi relatado em cinco sessões de JASNAOE; outros resultados foram publicados em inglês no *The Osaka Colloquium (IKEDA e UMEDA, 2008)*. Uma visão geral desse trabalho está apresentada no SLF 51 /INF.6. Entretanto, certos desenvolvimentos no terreno foram afetados pela crescente consideração e formulação prática da chamada abordagem dos "grupos críticos de ondas". Este trabalho foi utilizado para a avaliação probabilística da estabilidade intacta durante The European SAFEDOR Project (THEMELIS e SPYROU, 2007), o que permitiu uma interface prática entre os pontos de vista determinístico e probabilístico. O SNAME estabeleceu um grupo de trabalho de estabilidade dinâmica, cujo objetivo é fornecer uma revisão detalhada dos desenvolvimentos no campo da estabilidade dinâmica. (IMO SLF 53/3/3, 2010).

Os critérios de vulnerabilidade foram foco no 1º e no 2º *Workshops* Internacionais sobre considerações de estabilidade dinâmica na construção de navios (*DSCSD*) (KOBYLINSKI, 2009).

O desenvolvimento dos critérios de estabilidade intactos de segunda geração foi intensamente discutido durante a 10ª Conferência Internacional sobre Estabilidade de

navios e Veículos Oceânicos e nos 11º e 12º Workshops Internacionais de Estabilidade de Navios. (DEGTYAREV, 2009; WALREE, 2010; BELENLY, 2011)

A consideração de acelerações excessivas também foi adicionada à lista de modos de falha de estabilidade (IMO SLF 53/19, 2011), após a perda parcial de estabilidade do Chicago Express, que resultou em lesões e mortes (BSU, 2009). Shigunov (2009) considerou a verificação da vulnerabilidade de aceleração excessiva com base no GM inicial e no amortecimento de roll.

Na Sessão 54 do SLF, um grande avanço foi realizado nos trabalhos sobre a segunda Geração de critérios de estabilidade intacta; no entanto, uma grande quantidade de trabalho ainda permaneceu pendente (IMO SLF 54/17, 2012).

Na Sessão 55 do SLF, foi decidido restabelecer o Grupo de Correspondência para a Estabilidade Intacta, com os termos de referência do documento SLF 55/17 (IMO SLF 55/17, 2013), para prosseguir os trabalhos sobre o desenvolvimento de critérios de estabilidade intactos de segunda geração.

Os estudos e desenvolvimento dos critérios de estabilidade da segunda geração tiveram continuidade nas sessões do Subcomitê de Projetos e Construção de Navios (SDC). Até agora, já ocorreram quatro sessões, sendo a primeira em janeiro de 2014 e a última em fevereiro de 2017.

No SDC 2 (2015) foram estabelecidas as regras para o primeiro e segundo nível para os modos de falha de estabilidade de perda pura de estabilidade, roll paramétrico e guinada brusca. No SDC 3 (2016), foram estabelecidas as regras para o primeiro e segundo nível para os modos de falha de estabilidade de condição de navio inoperante e aceleração excessiva.

No SDC 4 (2017) os critérios estabelecidos nas sessões anteriores foram testados para diferentes tipos de navios por cada delegação. O tipo de navio mais testado foi o porta-contentor, por ser um navio tipicamente propenso a instabilidades dinâmicas. Além disso, os exemplos apresentados no SDC 4 indicaram que navios de apoio offshore (offshore supply vessel - OSV) apresentam inconsistências entre o primeiro e o segundo nível de verificação da perda pura de estabilidade, ou seja, esse tipo de navio passa com grande folga no primeiro nível, porém não passa no segundo nível. Apesar disso, poucos estudos foram encontrados para esse tipo de navio na gama de exemplos fornecidos no SDC4 e na literatura. Vale ressaltar que os critérios ainda não foram finalizados, estando em fase de teste.

1. 1 Objetivo e organização do trabalho

Essa pesquisa tem como objetivo investigar e analisar os critérios de estabilidade da segunda geração, tendo como foco principal o roll paramétrico e a perda pura de estabilidade, para um navio do tipo porta-contentor, por ser um navio típico de ocorrência de instabilidades dinâmicas servindo assim de “*benchmarking*” e para um navio de apoio (PSV), com especial interesse em investigar a ocorrência de inconsistências para perda pura de estabilidade. Os navios de apoio, PSV (*Platform Supply Vessel*), caracterizam-se pela sua versatilidade, sendo o principal meio de locomoção de cargas para plataformas de petróleo offshore.

Os critérios foram estudados, analisados e implementados na ferramenta numérica DSSTAB, no âmbito do Projeto de Pesquisa sobre Dinâmica Não Linear de Navios e Plataformas Offshore, que envolve o Grupo de Pesquisa do Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano) da COPPE-UFRJ, a Tecgraf/PUC-Rio e o CENPES-Petrobras. Essa ferramenta foi validada através da comparação dos resultados encontrados para o porta-contentor com os resultados apresentados pelo estudo da delegação da França, apresentado no SDC (2016).

O primeiro passo foi realizar uma análise do fenômeno físico de cada modo de falha, os quais são apresentados no Capítulo 2. Esse capítulo é apresentado em cinco tópicos, cada um contendo um modo de falha.

Em seguida, no Capítulo 3, as formulações matemáticas propostas pela IMO para a avaliação qualitativa e quantitativa de cada um dos fenômenos abrangidos pela segunda geração dos critérios de estabilidade são apresentadas. Esse capítulo é também separado em cinco tópicos. Cada tópico é dividido em duas partes, com a primeira parte explicando o primeiro nível do critério e a segunda, o segundo nível.

No Capítulo 4 é apresentado o caso de estudo para um navio porta-contentor e um navio PSV. Vale lembrar que esse trabalho tem como foco o roll paramétrico e a perda de estabilidade do navio, dessa forma, só foram analisados esses dois modos de falha. Finalmente, no Capítulo 5 as conclusões do trabalho são apresentadas. As teorias relevantes para o completo entendimento do tema são apresentadas no apêndice.

Capítulo 2

Critérios de estabilidade da segunda geração

2. 1 Modos de Falha

Os novos critérios avaliam a vulnerabilidade dos navios em cinco modos de falha de estabilidade:

1. perda pura de estabilidade (*pure loss of stability*);
2. roll paramétrico (*parametric roll*);
3. guinada brusca (*broaching*);
4. estabilidade do navio em condição inoperante (*dead ship condition*);
5. aceleração excessiva (*excessive acceleration*).

Cada modo de falha é composto por três níveis de verificação. Dessa forma, se evitam análises excessivas e dispendiosas com navios que não são vulneráveis aos modos de falha em questão. É requerido que o navio cumpra com pelo menos um nível do critério para cada modo de falha. Vale ressaltar, que o projetista pode iniciar com o terceiro nível, que é a avaliação direta, ou seja, é o nível no qual é realizada uma simulação não linear completa no domínio do tempo. Se nesse nível for constatado que o navio é vulnerável à ocorrência de algum modo de falha de estabilidade, deve-se, então, incluir, no guia de operação, os procedimentos para evitar essas ocorrências.

O projetista pode iniciar também pelo segundo nível e, se for constatada vulnerabilidade a algum modo de falha, ele pode verificar o terceiro nível ou adicionar restrições no guia de operação.

O procedimento proposto pela IMO para a verificação da segunda geração dos critérios de estabilidade é apresentado no fluxograma a seguir:

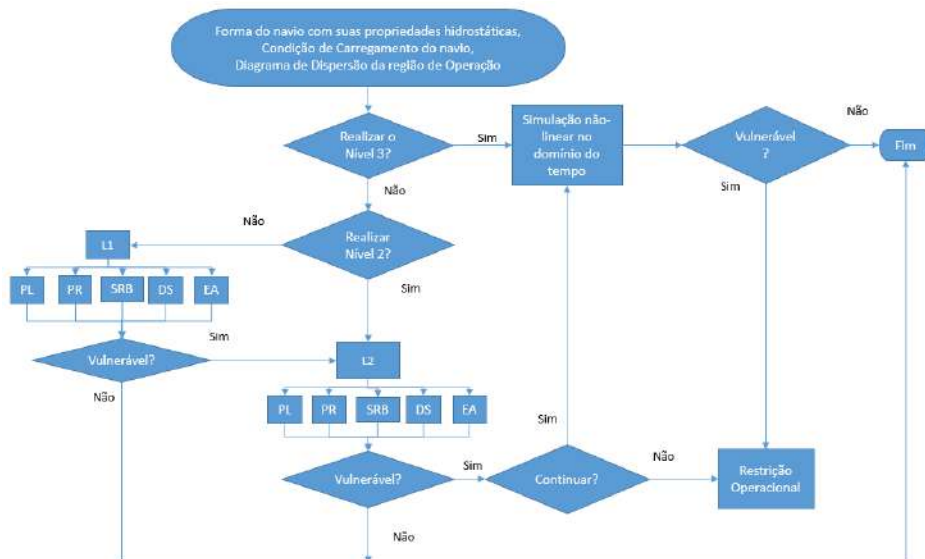


Figura 3- Sequência de análise dos critérios

2. 2 Perda pura de estabilidade

Esse modo de falha de estabilidade tem como base física a mudança de estabilidade em ondas e pode ocorrer principalmente em ondas de popa (*stern e stern-quartering seas*).

Quando o navio está operando em ondas, sua porção submersa é modificada. Essa mudança pode tornar-se especialmente significativa se o comprimento da onda for comparável com o comprimento do navio. Na maioria das embarcações convencionais, o aumento do calado na proa e na popa proporciona um aumento da área do plano de linha d'água, devido às curvaturas dessas regiões, porém na meia nau a área do plano de linha d'água permanece praticamente a mesma com o aumento do calado, devido ao corpo paralelo nessa região. Por conseguinte, quando o cavado da onda está localizado na meia nau, o calado à meia nau é menor e o calado na proa e na popa maior, resultando em uma área molhada maior do que em águas calmas, ou seja, resultando em aumento de estabilidade. Entretanto, quando a crista da onda está localizada na meia nau, a situação é invertida, os calados na proa e na popa são menores e na meia nau maior, o que faz com que a área do plano de linha d'água seja menor, resultando em diminuição de estabilidade. A Figura 4 compara a área de linha d'água e o diagrama de braço de restauração GZ em águas calmas e em onda regular com comprimento próximo ao comprimento do navio. Dois posicionamentos de crista são apresentados: (a) cavado à meia nau e (b) crista à meia

nau. Pode-se observar o aumento de restauração devido ao aumento da área de linha d'água na configuração (a) e o inverso na configuração (b), como discutido anteriormente.

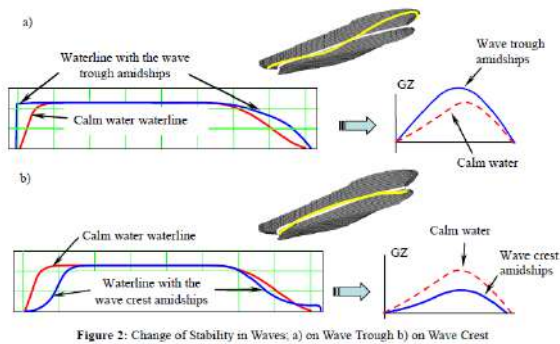


Figura 4- Mudança de estabilidade em ondas. Fonte: (PETERS et al, 2011)

A dinâmica da perda pura de estabilidade é está intimamente relacionada com a intensidade e duração das mudanças na área de linha d'água. Um cenário possível para o desenvolvimento de uma falha de estabilidade causada por pura perda de estabilidade é mostrado na Figura 5.

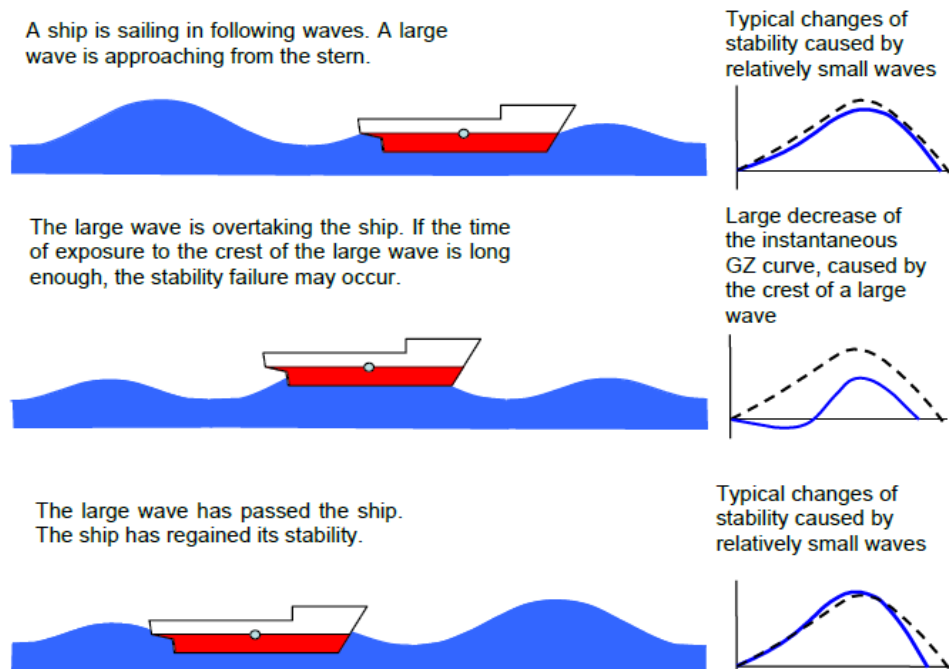


Figura 5- Possível cenário para o desenvolvimento de perda pura de estabilidade. Fonte: (IMO, 2016)

Conforme pode ser visto na Figura 5, quando uma onda grande se aproxima da popa, enquanto o navio está navegando com velocidade relativamente alta em mar de popa, e a celeridade dessa onda é apenas ligeiramente acima da velocidade do navio, o

tempo para a onda passar o navio pode ser grande. Quando a crista da onda estiver perto da seção mestra do navio, sua estabilidade pode reduzir-se significativamente. Se a condição de estabilidade reduzida permanecer por um tempo suficiente, o navio pode desenvolver um grande ângulo de roll, ou até mesmo sofrer emborcamento. Após a passagem da onda, sua estabilidade é recuperada e o navio retornará eventualmente à posição de equilíbrio, se ainda não tiver inclinado em demasia.

Além da redução prolongada da curva de restauração, é necessário que seja aplicado um momento de emborcamento adicional (por exemplo, carga lateral de rajada de vento, força centrífuga devida à mudança de rumo). Se não houver momento de emborcamento devido a uma força externa, o navio irá permanecer na condição de equilíbrio, exceto nos casos em que a altura metacêntrica em ondas é negativa. Vários modelos existentes testados em corrida livre em ondas oblíquas de popa indicam que o acoplamento dos graus de liberdade é essencial para explicar o efeito da velocidade de avanço no modo de falha de estabilidade de perda pura de estabilidade, conforme pode ser visto na Figura 6. Portanto, o momento de emborcamento induzido pela força centrífuga devida a movimentos de manobrabilidade do navio deve ser incluído na avaliação desse modo de falha.

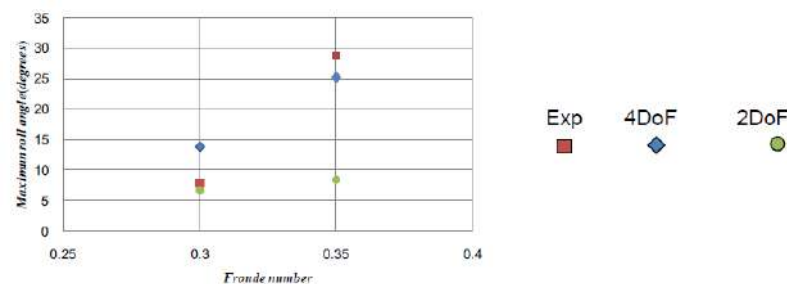


Figura 6- Efeito da velocidade de avanço na perda pura de estabilidade em mar irregular em ondas oblíquas de popa para um porta-contentor - Fonte: (IMO,2016)

2. 3 Roll paramétrico

O fenômeno de roll paramétrico de navios é uma amplificação do movimento de roll causado por variações periódicas da restauração transversal devido à passagem da onda, como descrito em Kemp (1938) e Paulling (1961), ou causado pelos movimentos acoplados entre os modos de heave-roll-pitch, em que ocorre transferência de energia entre os movimentos verticais (heave e pitch) e o movimento transversal (roll), descrito em Paulling e Rosenberg (1959) e em Neves e Rodríguez (2006). Esse fenômeno é

predominantemente observado em mar de proa, popa e oblíquo de proa ou popa (*bow e stern- quartering*) quando a frequência de encontro é aproximadamente duas vezes a frequência natural de roll do navio e o amortecimento de roll do navio é insuficiente para dissipar a energia adicional (acumulada por causa da ressonância paramétrica).

Quando o navio está operando em ondas, a porção submersa do navio é modificada. Essa mudança pode tornar-se especialmente significativa se o comprimento da onda for comparável com o comprimento do navio.

Se num instante em que o ângulo de roll é diferente de zero, a meia nau do navio se encontra próxima ao cavado da onda, a restauração hidrostática estará em sua máxima magnitude. Isso gera um momento de restauração excessivo (superior ao que ocorreria em águas calmas), provocando uma aceleração de roll excessiva. Com isso, o movimento de roll do navio é restaurado com demasiada intensidade, de modo que, quando o navio atinge o ângulo de roll zero, passa por esta posição com uma velocidade de roll excessiva. Se, neste instante, a meia nau do navio estiver posicionada próxima à crista da onda, a restauração hidrostática será mínima, e o movimento de roll prosseguirá excessivo, e com mínima oposição, até atingir o valor máximo de roll no outro bordo. Se, ao atingir o valor máximo de roll no outro bordo, a meia nau estiver posicionada novamente no cavado, o momento restaurador será maior ainda, e assim, os máximos ângulos de roll irão aumentando a cada ciclo. Para que esse fenômeno ocorra, deve haver uma sincronia entre o movimento de roll e a frequência de encontro entre a onda e o navio. Esse processo é apresentado na Figura 7. É importante notar que a passagem de uma onda é associada com metade de um ciclo de roll. Dessa forma, para cada período de roll, duas ondas passam. O que significa que o período de roll é aproximadamente o dobro do período de encontro, conforme é apresentado na Figura 8.

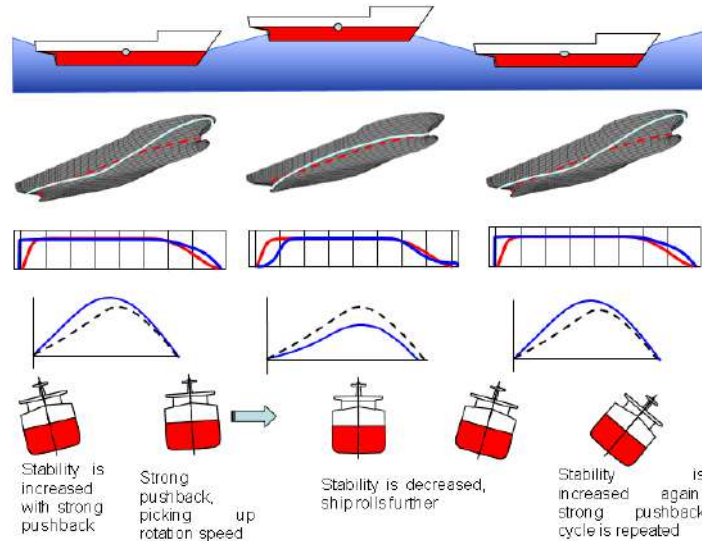


Figura 7- Desenvolvimento de Roll paramétrico- Fonte: (IMO, 2016)

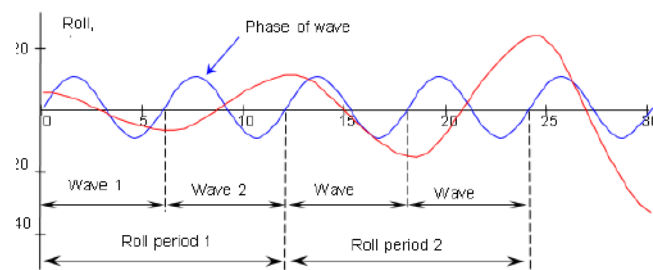


Figura 8- Série temporal de roll paramétrico- Fonte: (IMO, 2016)

O roll paramétrico é um fenômeno de ressonância e existe uma faixa limite de frequência em que ele ocorre, da mesma forma que ocorre com a ressonância do movimento de roll em mar de través. A principal diferença entre esses dois fenômenos é que a largura da faixa de frequências em que ocorre roll paramétrico depende da magnitude da mudança de estabilidade, enquanto que a faixa de frequência para a ressonância de roll em mar de través depende da altura da onda. Além disso, se a frequência da onda de través estiver longe da frequência de ressonância, o navio oscila com pequenas amplitudes de roll, já no caso de roll paramétrico, não existe oscilação fora da faixa de ressonância. Essas diferenças são visíveis na Figura 9.

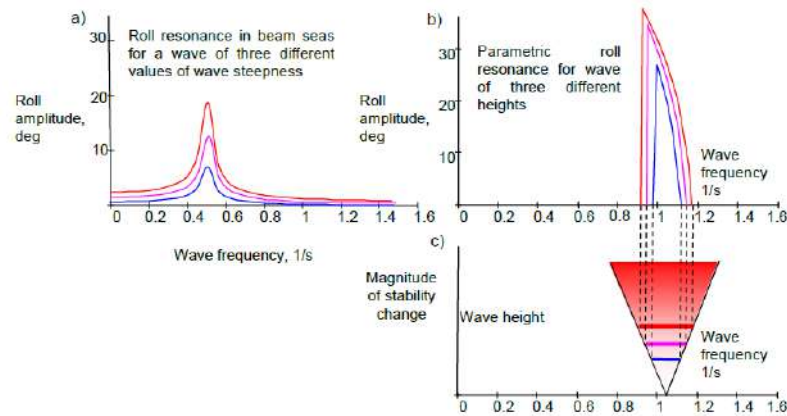


Figura 9- (a) – Ressonância do movimento de roll em mar de través (beam seas) (b) Ressonância de Roll paramétrico (c) Faixa de frequência onde existe ressonância do roll paramétrico- Fonte: (IMO, 2016)

Um outro fator importante para a ocorrência de roll paramétrico é o amortecimento de roll do navio. Se a energia “perdida” por ciclo devido ao amortecimento for maior que a energia “recebida” devido à mudança de estabilidade em ondas longitudinais, a amplitude de roll não irá aumentar e o roll paramétrico não será desenvolvido e irá ocorrer um amortecimento do movimento. Uma vez que a energia “recebida” por ciclo for maior que a energia “perdida” por ciclo pelo amortecimento, a amplitude começará a aumentar.

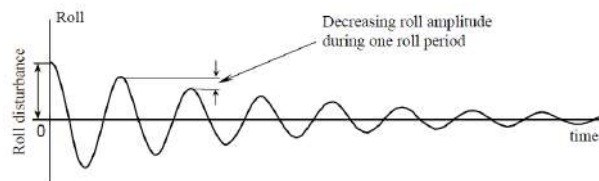


Figura 10- Decaimento de roll em águas calmas. Fonte: (IMO, 2016)

Mesmo a partir desta breve descrição, fica claro que, para o desenvolvimento do roll paramétrico, duas condições são necessárias: uma variação de estabilidade em ondas e uma relação entre a frequência de encontro e a frequência natural específica para a ocorrência de roll. Além disso, a energia “perdida” pelo amortecimento deve ser menor que o ganho de energia devido à variação de estabilidade em ondas longitudinais.

2. 4 Guinada brusca

Guinada brusca é um movimento angular do navio no plano horizontal (movimento de yaw) exagerado, que pode causar uma mudança de rumo violenta e

incontrolável apesar dos esforços máximos de manter a direção. Como com qualquer outro evento de mudança brusca, esse evento é acompanhado por um grande ângulo de banda, o qual tem um potencial efeito de perda parcial ou total de estabilidade. A guinada brusca é normalmente precedida por pelo "surfeo" (*surf-riding*) do navio na onda, que ocorre quando uma onda de popa "captura" o navio e o acelera até a celeridade da onda. Como na condição de *surf-riding*, os navios ficam direccionalmente instáveis (principalmente, por causa da emersão do leme para fora da água), esta instabilidade da manobra de *yaw* leva a uma guinada incontrolável.

Uma vez que o *surf-riding* geralmente precede a guinada brusca, a probabilidade de ocorrência de *surf-riding* pode ser utilizada para formular o critério de vulnerabilidade para a guinada brusca. Para que ocorra *surf-riding*, algumas condições devem ser satisfeitas:

1. O comprimento da onda deve ser entre uma a três vezes o comprimento do navio.
2. A onda deve ter características de comprimento e altura adequadas para produzir força de surge no navio requerida (*wave surging force*).
3. A velocidade do navio deve ser comparável com a celeridade da onda.

Em mar de popa, três forças atuam no navio:

- Força de empuxo longitudinal, que é a força produzida pelo propulsor para propeler o navio;
- Força de resistência, que é a força que se opõe ao movimento de avanço do navio;
- Força de surge devido à onda, que é a força imposta pela onda, a qual pode ser no sentido de avanço do navio ou no sentido oposto, dependendo se o navio está antes ou depois da crista da onda.

Essas três forças são apresentadas na Figura 11.

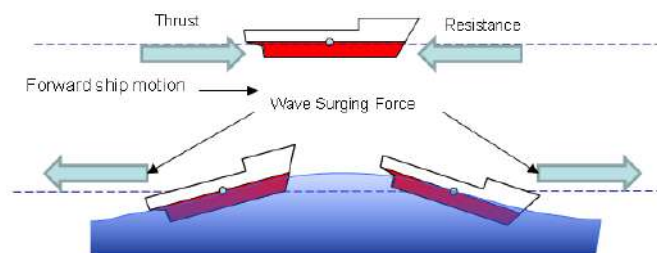


Figura 11- Forças que agem no navio em mar de popa. Fonte: (IMO, 2016)

Quando a força de onda de surge (*surging wave force*) está presente, três condições são possíveis:

A primeira é o movimento de surge: Essa condição ocorre quando a força de onda de surge é insuficiente para superar a diferença das forças de empuxo do propulsor do navio e a resistência do navio quando operando com velocidade igual a celeridade da onda. A Figura 12 apresenta a curva de resistência e propulsão ilustrando o ponto de autopropulsão e a diferença entre as forças de resistências e de empuxo. Nesse caso, o navio oscila entre um aumento de velocidade, quando o navio se encontra a vante da crista da onda, e uma redução de velocidade, quando a ré da crista, conforme apresentado na Figura 13.

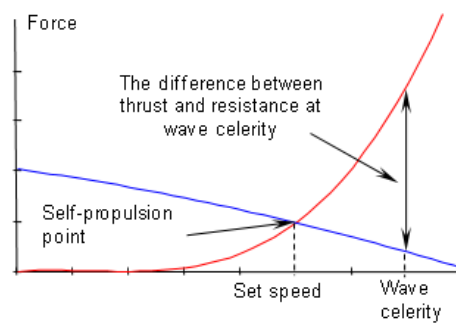


Figura 12- Curva de resistência e propulsão. Fonte: (IMO, 2016)

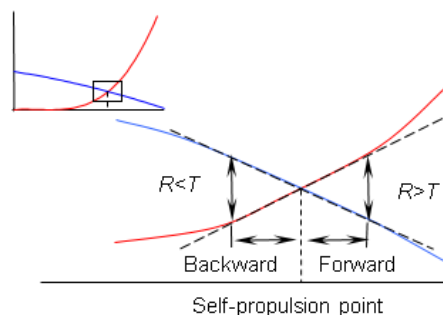


Figura 13- movimentos pequenos de surge em torno do ponto de autopropulsão.

Fonte: (IMO, 2016)

As outras duas condições envolvem dois limites de velocidade que podem causar *surf-riding*. Se a onda possui um comprimento apropriado e altura, a força de surge é capaz de superar a diferença entre as forças de resistência e empuxo, o que institui dois pontos de equilíbrio conforme a Figura 14. Essa figura apresenta a curva da força da onda (vermelha) e a diferença entre o empuxo e a resistência (linha preta abaixo da abscissa) e apresenta as interseções entre essas duas plotagens, as quais marcam os dois pontos de equilíbrio: Estável e Instável.

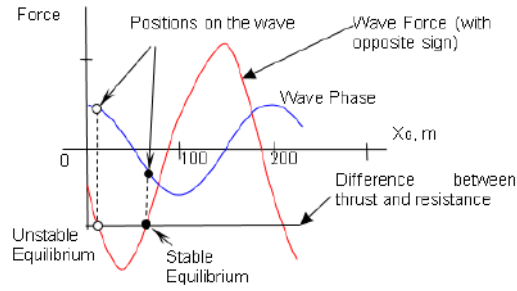


Figura 14- Força da onda e balanço desta com a diferença entre a resistência e o empuxo. Fonte: (IMO, 2016)

A segunda é a ocorrência de surf-riding sob condições iniciais específicas (primeiro limite de surf-riding): Essa condição ocorre quando a velocidade do navio para uma determinada força de onda de surge em um ponto particular da onda pode exceder a diferença das forças de empuxo do propulsor do navio e a resistência do navio quando operando com velocidade igual a celeridade da onda. Nesse caso, surf-riding pode ocorrer se o navio é acelerado com alguma força externa sob a condição de autopropulsão. Esse caso corresponde, na Figura 14, ao segundo ponto de interseção da reta de diferença entre empuxo e resistência com a força de surge da onda.

Analisando esse ponto, para o caso em que a seção mestra de um navio se encontra em torno de 70 m a vante da crista da onda (marcado como equilíbrio estável perto no cavado da onda nas Figura 14 e Figura 15) e em situação de surf-riding, a velocidade do navio será igual a celeridade da onda. Se o navio é perturbado a partir desse ponto para a vante do cavado da onda, a força de surge diminui. Portanto, a diferença entre empuxo e resistência proporcionará uma redução na velocidade instantânea do navio e a onda começará a “ultrapassar” o navio. À medida que o navio se reaproxima da crista da onda, a força de surge devido à onda aumenta e impele o navio de volta a posição de equilíbrio estável.

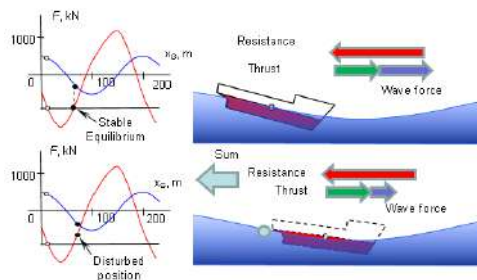


Figura 15- Perturbação para vante do ponto de equilíbrio estável. Fonte: (IMO, 2016)

Opostamente ao caso mostrado acima, a Figura 16 considera que o navio é perturbado do ponto de equilíbrio para a ré desse ponto - para a crista da onda. Neste caso, a força de surge da onda torna-se maior do que a diferença entre o empuxo e a resistência. Assim, a velocidade do navio aumentará e ele mover-se-á para a vante, de volta para o ponto de equilíbrio. Portanto, em qualquer dos casos (isto é, caso ocorra uma perturbação para a vante ou para ré do ponto de equilíbrio), o navio tenderá a mover-se para o equilíbrio próximo do cavado da onda, o que torna este equilíbrio estável.

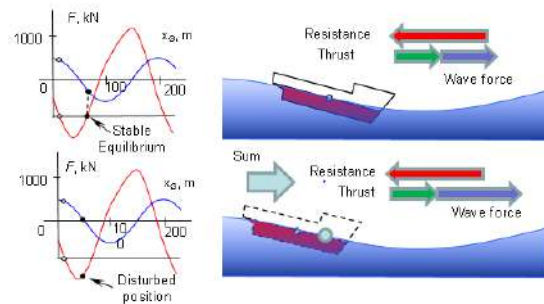


Figura 16- Perturbação para ré do ponto de equilíbrio estável. Fonte: (IMO ,2016)

Finalmente, a terceira é a ocorrência de Surf-riding sob qualquer condição inicial (segundo limite de surf-riding): Nessa situação a energia cinética do navio é demasiado grande para que o navio seja ultrapassado por uma onda. Assim, o movimento oscilatório de surge não pode existir de forma estável, de modo que o surf-riding ocorre independentemente da posição inicial do navio e da velocidade de avanço. Esse caso corresponde, na Figura 14, ao primeiro ponto de interseção da reta de diferença entre empuxo e resistência com a força de surge da onda.

Analisando esse ponto, para o caso em que a seção mestra de um navio se encontra cerca de 30 metros à vante da crista da onda (marcado como equilíbrio instável perto na crista da onda nas Figura 14 e Figura 17), e em situação de surf-riding, a velocidade do navio será igual a celeridade da onda. Se o navio é perturbado a partir desse ponto para a vante (para o cavado da onda como apresentado na Figura 17), a força de surge da onda aumenta e irá aumentar a velocidade do navio, fazendo com que ele se mova mais a vante da onda até chegar o equilíbrio estável perto do cavado da onda.

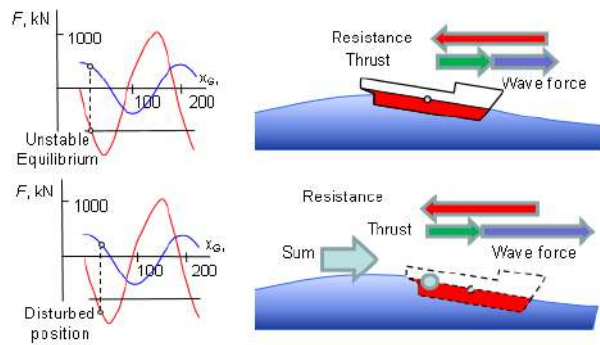


Figura 17- Perturbação para vante do ponto de equilíbrio instável. Fonte: (IMO, 2016)

Agora, se o navio é perturbado a partir deste ponto para a ré, em direção à crista de onda com o mostrado na Figura 14, a força da onda diminui e a velocidade instantânea também começa a diminuir. Neste caso, a diferença entre o empuxo e a resistência causará uma diminuição na velocidade instantânea do navio que faz com que a onda comece a “ultrapassar” o navio. Há vários cenários que consideram o que pode acontecer a seguir, mas em nenhum caso o navio retorna a este equilíbrio, o que torna o equilíbrio próximo à crista de onda instável.

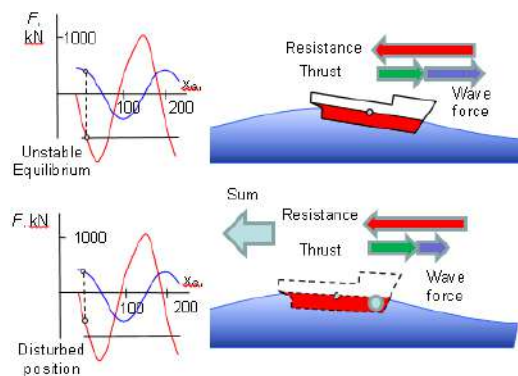


Figura 18- Perturbação para ré do ponto de equilíbrio instável. Fonte: (IMO, 2016)

Se não houver pontos de equilíbrio de surf-riding, a ocorrência de surf-riding não é possível e o navio simplesmente irá ter movimento de surge. Isso significa que todas as combinações de velocidade instantânea e posição sobre a onda levam ao mesmo resultado. No entanto, uma vez que os pontos de equilíbrio aparecem em certas posições na onda, nem todas as combinações da posição da onda e da velocidade instantânea conduzem à mesma resposta. Se o navio estiver localizado exatamente na posição de equilíbrio perto do cavado da onda e acelerar até ter velocidade igual a celeridade da

onda, vai ocorrer o fenômeno de surf-riding. Qualquer pequena perturbação desta posição irá retornar o navio de volta ao equilíbrio. Se um navio é colocado no equilíbrio instável perto da crista da onda, acelerado até a celeridade da onda e, em seguida, perturbado em direção ao cavado da onda, ele vai acabar também no equilíbrio estável de surf-riding. Assim, há um conjunto de combinações de posições de onda e velocidades instantâneas que levará a surf-riding. Pode-se dizer que essas combinações formam um "domínio de atração para equilíbrio de surf-riding." Fora deste domínio, duas opções são possíveis: movimento de surge ou surf-riding. Assim, em princípio, uma vez fora do domínio de atração, o navio continua com movimento de surge ou é atraído para um equilíbrio de surf-riding em alguma outra onda.

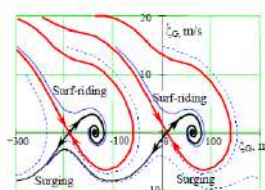


Figura 19 - Plano de Fase (Surging e Surf-Riding) Fonte: (BELENKY E UMEDA, 2008)

Para uma determinada onda, o empuxo na situação de surf-riding sob qualquer condição inicial identifica o cenário crítico de vulnerabilidade para o qual surf-riding torna-se inevitável. Para considerar aproximadamente o balanço energético durante a passagem de um navio em um comprimento de onda, a análise de Melnikov ou a análise sistemática do plano de fase pode ser usada para identificar a ocorrência de surf-riding sob qualquer condição inicial. Os critérios de vulnerabilidade de nível 2 utilizam diretamente a análise de Melnikov, porém com várias combinações possíveis de altura de onda e comprimento de onda no mar e os critérios de vulnerabilidade de nível 1 são estimativas empíricas baseadas em muitos resultados calculados dessa análise sob a inclinação (*steepness*) da onda de 1/10, como já conhecido do limite prático de ondas em mar regular.

Para os navios que não satisfaçam a norma contida a seguir, os procedimentos de operação de navios para evitar guinada brusca, recomendados na secção 4.2.1 da Guia revisada para mestres para evitar situações de perigo em condição climática e de mar adversos, MSC.1 / Circ.1228, podem ser aplicadas sob reserva da aprovação da Administração como alternativa dos critérios abaixo. Mais especificamente, a velocidade e / ou curso do navio devem ser alterados se:

- O comprimento médio da onda for maior que $0,8L$;
- A altura significativa da onda for maior que $0,04L$;
- O ângulo de encontro estiver na faixa $135^\circ < \alpha < 225^\circ$
- A velocidade de avanço do navio for maior que $(1,8L) / \cos(180 - \alpha)$ nós.

Sendo α o ângulo de encontro ($\alpha=0^\circ$ em mar de proa e $\alpha=90^\circ$ para o mar de estibordo).

2. 5 Estabilidade do navio na condição inoperante

Estabilidade na condição inoperante foi o primeiro modo de falha de estabilidade abordado com base na física do critério de vento e balanço severos, também conhecido como critério ambiental, o qual foi adotado pela IMO em 1985 (IMO Resolution A.562, 1985) e é abordado na seção 2.3 da resolução da IMO de 2008. (IMO. Resolution MSC.267(85) Annex 2, 2008). A física do critério ambiental é apresentada na Figura 20. Nesse modo de falha assume-se que o navio perdeu sua força de propulsão e se encontra em mar de través, onde ele sofre movimento de roll devido à ação da onda, assim como movimento de roll e de deriva devido à ação do vento. O movimento de deriva em conjunto com o movimento de roll é resultado da ação de um par de forças: força aerodinâmica do vento e reação hidrodinâmica causada pelo movimento transversal do navio.

Em seguida, ocorre uma rajada longa de vento repentino. O pior instante para isso é quando o navio sofre movimento de jogo até o maior ângulo de roll do bordo contrário; nesse caso, a ação do vento é adicionada a ação das ondas. O aumento da velocidade de deriva leva ao aumento da reação hidrodinâmica e, por conseguinte, ao aumento do momento de inclinação devido ao par de forças hidrodinâmicas e aerodinâmicas. Presume-se que a rajada dure o tempo suficiente para que o navio possa sofrer movimento de jogo máximo para o bordo contrário. O ângulo de roll obtido na direção do vento é a base desse critério. Se é grande o suficiente, ou se algumas aberturas no casco submergem, a estabilidade é considerada insuficiente. A Figura 20 representa a física desse modo de falha de estabilidade.

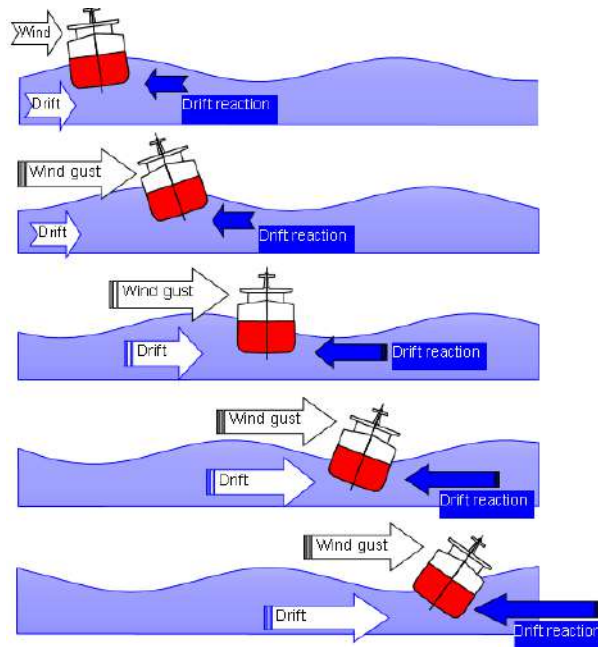


Figura 20- Representação da física. Fonte: (IMO, 2016)

2. 6 Aceleração excessiva

Observando o movimento de roll e a geometria do navio, observa-se que durante este movimento, os objetos que se encontram em maiores alturas têm maior deslocamento. Porém o período de roll é igual em qualquer posição do navio. Para percorrer uma maior distância durante o mesmo período de tempo, a velocidade linear dos objetos localizados em uma altura maior deverá ser maior. À medida que a velocidade muda de direção a cada meio período, velocidades maiores conduzem a maiores acelerações lineares e por consequência, forças inerciais maiores, conforme apresentado na Figura 21.

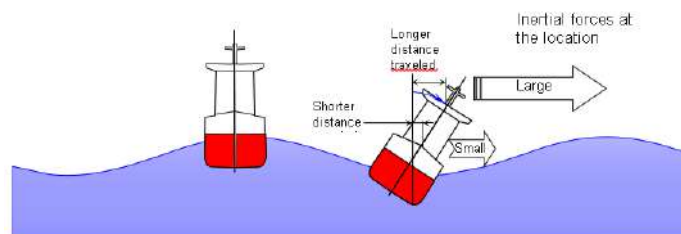


Figura 21- falha de estabilidade devido à aceleração excessiva. Fonte: (IMO,2016)

As grandes acelerações são causadas principalmente por movimentos de roll, de modo que têm direção predominantemente lateral. As forças inerciais que atuam em um

plano horizontal são mais perigosas para um ser humano do que as forças inerciais verticais, já que as verticais causam uma sobrecarga breve (*brief overloading*), enquanto as horizontais fazem com que as pessoas percam o equilíbrio, caiam ou até mesmo sejam lançadas contra paredes, anteparas ou outras estruturas.

Um grande ângulo de roll pode ser causado por diferentes mecanismos físicos. Alguns deles já estão incluídos como parte da avaliação da vulnerabilidade da segunda geração de critérios de estabilidade da IMO: perda pura de estabilidade, roll paramétrico e guinada brusca. Entre estes fenômenos, o roll paramétrico é conhecido por causar acelerações excessivas. No entanto, a ressonância síncrona (*synchronous resonance*) não é coberta por outros critérios de vulnerabilidade.

A ressonância síncrona é um fenômeno de amplificação da resposta de movimento quando a frequência natural do movimento do navio está próxima da frequência da excitação da onda.

A frequência da excitação de onda depende da frequência da onda, do ângulo de incidência da embarcação em relação às ondas e da velocidade do navio. Quando um navio navega contra as ondas (com ângulo de incidência entre 180° (onda de proa) e 90° (onda de través) a frequência do encontro é maior que a frequência das ondas. Este efeito é o mais forte em ondas de proa, enfraquece em mares oblíquos de proa ($120^\circ\sim 150^\circ$) e desaparece completamente em mares de través (90°). Quando um navio navega na mesma direção que as ondas, a frequência de encontro diminui. Este efeito é o mais forte em mares de popa, enfraquece em mares oblíquo de popa e desaparece completamente em mares de través. Velocidade mais alta aumenta esse efeito.

A razão física da amplificação do movimento próxima da frequência natural (isto é, ressonância síncrona) é a seguinte: o trabalho de excitação é gasto para superar o amortecimento e fazer o navio ter movimento de roll com frequência de excitação, em vez de frequência natural. Se a excitação e a frequência natural forem as mesmas, todo o trabalho da excitação é gasto na superação do amortecimento, portanto, mais energia permanece em movimentos de roll.

Capítulo 3

Critérios de Estabilidade da Segunda Geração: Descrição Matemática

Neste capítulo serão apresentadas as expressões matemáticas para os dois modos de falha de interesse (perda pura de estabilidade e o roll paramétrico) até o segundo nível. Essas expressões obedecem de forma simples a física descrita no capítulo anterior e estão organizadas em três níveis de verificação. Nessa abordagem, a princípio, o primeiro nível é mais simples e mais conservador e o segundo nível é um pouco mais elaborado, porém menos conservador. Vale lembrar que os critérios ainda não estão fechados, sendo assim, algumas incompatibilidades poderão ser verificadas.

As expressões matemáticas para os outros modos de falha são apresentados no apêndice J.

3.1 Perda pura de estabilidade

3.1.1 Primeiro nível

Alguns cascos são mais propensos a sofrer perda pura de estabilidade. Um casco com borda livre grande e mudanças significativas das seções da proa e da popa, porém com um valor de GM pequeno, pode sofrer de um ângulo de banda permanente (*loll angle*) significativo devido à redução de estabilidade na crista da onda.

Os critérios são aplicados para todos os navios com comprimento igual a 24 m ou maior, para os quais o número de Froude, correspondente a velocidade de serviço exceda a 0,24. O número de Froude é determinado pela equação a seguir:

$$F_N = \frac{V_s}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Sendo V_s a velocidade de serviço, L o comprimento do navio e g a aceleração da gravidade, igual a 9,81

De acordo com a IMO SDC2/WP.4 Anexo 1 (2015) os critérios para o primeiro e o segundo nível são conforme explicado nos dois próximos tópicos.

O navio é considerado vulnerável a Perda Pura de Estabilidade se:

$$GM_{min} < R_{PLA} \quad (2)$$

Sendo:

$$R_{PLA} = 0,05 \text{ m} \quad (3)$$

O valor do GM_{min} , incluindo a correção de superfície livre, pode ser calculado por dois métodos e o valor a ser considerado é o menor valor entre eles:

1º método para cálculo do GM_{min} :

O GM_{min} considerado é o menor GM (levando consideração o efeito da superfície livre) obtido ao passar uma onda longitudinal, com posicionamento da crista variando em relação a Meia Nau, com as características conforme a seguir:

$$\text{comprimento de onda, } \lambda = L$$

$$\text{Altura de onda, } h = LS_W$$

A crista é posicionada no centro longitudinal de gravidade e a $0,1L$; $0,2L$; $0,3L$; $0,4L$; $0,5L$ a vante e $0,1L$; $0,2L$; $0,3L$; $0,4L$ a ré desse ponto.

2º método para cálculo do GM_{min} :

$$GM_{min} = KB + \frac{I_L}{\nabla} - KG \quad (4)$$

Somente se:

$$C_{PV} = \frac{\nabla_D - \nabla}{A_{wp}(D - d)} \geq 1,0 \quad (5)$$

Sendo d o calado correspondente à condição de carregamento em consideração; I_L o momento de inércia do plano de linha d'água no calado d_L , calculado por:

$$d_L = d - \delta d_L \quad (6)$$

$$\delta d_L = \text{Min} \left(d - 0,25d_{full}, \frac{L \cdot S_W}{2} \right) \quad (7)$$

$$S_W = 0,0334 \text{ (wave steepess)}$$

KB é a altura vertical do centro de flutuação da condição de carregamento em consideração; KG a altura vertical do centro de gravidade da condição de carregamento em consideração; ∇ o volume deslocado da condição de carregamento em consideração; D o pontal; ∇_D o volume de deslocamento na linha d'água em D ; A_{wp} a área de linha d'água no calado igual a d ; d_{full} o calado corresponde a condição de carregamento completa em condição de partida.

Essa equação avalia a variação da popa e da proa, acima do calado igual a T . Se o resultado for igual a 1 significa que o navio tem costados verticais; se for maior que 1 significa que a área de linha d'água da proa e da popa aumenta com o aumento do calado; se menor que 1 a área de linha d'água diminui com o aumento do calado, igual ocorre com navios do tipo *Tumblehome* (típico dos navios de guerra americanos). Portanto, esse

método de cálculo do GM mínimo só é aplicável quando a área de linha d'água aumenta com o aumento do calado. A Figura 22 representa um perfil de um casco com a parte pontilhada superior pontilhada, marcando onde ocorre a principal mudança da linha d'água com o aumento do calado.



Figura 22- Representação do perfil do navio. Fonte: Peters et al. (2011)

Para melhor entendimento é apresentado um algoritmo desse procedimento no Apêndice G. O fluxograma é apresentado a seguir:

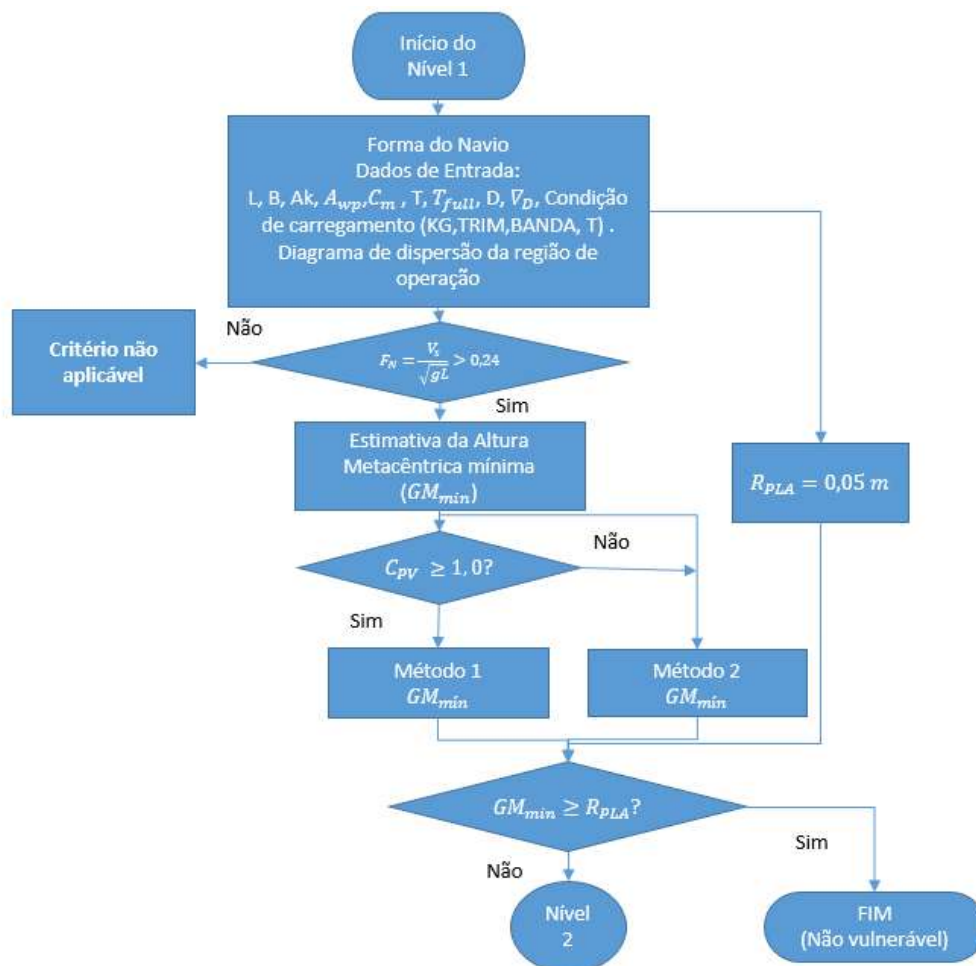


Figura 23- Fluxograma – Perda Pura de Estabilidade Nível 1

3.1.2 Segundo nível

O navio, quando em velocidade de serviço, é considerado vulnerável a falha por perda pura de estabilidade se o MAIOR valor entre os dois critérios, CR_1 e CR_2 , calculados conforme explicado a seguir, for maior que R_{PL0} , sendo:

$$\text{Max}\{CR_1, CR_2\} > R_{PL0} \quad (8)$$

$$R_{PL0} = 0,06$$

Os valores de CR_1 e CR_2 são definidos conforme a seguir:

$$CR_1 = \sum_{i=1}^N W_i C1_i \quad (9)$$

$$CR_2 = \sum_{i=1}^N W_i C2_i$$

Sendo W_i o fator de peso para respectiva onda especificado na Tabela 61.; $C1_i$ o valor calculado no critério 1 e $C2_i$ o valor calculado no critério 2.

Os critérios 1 e 2 são fornecidos a seguir:

- Critério 1

O critério 1 é baseado no ângulo de perda de estabilidade (*angle of vanishing stability*), ϕ_v , conforme a equação a seguir:

$$C1_i = \begin{cases} 1, & \text{se } \phi_v < R_{PL1} \\ 0 & \end{cases} \quad (10)$$

Onde

$$R_{PL1} = 30^\circ \quad (11)$$

- Critério 2

O critério 2 é baseado no cálculo do ângulo de banda (*angle of heel*), ϕ_s , devido à ação de um braço de inclinação constante, especificado por R_{PL3} , conforme a seguir:

$$C2_i = \begin{cases} 1, & \text{se } \phi_s > R_{PL2} \\ 0 & \end{cases} \quad (12)$$

Sendo:

$$R_{PL2} = \begin{cases} 15^\circ & \text{para navio de passageiro} \\ 25^\circ & \text{para outros tipos de navios} \end{cases} \quad (13)$$

$$R_{PL3} = 8(H_i/\lambda)d(Fn)^2 \quad (14)$$

Para calcular os valores dos ângulos de perda de estabilidade ϕ_v e do ângulo de banda devido à ação de um braço de inclinação, R_{PL3} , ϕ_s , onze casos de ondas são definidos conforme a seguir:

comprimento de onda, $\lambda = L$

$$\text{Altura de onda, } h = 0,01iL \quad , i = 0,1, \dots, 10$$

Para cada caso de onda, a crista da onda deve ser posicionada de dez formas diferentes em relação a meia nau: a crista na meia nau e a cada 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L; 0,5L a vante desse ponto e 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L; a ré desse ponto.

Para cada configuração definida acima, a curva de restauração (GZ) é calculada e, para cada curva obtém-se os valores do ângulo de perda de estabilidade ϕ_v e do ângulo de banda devido à ação de um braço de inclinação, R_{PL3} , ϕ_s .

Para os cálculos acima, uma onda senoidal deve ser usada sem perturbação hidrodinâmica devido ao navio. A pressão da água devido à onda deve incluir o efeito da velocidade da partícula da onda supondo que a profundidade da água é maior do que o comprimento da onda.

O valor de ϕ_v para cada caso de onda será o mínimo valor encontrado para ϕ_v entre os valores calculados para os diferentes posicionamentos da crista, sem considerar o ângulo de alagamento (*angle of downflooding*) e o valor de ϕ_s será o valor máximo encontrado.

Com os valores de ϕ_v e ϕ_s encontrados para cada caso é feita a relação entre h e os ângulos. Se a curva de altura versus ângulo apresentar um pico para um certo passo de onda h_p , o valor do pico deve ser usado quando o passo da onda for maior que h_p .

Para avaliar os critérios usa-se as 3% maiores alturas de onda H_i que é calculada filtrando ondas do oceano dentro do comprimento do navio. Para este fim, deve ser assumida uma forma de espectro de onda apropriada, conforme a seguir:

$$H_{ri}(L) = 5,9725\sqrt{m_0} \quad (15)$$

$$m_0 = \int_{0,01\omega_L}^{\omega_L} \left\{ \frac{\left(\frac{\omega^2 L}{g} \operatorname{sen} \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right) \right)^2}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right)^2} \right\} A \omega^{-5} e^{(-B\omega^4)} d\omega \quad (16)$$

$$+ \int_{\omega_L}^{3\omega_L} \left\{ \frac{\left(\frac{\omega^2 L}{g} \operatorname{sen} \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right) \right)^2}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right)^2} \right\} A \omega^{-5} e^{(-B\omega^4)} d\omega$$

$$A = 173H_s^2 T_{01}^{-4} \quad (17)$$

$$B = 691T_{01}^{-4} \quad (18)$$

$$T_{01} = 1,086T_Z \quad (19)$$

$$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (20)$$

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2g\pi}{L}} \quad (21)$$

Sendo L o comprimento do navio na linha d'água (m); H_s a altura significativa de onda (m) e T_Z o período de onda média de cruzamento zero positivo.

Se $H_{ri} > 0,1 L$ deve – se definir $H_{ri} = 0,1L$

Os valores de H_s e T_Z usados no cálculo de H_i são definidos na Tabela 61 dividido pela quantidade de observações dadas nesta tabela. Os valores dos ângulos ϕ_v e ϕ_s para cada H_i , são definidos através de interpolação linear da relação entre h e os ângulos ϕ_v e ϕ_s .

Com os valores de ϕ_v e ϕ_s para cada H_i , aplica-se o primeiro e o segundo critério, conforme definido nas Equações 50 e 52. Os valores de CR1 e CR2 são obtidos através do somatório de todas contribuições. O navio é considerado NÃO vulnerável se o maior valor entre CR1 e CR2 for MENOR que 0,06.

Para melhor entendimento é apresentado um algoritmo desse procedimento no Apêndice G. O fluxograma é apresentado a seguir:

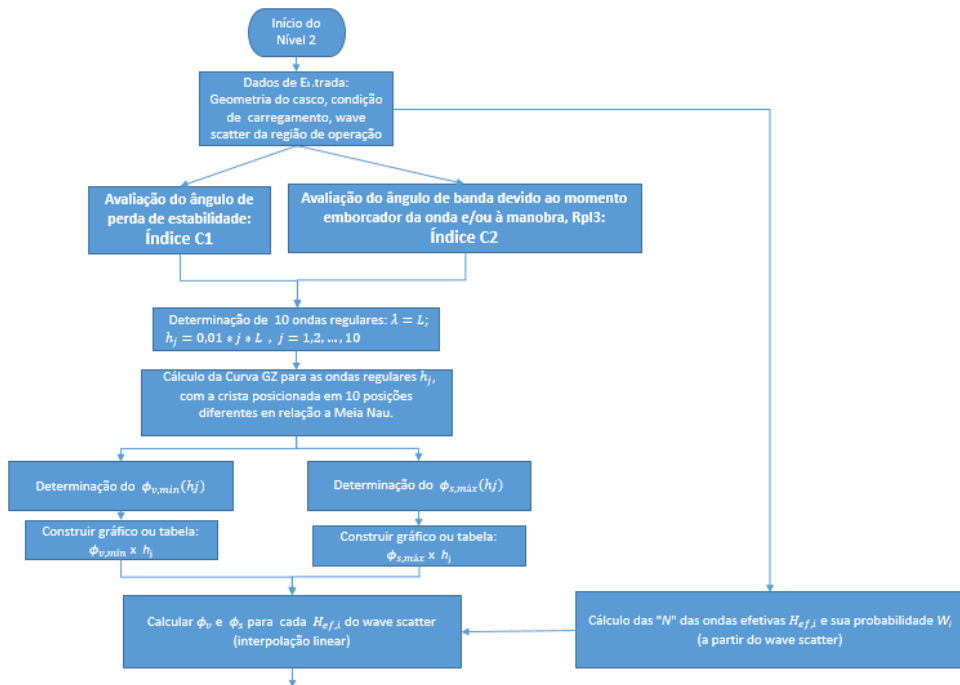


Figura 24- Perda Pura Nível 2- Part 1

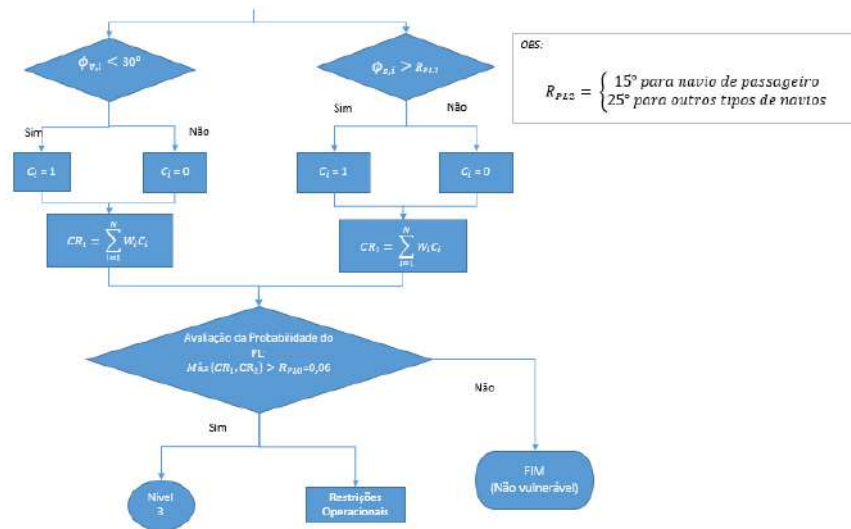


Figura 25- Perda Pura Nível 2- Part 2 (Continuação)

3.2 Roll paramétrico:

3.2.1 Primeiro nível

O primeiro nível do critério de avaliação de roll paramétrico, de acordo com a IMO SDC2/ WP.4, Anexo 2 (2015), baseia-se na análise da razão entre a amplitude de variação da altura metacêntrica quando uma onda longitudinal passa pelo navio (δGM_1) e o valor da altura metacêntrica em águas calmas (GM_C). O navio é considerado vulnerável a roll paramétrico se:

$$\frac{\delta GM_1}{GM_C} > R_{PR} \quad (22)$$

O valor de R_{PR} é calculado conforme descrito abaixo:

$$R_{PR} = \begin{cases} 1,87, & \text{se o navio for quinado, e, se não,} \\ 0,17 + 0,425 \left(\frac{100 A_K}{LB} \right), & \text{se } C_m \geq 0,96; \\ 0,17 + (10,625 C_m - 9,775) \left(\frac{100 A_K}{LB} \right), & \text{se } 0,94 < C_m < 0,96; \\ 0,17 + 0,2125 \left(\frac{100 A_K}{LB} \right), & \text{se } C_m \leq 0,94 \end{cases} \quad (23)$$

O valor de $\left(\frac{100 A_K}{LB} \right)$ não pode exceder a 4

Sendo C_m o coeficiente da seção mestra da condição de carregamento completamente carregada em águas calmas incluindo efeito de superfície livre (d_{full}); A_K é a área de projeto total das bolinas (m^2); L é o comprimento entre as perpendiculares (m) e B é a boca do navio.

O valor do δGM_1 pode ser calculado por dois métodos:

1º método para calcular δGM_1 :

Para utilizar esse método tem-se que verificar se a equação 3 é cumprida.

$$\frac{\nabla_D - \nabla}{A_{wp}(D - d)} \geq 1,0 \quad (24)$$

O lado esquerdo da equação pode ser interpretado como um coeficiente prismático vertical (C_{PV}) da parte do casco acima da superfície livre. Após verificar a compatibilidade do navio com o método pode-se calcular o δGM conforme a equação a seguir:

$$\delta GM_1 = \frac{I_H - I_L}{2\nabla} \quad (25)$$

Sendo D o Pontal moldado medido no lado do convés molhado; T é o calado correspondente da condição de carregamento em consideração; ∇ é o volume deslocado na condição de carregamento correspondente; ∇_D é o Volume deslocado na linha d' água igual a D ; I_H é o momento de inércia da linha d' água no calado d_H ; I_L é o momento de inércia da linha d' água no calado d_L e A_{wp} é a área de linha d' água no calado igual a d .

O maior e o menor calado são calculados conforme a seguinte equação:

$$d_H = d + \text{Min}\left(D - T, \frac{L \cdot S_W}{2}\right) \quad (26)$$

$$d_L = T - \text{Min}\left(d - 0,25d_{full}, \frac{L \cdot S_W}{2}\right)$$

Sendo S_W calculado conforme o Apêndice F, que usando o diagrama de dispersão para a zona náutica 34 (Atlântico Norte) recomendada pela IACCS é igual a:

$$S_W = 0,0167 \quad (27)$$

Esse método do cálculo do δGM_1 tem como pressuposto que a principal razão da variação do GM em ondas é a mudança de linha d' água na popa e na proa com a passagem da onda. Portanto, podemos concluir que para embarcações com áreas de linha d' água de popa e de proa mudando pouco com o calado esse método não seria o mais adequado. Esse fato é representado pela equação (24), que restringe a aplicabilidade do método. Analisando essa equação temos que o valor de $\frac{\nabla_D - \nabla}{A_{wp}(D - d)}$ só será maior que um quando a área de linha d' água aumentar com o aumento do calado.

2º método para calcular δGM_1 :

O δGM_1 pode ser determinado, também, como a metade da diferença entre os valores da altura metacêntrica máxima e mínima calculada para o navio, correspondente a condição de carregamento em consideração, em uma onda com as seguintes características:

$$\delta GM_1 = \frac{GM_{MAX} - GM_{MIN}}{2} \quad (28)$$

$$\text{Comprimento de onda } \lambda = L \quad (29)$$

$$\text{Altura de onda } h = L \cdot S_W$$

O δGM_1 será calculado para a onda centrada no centro longitudinal de gravidade do navio e a 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L; 0,5L a vante desse ponto e 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L a ré desse ponto. Esse procedimento pode ser visto em forma de fluxograma na Figura 63. A figura a seguir representa a variação da curva GZ, ao modificar a localização da crista da onda em relação a meia nau do navio.

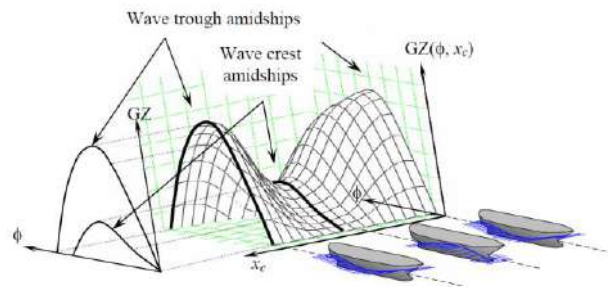


Figura 26- Momento de restauração. Fonte: (ABS, 2004).

Esse primeiro nível avalia a variação de estabilidade em ondas, levando em consideração que a frequência de encontro é igual a duas vezes a frequência natural de roll. Essa análise é feita em cima da equação de roll desacoplada considerando que o GM depende do tempo. Vale ressaltar que a dedução detalhada é dada no Apêndice B. Essa conclusão chega no seguinte resultado:

$$\frac{\delta GM}{GM_c} \geq \frac{4\delta}{\omega_0} \quad (30)$$

Portanto, o critério dependerá do fator de amortecimento δ , da frequência de oscilação em águas calmas ω_0 , que conforme é dado no Apêndice são dados por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_c}{I_x + A_{44}}} \rightarrow \delta GM = \omega_a^2 \cdot \left(\frac{\Delta}{I_x + A_{44}} \right) \quad (31)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{B_{44}}{I_x + A_{44}} \quad (32)$$

Com isso temos que o limite de R_{PR} é calculado de acordo com o fator de amortecimento δ e da frequência de oscilação em águas calmas ω_C . Cabe ressaltar que no caso de embarcações quinadas e com bolinas o fator de amortecimento é maior e, portanto, o limite para ocorrência de roll paramétrico cresce, conforme dado no critério.

Para melhor entendimento é apresentado um algoritmo desse procedimento no Apêndice H. O fluxograma é apresentado a seguir, com os “loops” são apresentados no apêndice H:

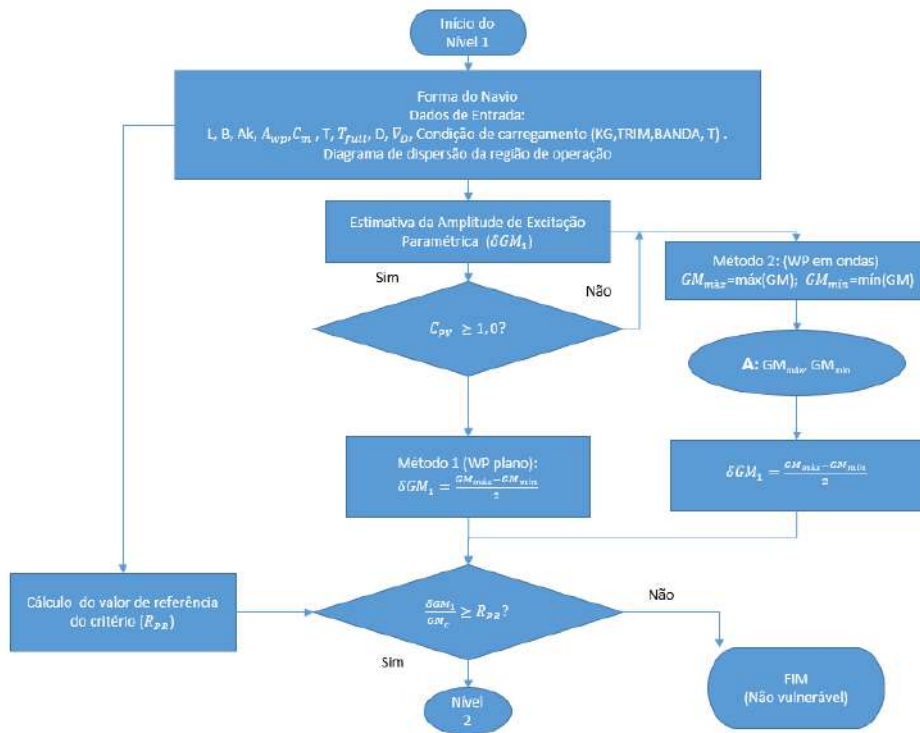


Figura 27- Fluxograma Nível 1 -Roll Paramétrico

3.2.2 Segundo nível

O segundo nível de verificação de vulnerabilidade para roll paramétrico consiste em verificar os valores de $C1$ e $C2$, em relação a $R_{PR0} = 0,06$. Se $C1$ e $C2$ forem maiores que R_{PR0} o navio é vulnerável a sofrer esse modo de falha, ou seja:

$$C1 > R_{PR0} = 0,06 \quad (33)$$

$$C2 > R_{PR0} = 0,06$$

A primeira verificação pode ser considerada como a continuação do primeiro nível. Porém, nesse nível, a variação de GM é considerada em uma série de ondas e não

apenas em uma onda especifica como no primeiro nível. É realizado também uma verificação para a velocidade do navio.

O valor para C1 é calculado como uma média ponderada de um conjunto de ondas especificado na

, sendo W_i o fator de peso para respectiva onda especificado na tabela 1 e N o número de ondas analisadas, considerada pela tabela 5, que para zona 34 (Atlântico Norte) é igual a 16.

$$C1 = \sum_{i=1}^N W_i C_i \quad (34)$$

Vale ressaltar que a tabela 5 é definida para o espectro de mar fornecido pela recomendação N° 34 da IACS, se for utilizado, ou necessário usar, um espectro diferente, a tabela 5 pode ser determinada através dos passos fornecidos no Apêndice F.

O valor de C_i é definido conforme se segue:

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{se } GM(H_i, \lambda_i) > 0 \text{ e } \frac{\delta GM(H_i, \lambda_i)}{GM_m(H_i, \lambda_i)} < R_{PR} \\ 1 & \text{se o critério acima não for satisfeito} \end{cases} \quad (35)$$

Sendo o valor de R_{PR} conforme calculado no primeiro nível, H_i e λ_i altura da onda e o comprimento de onda, respectivamente, especificados na Tabela 1. O $\delta GM(H_i, \lambda_i)$ é definido como sendo a metade da diferença entre os valores máximo e mínimo da altura metacêntrica calculada para o navio, correspondente à condição de carregamento analisada, considerando o navio equilibrado em trim e banda numa série de ondas caracterizada por um H_i e um λ_i , ou seja:

$$\delta GM(H_i, \lambda_i) = \frac{GM_{MAX}(H_i, \lambda_i) - GM_{MIN}(H_i, \lambda_i)}{2} \quad (36)$$

O $GM_m(H_i, \lambda_i)$ é o valor médio da altura metacêntrica calculada para o navio, correspondente à condição de carregamento analisada, considerando o navio equilibrado em trim e banda numa série de ondas caracterizada por um H_i e um λ_i .

O $\delta GM(H_i, \lambda_i)$ e o $GM_m(H_i, \lambda_i)$ serão calculados para a onda centrada na meia-nau do navio e a $0,1\lambda_i$; $0,2\lambda_i$; $0,3\lambda_i$; $0,4\lambda_i$; $0,5\lambda_i$ a vante desse ponto e $0,1\lambda_i$; $0,2\lambda_i$; $0,3\lambda_i$; $0,4\lambda_i$ a ré desse ponto. Esse procedimento é apresentado pelo fluxograma da Figura 65 e pelo fluxograma da Figura 64.

Além da verificação de C1, temos a verificação da velocidade do navio. O requerimento da velocidade do navio em ondas é satisfeito se, para onda especificada na Tabela 1.

$$V_{PRi} > V_S \quad (37)$$

Sendo $V_S \left(\frac{m}{s}\right)$ a velocidade de serviço e $V_{PRi} \left(\frac{m}{s}\right)$ a velocidade de referência do navio correspondente à condição de sintonia da primeira região de Mathieu para ressonância paramétrica, quando $GM(H_i, \lambda_i) > 0$, definido por:

$$V_{PRi} = \left| \frac{2\lambda_i}{T_\phi} \cdot \sqrt{\frac{GM(H_i, \lambda_i)}{GM_C}} - \sqrt{g \frac{\lambda_i}{2\pi}} \right| \quad (38)$$

T_ϕ é o período natural de roll em águas calmas (s), definido no apêndice A, GM_C é a altura metacêntrica em águas calmas da condição de carregamento em consideração, considerando o navio em equilíbrio em trim e banda;

A equação que calcula a velocidade de referência tem como base a primeira zona de instabilidade, que ocorre quando $\omega_e = 2\omega_c$, sendo ω_c a frequência natural de roll em águas calmas, conforme é apresentado a seguir.

A frequência de encontro é dada por:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V_S \cos \beta \quad (39)$$

Para grandes profundidades:

$$\omega^2 = gk_0 = g \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \omega = \sqrt{g \frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{\sqrt{g2\pi\lambda}}{\lambda} = \frac{\sqrt{2\pi}}{\lambda} \sqrt{g\lambda} \quad (40)$$

Logo:

$$\omega_e = \frac{\sqrt{2\pi}}{\lambda} (\sqrt{g\lambda} - V_S \sqrt{2\pi} \cos \beta) \quad (41)$$

Sendo β o ângulo de aproamento que é igual a 0 em mar de popa e V_S a velocidade de referência. Isolando a velocidade e considerando, mar de popa:

$$V_S = \frac{\left(-\frac{\omega_e \lambda}{\sqrt{2\pi}} + \sqrt{g\lambda}\right)}{\sqrt{2\pi}} \quad (42)$$

Para a primeira zona de instabilidade ($\omega_e = 2\omega_c$):

$$V_S = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} - \frac{2\omega_c \lambda}{2\pi}} \quad (43)$$

E como $T_\phi = \frac{2\pi}{\omega_c}$, tem-se que:

$$V_s = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} - \frac{2\lambda}{T_\phi}} \quad (44)$$

A equação acima não leva em consideração a amplitude da zona de instabilidade, para tal, é introduzido um termo na equação, dado pela equação 24.

$$V_s = \left| \frac{2\lambda_i}{T_\phi} \cdot \sqrt{\frac{GM(H_i, \lambda_i)}{GM_c}} - \sqrt{g \frac{\lambda_i}{2\pi}} \right| \quad (45)$$

Tabela 1- Casos de onda para avaliação de roll paramétrico

Case number i	Weight W_i	Wave length λ_i [m]	Wave height H_i [m]
1	1.300E-05	22.574	0.35
2	1.654E-03	37.316	0.495
3	2.091E-02	55.743	0.857
4	9.280E-02	77.857	1.295
5	1.992E-01	103.655	1.732
6	2.488E-01	133.139	2.205
7	2.087E-01	166.309	2.697
8	1.290E-01	203.164	3.176
9	6.245E-02	243.705	3.625
10	2.479E-02	287.931	4.04
11	8.367E-03	335.843	4.421
12	2.473E-03	387.44	4.769
13	6.580E-04	442.723	5.097
14	1.580E-04	501.691	5.37
15	3.400E-05	564.345	5.621
16	7.000E-06	630.684	5.95

O valor de $C2$ é calculado como uma média de valores de $C2 (Fn_i)$, cada um dos quais é uma média ponderada do conjunto de ondas especificado na Tabela 61, para cada conjunto de números de Froude e direções de onda especificadas:

$$C2 = \left[\sum_{i=1}^3 C2_h(Fn_i) + C2_h(0) + \sum_{i=1}^3 C2_f(Fn_i) \right] / 7 \quad (46)$$

$$C2_h(Fn) = \sum_{i=1}^N W_i C_i \quad (47)$$

$$C2_f(Fn) = \sum_{i=1}^N W_i C_i \quad (48)$$

O valor de $C2_h(Fn)$ é calculado para o caso em que o navio se encontra em ondas de proa com velocidade igual a V_i e o valor de $C2_f(Fn)$ para o caso em que o navio se encontra em ondas de popa com velocidade igual a V_i , sendo V_i dado por:

$$Fn_i = \frac{V_i}{\sqrt{Lg}} \quad (49)$$

$$V_i = V_s K_i \quad (50)$$

O valor de K_i é definido na Tabela 2.

Tabela 2- Fator de velocidade correspondente, K_i

i	K_i
1	1.0
2	0.866
3	0.50

Sendo:

$$C_i = \begin{cases} 1, & \text{se o ângulo máximo de roll for maior que } 25^\circ \\ 0, & \text{de forma contrária} \end{cases} \quad (51)$$

N é o número total de casos de onda para os quais o ângulo de roll máximo é avaliado para uma combinação de velocidade e ângulo de incidência do navio. O valor de W_i é obtido da Tabela 61 ou uma tabela equivalente de dados de onda Satisfatória para a Administração.

Esse ângulo de roll máximo é avaliado para um mar irregular, sendo esse aproximado por ondas regulares equivalentes (efetivas), tendo comprimento de onda fixada e igual ao comprimento do navio e altura e valor médio variando de acordo com um processo estocástico, conforme o conceito desenvolvido por Brim (1961) e abordado por Bulian (2008).

A altura de onda representativa, H_{ri} , é obtida através de uma composição de um período médio de cruzamento entre zeros da onda, T_{zi} , e uma altura de onda significativa, H_{si} , obtidos na Tabela 61. O valor de H_{ri} é obtido conforme a seguir:

$$H_{ri} = 4,0043\sqrt{m_0} \quad (52)$$

$$m_0 = \int_{0,01\omega_L}^{\omega_L} \left\{ \frac{\left(\frac{\omega^2 L}{g} \operatorname{sen} \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right) \right)^2}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right)^2} \right\} A \omega^{-5} e^{-B\omega^4} d\omega \quad (53)$$

$$+ \int_{\omega_L}^{3\omega_L} \left\{ \frac{\left(\frac{\omega^2 L}{g} \operatorname{sen} \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right) \right)^2}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2 L}{2g} \right)^2} \right\} A \omega^{-5} e^{-B\omega^4} d\omega$$

$$A = 173 H_{si}^2 T_{01}^{-4} \quad (54)$$

$$B = 691 T_{01}^{-4} \quad (55)$$

$$T_{01} = 1,086 T_{zi} \quad (56)$$

$$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (57)$$

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2g\pi}{L}} \quad (58)$$

Se $H_{ri} > 0,1 L$ deve – se definir $H_{ri} = 0,1L$

Para calcular o valor de C_i dado pela equação 51, é necessário encontrar ângulo máximo de roll para cada altura de referência H_{ri} . Para tal, utiliza-se onze casos de onda, sendo que para cada caso de onda calcula-se o ângulo máximo de roll, através da solução numérica da equação de roll, conforme o apêndice C, ou através de uma solução analítica, conforme o apêndice D. Esse procedimento é representado pelos fluxogramas da Figura 66.

Esses casos de onda são definidos conforme abaixo:

Comprimento da onda, $\lambda = L$

*Altura da onda, $h_j = 0,01 * j * L$, sendo $j = 0,1,2, \dots, 10$*

O ângulo máximo de roll correspondente a cada onda representativa, H_{ri} é obtido por interpolação linear dos ângulos máximos de roll calculados para diferentes alturas de ondas, h_j , conforme acima. Esse procedimento é ilustrado pelo fluxograma da Figura 67.

O primeiro nível e a primeira avaliação do segundo nível do critério de estabilidade de Roll Paramétrico são baseados na avaliação da equação desacoplada de roll, considerando o GM variando com o tempo, por uma função senoidal, tomando como referência a primeira zona de instabilidade, que ocorre quando a frequência de encontro é igual a duas vezes a frequência de oscilação de roll. Cabe ressaltar que a diferença entre o primeiro nível e a primeira avaliação do segundo nível é que no primeiro nível é considerado somente uma onda, com o comprimento igual ao comprimento do navio,

enquanto que no segundo nível, primeira verificação é considerado um faixa de ondas. Ainda na primeira avaliação do segundo nível é feita uma análise da velocidade de serviço em relação a velocidade de referência para a ocorrência de roll paramétrico, que é encontrada considerando que a frequência de encontro é duas vezes a frequência de oscilação natural de roll variando com a passagem da onda. A equação linear de roll estudada nessas análises é um modelo adequado para identificar o início do fenômeno de roll paramétrico. Entretanto, não é possível prever com esse modelo a amplitude do movimento de roll, já que uma vez que iniciada a ressonância paramétrica em um sistema linear, a amplitude irá crescer sem nenhum limite. Além disso, o ângulo máximo de roll é alcançado durante o estado estacionário do roll paramétrico. Portanto, é necessária uma parte grande da curva GZ para encontrar o ângulo máximo de roll

A segunda avaliação do segundo nível desse critério tem como objetivo analisar a amplitude máxima de roll do movimento, tendo como base para análise a equação de roll desacoplada, considerando a embarcação em equilíbrio em trim e banda, considerando a curva GZ completa variando com a passagem da onda e a variação do amortecimento.

Para melhor entendimento é apresentado um algoritmo desse procedimento no Apêndice H. O fluxograma é apresentado a seguir, com os “loops” são apresentados no apêndice H.

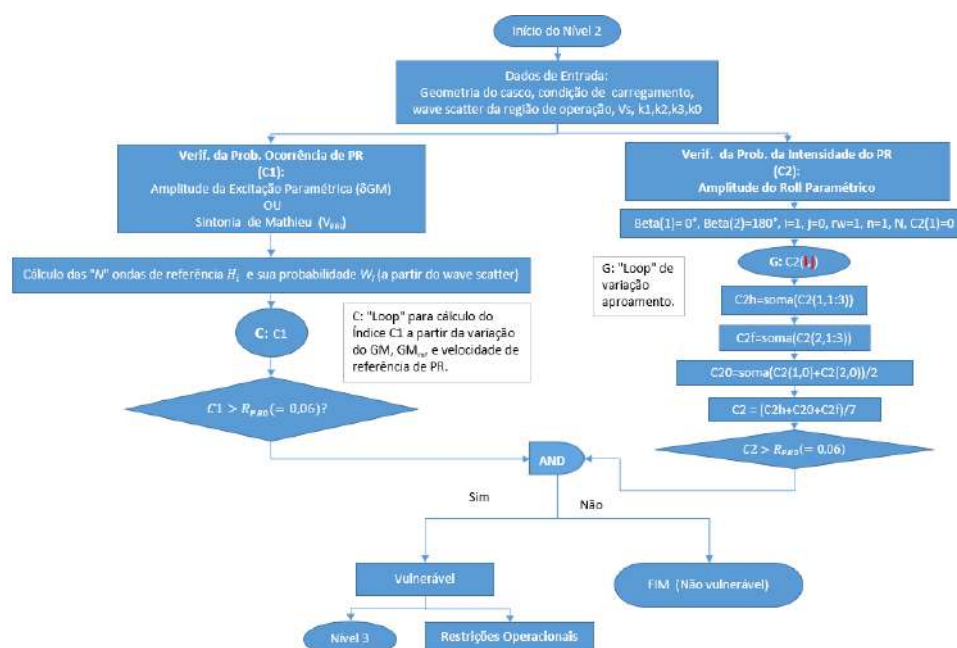


Figura 28- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico

Capítulo 4

Estudo de caso

Os critérios da segunda geração da IMO serão avaliados utilizando o programa DSSTAB. Os resultados encontrados para o C11 e para o PSV são apresentados a seguir:

4. 1 Porta-contentor post panamax C11:

As características do Porta Contendor *Post Panamax* C11 são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3- Características do C11

Comprimento do navio	L (m)	262
Boca	B(m)	40
Área projetada da bolina	Ak(m ²)	58,023
Pontal	D (m)	24,45

O casco foi modelado a partir do plano de linhas e geometria 3D fornecidos pelo grupo da França ao SCD no programa MG (COELHO *et al.*, 2000) e depois foi exportado para os programas SSTAB (COELHO *et al.*, 2008) e DSSTAB. A geometria obtida é apresentada pela Figura 29.

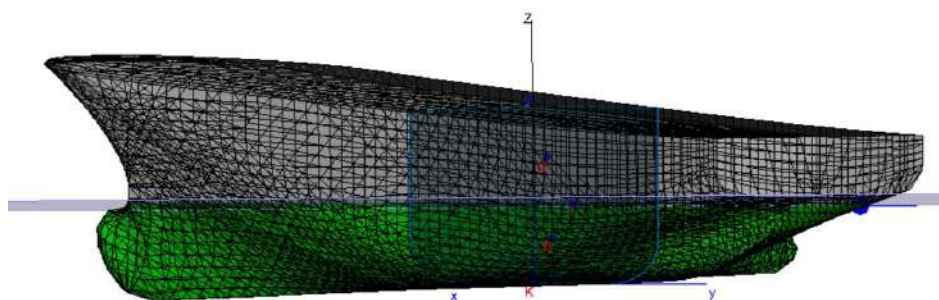


Figura 29- Post Panamax C11

4.1.1 Perda pura de estabilidade:

4.1.1.1 Primeiro Nível:

A análise e comparação do porta-contentor C11 para perda pura de estabilidade foi iniciada no nível 1, através da entrada dos dados requeridos. As características

principais são apresentadas na Tabela 3 e a condição de carregamento é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4- Condição de carregamento

Volume deslocado	$\nabla (m^3)$	71562
Deslocamento no calado D	$\nabla_D (m^3)$	190863
Área de linha d'água no calado D	$A_{WP} (m^2)$	8315,309
Altura do centro de gravidade	KG (m)	18,9
Trim	TRIM	0,00

O próximo passo é verificar o Número de Froude. A velocidade de serviço da embarcação é de 12,86 metros por segundo, resultando em um Número de Froude de 0,254, como esse valor é maior que 0,24 a verificação do primeiro nível de perda pura de estabilidade pode ser aplicada.

O próximo procedimento é realizar a estimativa da altura metacêntrica mínima. Como o coeficiente prismático vertical é maior do que 1, ou seja, a área de linha d'água aumenta com o aumento do calado, é possível realizar essa estimativa por dois métodos diferentes.

Aplicando o primeiro método, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Cálculo do GMmín – primeiro método- C11

d	12,00
$d - 0,25d_{full}$	9,00
$LS_w/2$	4,3754
d_L	7,625
IL-Momento de inércia do plano de flutuação no calado $d_L (m^4)$	689166
GMmin (m)	-2,426

A altura metacêntrica mínima encontrada foi de -2,426 metros, sendo menor que o valor limite para a ocorrência desse modo de falha, para esse nível de avaliação, na condição de carregamento considerada.

O segundo método não seria necessário, já que essa condição pelo primeiro método já apresentou vulnerabilidade para esse modo de falha, porém como o segundo nível já é calculado automaticamente na ferramenta do DSSTAB ele também foi apresentado.

O segundo método calcula o $GM_{\text{mínimo}}$ como sendo a altura metacêntrica mínima calculada para o navio, correspondente a condição de carregamento em consideração, considerando a superfície livre igual a superfície da onda e sua crista posicionada de 10 formas diferentes (com a crista centrada na Meia Nau e a 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L; 0,5L a vante desse ponto e 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L a ré desse ponto). A onda terá comprimento igual ao comprimento do navio, ou seja, de 262 metros, sendo esse o pior caso para ocorrência desse modo de falha segundo a física do problema e altura igual ao comprimento do navio vezes a declividade S_W , resultando em uma altura de 8,751 metros. Os valores encontrados para o GM, para cada posicionamento e o GM mínimo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Resultados do segundo método

Posições Longitudinais da crista da onda	GM
-104,8	2,459
-78,6	0,800
-52,4	-0,205
-26,2	-0,540
0	-0,375
26,2	0,578
52,4	2,823
78,6	3,690
104,8	4,164
131	3,951
Gmin	-0,540

O menor valor encontrado para a altura metacêntrica nesse método foi de -0,540. Esse valor foi encontrado para o caso em que a crista da onda está posicionada próxima da meia nau, como já seria possível prever pela física do problema e formato do casco analisado.

O GM_{min} encontrado foi de -2,426 metros no primeiro método, como ele é menor que 0,05 o navio é considerado vulnerável à perda pura de estabilidade para essa condição de carregamento, nesse nível de análise.

4.1.1.2 Segundo Nível:

O segundo nível é iniciado com a entrada de dados. Os dados de entrada do segundo nível são os mesmos do primeiro nível, os quais foram fornecidos na Tabela 4.

Nesse nível, dois modelos são usados, um com a malha menos refinada, porém com menor tempo de processamento e outra mais refinada e, por conseguinte, maior

tempo de processamento. Esse procedimento é realizado para observar a influência da malha nos resultados. Os resultados dos dois modelos foram comparados.

O próximo passo é definir as 10 ondas regulares de referência que serão usadas. Essas ondas possuem comprimento igual ao comprimento entre perpendiculares do navio e as alturas são definidas conforme a seguir:

$$\text{Altura de onda: } h = 0,01iL, i = 0,1, \dots, 10$$

Porém, com base nos estudos realizados para o C11 pela delegação da França do SDC, definiu-se as alturas como sendo uma fração da altura efetiva máxima encontrada conforme apresentado a seguir:

$$\text{Altura de onda: } h = 0,01iH_{eff,max}, i = 0,1, \dots, 10$$

Sendo assim, possível de comparar os resultados encontrados nesse trabalho com os resultados encontrados pela delegação da França.

As características das ondas de referência encontradas para o cálculo do ângulo de perda de estabilidade e ângulo de banda devido ao momento emborcador, Rpl3, junto com o valor do braço emborcador são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Ondas de referência

Onda	L	i	h	Rpl3
0	262	0	0	0,000
1	262	1	1,7803	0,042
2	262	2	3,5606	0,084
3	262	3	5,3409	0,126
4	262	4	7,1212	0,168
5	262	5	8,9015	0,210
6	262	6	10,6818	0,252
7	262	7	12,4621	0,294
8	262	8	14,2424	0,336
9	262	9	16,0227	0,378
10	262	10	17,803	0,420

Para cada onda da Tabela 7 é calculada a curva GZ em ondas, considerando a crista da onda posicionada em 10 posições diferentes. As curvas e valores encontrados pelas simulações com o DSSTAB (para a malha mais leve) são fornecidos no Apêndice I, da Figura 70 até a Figura 78. A seguir é apresentada a curva GZ para o primeiro caso de onda, sendo essa uma exemplificação do resultado encontrado e apresentado no apêndice I.

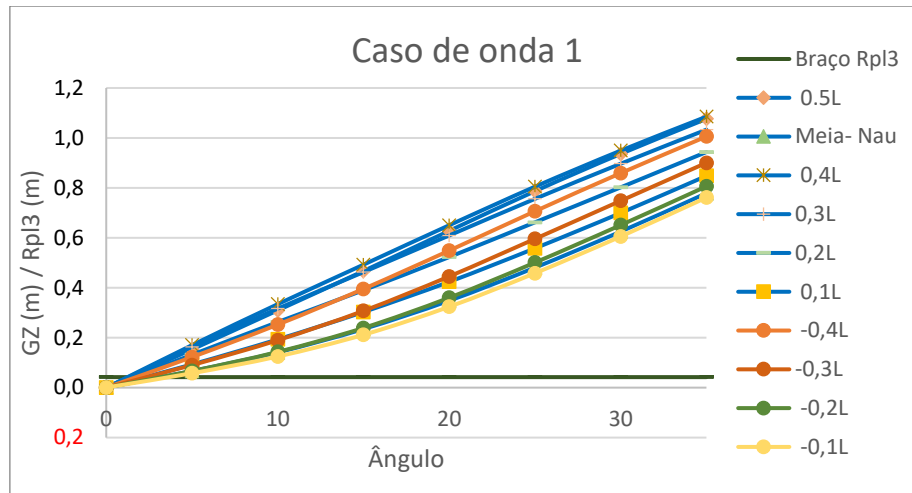


Figura 30- Curva GZ – Caso de onda 1

A curva azul com pontos rosa claro da Figura 30 é referente ao caso em que a crista da onda está localizada 104,8 metros avante da meia nau (0,4L), essa curva possui os valores do braço de restauração (GZ) maiores que dos outros casos, como esperado, já que quando o cavado da onda está localizado próximo da meia nau, o calado à meia nau é menor e o calado na proa e na popa maior, resultando em uma área molhada maior do que em águas calmas, ou seja, resultando em aumento de estabilidade. Observando essa mesma figura percebe-se que o braço de restauração diminui quando a crista caminha em direção a meia nau, tendo o seu menor valor para -0,1L, sendo esse próximo da meia nau. A curva volta a crescer (maiores valores de GZ) quando a crista da onda “caminha” para a ré do casco. Esse comportamento já era esperado, devido ao formato do casco.

Para uma sensibilidade da diferença de resultados entre os dois modelos rodados no DSSTAB (malha leve x malha pesada), uma comparação entre as curvas GZ para o primeiro caso de onda e o decimo caso de onda foram realizadas. As comparações entre as curvas são apresentadas na Figura 31 e na Figura 32.

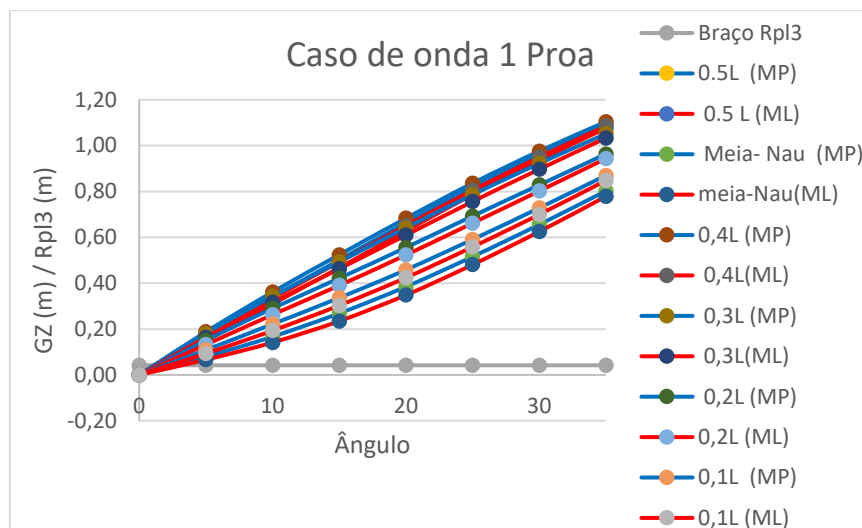


Figura 31- Curva GZ- Caso de onda 1

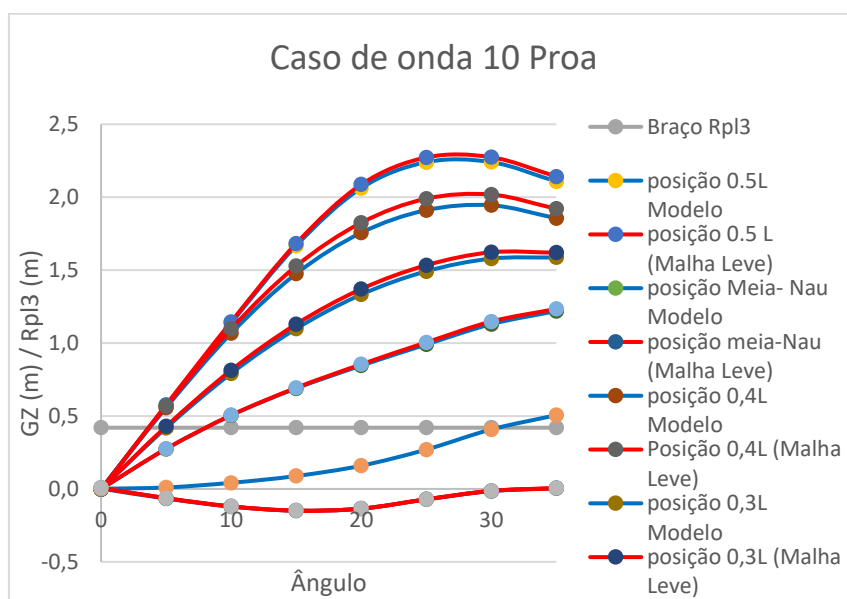


Figura 32- Curva GZ- Caso de onda 10

As curvas dos dois modelos estão bem próximas, dessa forma, é possível concluir que não é necessária uma malha muito refinada para realizar os cálculos, sendo assim, o tempo de processamento computacional é reduzido.

Seguindo os cálculos do segundo nível, a próxima ação é determinar o ângulo de perda de estabilidade e o ângulo de banda devido ao braço emborcador Rpl3 para cada curva GZ em ondas encontrada. Os ângulos encontrados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Ângulos de perda de estabilidade e de banda devido ao braço emborcador Rpl3

Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0,00	0,000	35	0,000	35	0,000
1	1,78	0,042	35	3,629	35	3,629
2	3,56	0,084	35	13,334	35	13,334
3	5,34	0,126	35	22,573	35	22,573
4	7,12	0,168	35	28,389	35	28,389
5	8,90	0,210	35	32,687	35	32,687
6	10,68	0,252	35	35	35	35
7	12,46	0,294	35	35	35	35
8	14,24	0,336	35	35	35	35
9	16,02	0,378	0	35	0	35
10	17,80	0,420	0	35	0	35

Vale relembrar que se a curva de altura versus ângulo apresentar um pico para um certo passo de onda h_p , o valor do pico deve ser usado. Entretanto, como esse procedimento não foi feito no estudo da França, optou-se por não utilizar esse procedimento para o C11, podendo assim comparar os resultados encontrados com os resultados da França.

O ângulo de perda de estabilidade foi considerado igual a zero se a curva GZ for toda negativa até o ângulo de 35 graus e considerada igual a 35 graus se a curva GZ for positiva e não cruzar o eixo das abscissas até 35 graus. Vale ressaltar a diferença entre o ângulo de perda de estabilidade e o ângulo de banda permanente. Quando a curva GZ começa negativa e depois torna-se positiva, o ângulo de GZ dessa tradição é o ângulo de banda permanente (*loll angle*). Já o ângulo de perda de estabilidade (angle of vanishing stability) é o ângulo em que a curva GZ torna-se negativa. A definição desses ângulos é apresentada na Figura 33.

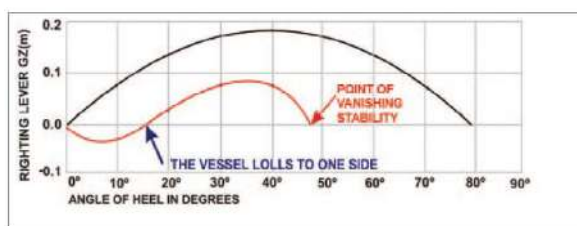


Figura 33- Ângulo de perda de estabilidade e ângulo de banda permanente.

Fonte: (Gudmundsson, 2009)

Analisando as curvas de restauração da Figura 31 e da Figura 32 e observando também a Tabela 8 é possível concluir que quanto maior a altura da onda, maior é a variação da restauração e maior será a perda de estabilidade devido a passagem da onda.

O próximo passo é definir as alturas efetivas para cada combinação de H_s e T_z da tabela de dispersão e calcular os ângulos de perda de estabilidade e os ângulos de banda devido ao braço emborcador R_{pl3} para todas as alturas efetivas, através de interpolação linear das 10 ondas de referência. Esses ângulos são avaliados conforme as Equações 50 e 52. A Tabela 63, no apêndice I, apresenta os resultados encontrados para esse procedimento.

Os valores de CR1 e CR2 encontrados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Valores de CR1 e CR2

CR1	CR2	Vulnerável?
0,000109	0,094216	Sim

Analisando o resultado, conclui-se o C11 é vulnerável a esse modo de falha.

4.1.2 Roll paramétrico:

4.1.2.1 Primeiro Nível:

A análise do porta-contentor C11 para roll paramétrico foi iniciada no nível 1, através da entrada dos dados requeridos. As características principais e a condição de carregamento são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10- Condição de carregamento

Coefficiente de seção mestra	C_m	0,96
Deslocamento no calado D	$\nabla D (m^3)$	190863
Área de linha d'água no calado T	$A_{WP} (m^2)$	8315,3
Volume deslocado	$\nabla (m^3)$	71560
Altura do centro de gravidade	KG (m)	17,54
Trim	TRIM	0
GM em água calmas	GM	2,751

O próximo procedimento é realizar a estimativa da variação da altura metacêntrica com a passagem da onda. Como o coeficiente prismático vertical é igual a 1,152, maior do que 1, é possível realizar essa estimativa por dois métodos diferentes:

1º método para cálculo do δGM_1 :

Nesse método, a variação da altura metacêntrica é calculada como sendo a razão entre a diferença do momento de inércia do plano de flutuação do calado alto e calado baixo por duas vezes o volume. Para esse procedimento somente dados hidrostáticos são usados. Aplicando o critério, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11- Resultados do primeiro método

d	12
$d - 0,25d_{full}$	9
$LS_w/2$	2,1877
dh	14,188
dL	9,813
IL-Momento de inércia do plano de flutuação no calado dL (m ⁴)	823825
Ih-Momento de inércia do plano de flutuação no calado dh (m ⁴)	1093411
δGM_1	1,884
$\delta GM_1/GM_c$	0,685

O valor crítico de referência para a ocorrência de roll (R_{pr}) calculado foi de 0,405, ou seja, para que ocorra roll paramétrico é necessário que a variação da altura metacêntrica em ondas seja maior que 40,5% da altura metacêntrica em águas calmas. O valor encontrado da variação da altura metacêntrica foi de 1,884 metros que representa 68,5% da altura metacêntrica em águas calmas. Dessa forma, o C11, para essa condição de carregamento, encontra-se dentro da faixa de vulnerabilidade para ocorrência de roll paramétrico, para esse primeiro método.

2º método para cálculo do δGM_1 :

O segundo método calcula o δGM como sendo a metade da diferença entre os valores da altura metacêntrica máxima e mínima calculada para o navio, correspondente a condição de carregamento em consideração, em uma onda posicionada de 10 formas diferentes (com a crista centrada na Meia Nau e a 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L; 0,5L a vante desse ponto e 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L a ré desse ponto). A onda terá comprimento igual ao comprimento do navio, ou seja, de 262 metros, sendo esse o pior caso para ocorrência de roll paramétrico segundo a física do problema e altura igual ao comprimento do navio vezes a declividade S_w , resultando em uma altura de 4,375 metros. Os valores encontrados para o GM, para cada posicionamento, o GM máximo e mínimo e o δGM , assim como a razão $\delta GM_1/GM_c$ são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Resultados do segundo método

Posições Longitudinais da crista da onda	GM - Modelo
-104,8	3,218
-78,6	2,317
-52,4	1,713
-26,2	1,478
0	1,636
26,2	2,355
52,4	3,657
78,6	4,297
104,8	4,495
131	4,187
GM Mínimo	1,478
GM Máximo	4,495
δGM_1	1,508
$\delta GM_1/GMc$	0,548

A maior altura metacêntrica encontrada foi para a crista da onda localizada a 104,8 metros avante da meia nau e a menor altura foi para a crista localizada a 26,2 metros para a ré da meia nau. Esses resultados estão consistentes com a física do problema, já que quando o cavado da onda está localizado próximo da meia nau, o calado à meia nau é menor e o calado na proa e na popa maior, resultando em uma área molhada maior do que em águas calmas, ou seja, resultando em aumento de estabilidade. Entretanto, quando a crista da onda está localizada na meia nau, a situação é invertida, o calado na proa e na popa são menores e na meia nau maior, o que faz com que a área do plano de linha d'água seja menor, resultando em diminuição de estabilidade.

O valor encontrado da variação da altura metacêntrica nesse caso foi de 1,508 metros que representa 54,8% da altura metacêntrica em águas calmas. Esse valor está acima do valor crítico de referência que é igual a 40,5%. Dessa forma, o C11, para essa condição de carregamento, encontra-se dentro da faixa de vulnerabilidade para ocorrência de roll paramétrico, para esse segundo método.

4.1.2.2 Primeiro Nível:

O segundo nível de verificação de vulnerabilidade para roll paramétrico consiste em verificar os valores de $C1$ e $C2$, em relação a $R_{PR0} = 0,06$. Se os valores de $C1$ e $C2$ forem menores que R_{PR0} o navio NÃO é vulnerável a sofrer esse modo de falha. O fluxograma do segundo nível é apresentado na Figura 28.

A primeira verificação pode ser considerada como a continuação do primeiro nível. Porém, nesse nível, a variação de GM é considerada para 16 ondas. É introduzida também uma verificação para a velocidade do navio. As características das ondas usadas são fornecidas na Tabela 13.

Tabela 13- Dados das ondas utilizadas na análise

Caso de onda	W_i	$\lambda_i(m)$	$H_i(m)$	S_{wi}
1	0,000013	22,566	0,350	0,01550
2	0,001654	37,303	0,495	0,01327
3	0,020912	55,724	0,857	0,01538
4	0,092799	77,830	1,295	0,01663
5	0,199218	103,620	1,732	0,01671
6	0,248788	133,094	2,205	0,01656
7	0,208699	166,252	2,697	0,01621
8	0,128984	203,095	3,176	0,01563
9	0,062446	243,622	3,625	0,01487
10	0,02479	287,833	4,040	0,01403
11	0,008367	335,728	4,421	0,01316
12	0,002473	387,308	4,769	0,01231
13	0,000658	442,572	5,097	0,01151
14	0,000158	501,520	5,370	0,01070
15	0,000034	564,152	5,621	0,00996
16	0,000007	630,469	5,950	0,00943

Além da variação δGM_1 , também é verificada a velocidade de referência de roll V_{PRI} , se essa velocidade for menor que a velocidade de serviço o navio pode sofrer roll paramétrico. Os resultados, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Resultados para o C11

Caso de onda	h_j [m]	λ_i [m]	GM min [m]	GMmax [m]	GMm [m]	dGM [m]	dGM/GM [1]	GM Status	V_{PRI} [m/s]	Speed Status	Status	Ci Wi [1]
1	0,35	22,57	2,717	2,781	2,755	0,032	0,012	OK	3,862	FAIL	OK	0
2	0,50	37,32	2,689	2,822	2,753	0,067	0,024	OK	4,205	FAIL	OK	0
3	0,86	55,74	2,611	2,888	2,748	0,138	0,050	OK	4,213	FAIL	OK	0
4	1,29	77,86	2,535	2,976	2,790	0,221	0,079	OK	3,825	FAIL	OK	0
5	1,73	103,66	2,421	3,229	2,774	0,404	0,146	OK	3,162	FAIL	OK	0
6	2,21	133,14	2,379	3,137	2,790	0,379	0,136	OK	2,104	FAIL	OK	0
7	2,70	166,31	1,912	3,694	2,865	0,891	0,311	OK	0,527	FAIL	OK	0
8	3,18	203,16	1,654	4,123	2,958	1,234	0,417	FAIL	1,536	FAIL	FAIL	0,12898
9	3,63	243,70	1,608	4,267	3,005	1,330	0,443	FAIL	3,883	FAIL	FAIL	0,06245
10	4,04	287,93	1,677	4,248	3,028	1,286	0,425	FAIL	6,538	FAIL	FAIL	0,02479
11	4,42	335,84	1,785	4,159	3,018	1,187	0,393	OK	9,404	FAIL	OK	0

Caso de onda	h_j [m]	λ_i [m]	GM min [m]	GMmax [m]	GMm [m]	dGM [m]	dGM/GM [1]	GM Status	V_{PRi} [m/s]	Speed Status	Status	Ci Wi [1]
12	4,77	387,44	1,903	4,045	2,999	1,071	0,357	OK	12,554	OK	OK	0
13	5,10	442,72	2,020	3,933	2,977	0,956	0,321	OK	16,003	OK	OK	0
14	5,37	501,69	2,114	3,782	2,944	0,834	0,283	OK	19,675	OK	OK	0
15	5,62	564,35	2,197	3,631	2,912	0,717	0,246	OK	23,633	OK	OK	0
16	5,95	630,68	2,260	3,489	2,883	0,615	0,213	OK	27,910	OK	OK	0

Cada coluna da Tabela 14 representa um caso de onda, com a altura e o comprimento aumentando de baixo para cima. Dessa forma, cada caso de onda representa uma sintonia diferente. Para considerar o navio vulnerável a roll paramétrico nessa avaliação o valor da variação da altura metacêntrica deve ser maior que 40,5% (R_{pr} calculado da mesma forma que no primeiro nível) da altura metacêntrica média para cada caso de onda, considerando a altura metacêntrica variando com a passagem da onda. Além dessa verificação da variação da estabilidade, também é avaliado a relação entre a frequência de encontro e a frequência natural, ou seja, é avaliado se a velocidade de referência para ocorrência para roll paramétrico é menor que a velocidade de serviço, sendo que a velocidade de referência é calculada considerando a frequência de encontro duas vezes a frequência natural de roll.

De acordo com a tabela acima três casos de onda (8,9,10) apresentam uma variação na estabilidade e uma sintonia da frequência de encontro com a frequência natural de roll paramétrico que seria suscetível a roll paramétrico. O caso de onda 8 apresenta uma variação da altura metacêntrica de 41,7% da altura metacêntrica média, o caso de onda 9 apresenta uma variação de 44,3% e o caso de onda 10 apresenta uma variação de 42,5%. Nesses três casos a velocidade de referência para ocorrência de roll (1,536 m/s, 3,883 m/s, 6,538 m/s, respectivamente) são abaixo da velocidade de serviço (10,51 m/s). Vale ressaltar, que os casos de onda que resultaram em vulnerável possuem o comprimento de onda aproximado do comprimento de onda do navio, estando os resultados dessa forma de acordo com a teoria que diz que o pior caso seria para o comprimento de onda igual ao comprimento do navio.

Considerando o fator de peso desses três casos de onda o valor de C1 resultante é de 0,216.

O próximo passo é realizar a verificação do C2.

Os dados hidrostáticos de entrada para a segunda verificação são apresentados na Tabela 15 e na Tabela 16.

Tabela 15- Dados hidrostáticos

Período de roll[s]	21,78
Velocidade de Serviço [m/s]	10,289
Ângulo inicial de Roll [deg]	5
I44 [ton.m ²]	18800000
A44 [ton.m ²]	3561584,823
Comprimento da bolina (m)	76,54
Largura da Bolina (m)	0,4
B1 [ton.m ² /s]	19350,69
B2 [ton.m ² /rad ²]	5472233,5
B3 [ton.m ² .s]	0

Tabela 16- B1 e B3 em função da velocidade

Froude	Velocidade [m/s]	B1 [ton.m ²]	B2 [ton.m ² /s]	B3 [ton.m ² /rad ²]
0,00	0	83575,791	0,000	79640009,401
0,10	5,255	84024,149	0,000	79640009,401
0,18	9,10166	84352,347	0,000	79640009,401
0,21	10,51	84472,507	0,000	79640009,401

O valor de C2 é calculado como sendo uma média de valores de C2 (Fn_i), para sete frequências de encontro diferentes.

O valor de cada componente de C2 depende do fator de peso dado pela tabela de dispersão e o valor de C_i , que será zero ou um dependendo do ângulo máximo de roll obtido.

Para calcular o valor de C_i , é necessário encontrar ângulo máximo de roll para cada altura de referência H_{r_i} . Para tal, são utilizados onze casos de onda, sendo que para cada caso de onda, o ângulo máximo de roll é encontrado através da solução numérica da equação de roll. As alturas de referência h_j foram definidas como sendo uma fração da altura efetiva máxima $H_{r,max}$ encontrada através da utilização da equação 31 e equação 32, aplicada para cada H_s e T_z fornecidos pela tabela de dispersão (Tabela 61).

Para a restauração dez curvas de GZ foram calculadas, uma para cada onda, com a crista da onda posicionada em dez posições diferentes. Dessas curvas é possível perceber que a variação de estabilidade cresce à medida que a altura da onda e o comprimento aumentam, ou seja, a onda 10 apresenta a maior variação de estabilidade. A seguir são apresentadas duas curvas de GZ representativas, sendo a Figura 34 referente ao caso de onda 1 e a Figura 35 referente ao caso de onda 10. A curva verde,

localizada mais acima das outras, representa o caso em que a crista da onda está localizada mais a ré e mais a vante da meia nau (-104,8 e 131 metros da meia nau respectivamente), apresentando uma máxima magnitude da restauração hidrostática. Já a curva azul, localizada abaixo de todas as curvas, representa o caso em que a crista da onda está localizada a meia nau, apresentando uma menor restauração hidrostática.

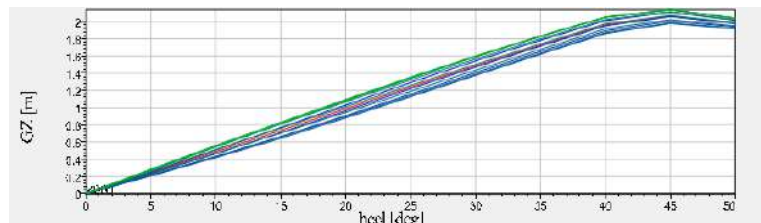


Figura 34- Curvas GZ – caso de onda 1

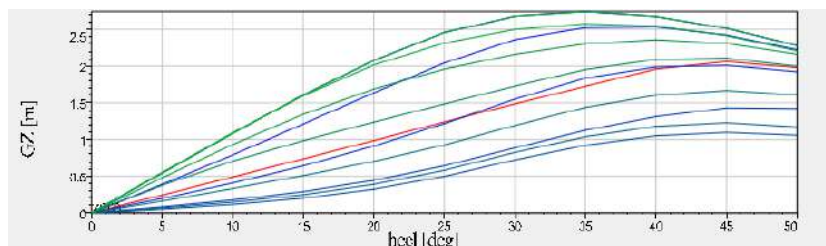


Figura 35- Curvas GZ caso de onda 10

Resolvendo a equação de roll desacoplada foram encontradas 70 séries temporais (7 aproamentos x 10 alturas diferentes). A seguir é apresentado as séries encontradas para a maior altura de referência (11,935 metros) para os sete aproamentos:

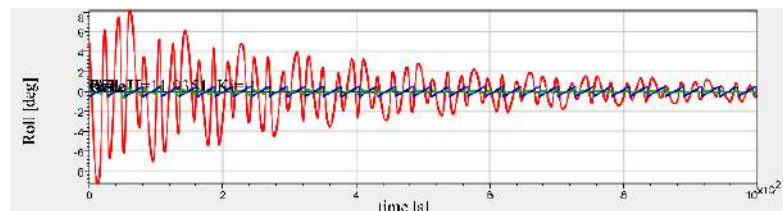


Figura 36- Caso de onda 10, $K_i = -1,0$

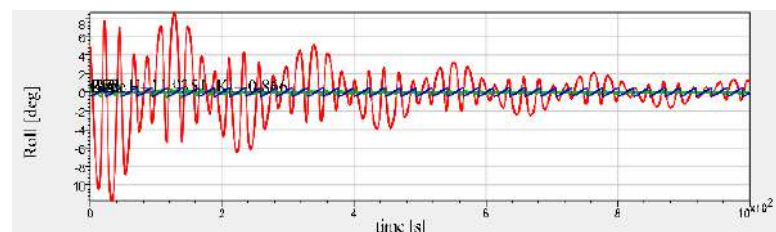


Figura 37- Caso de onda 10, $K_i = -0,866$

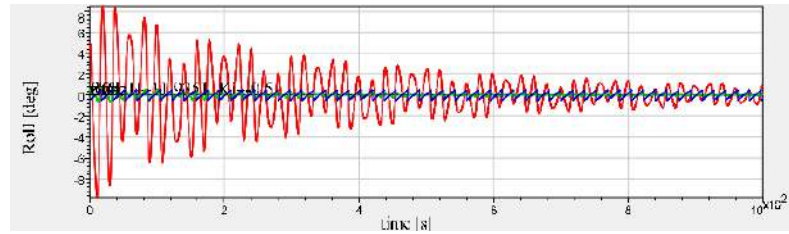


Figura 38- Caso de onda 10, $K_i=-0,5$

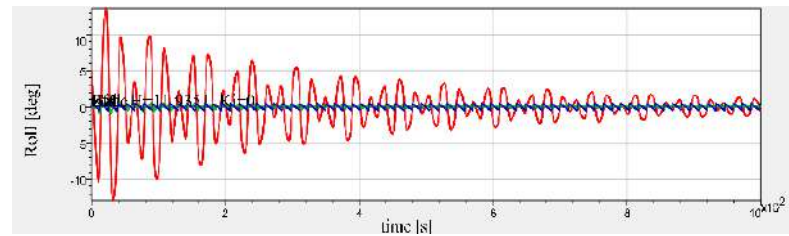


Figura 39- Caso de onda 10, $K_i=0$

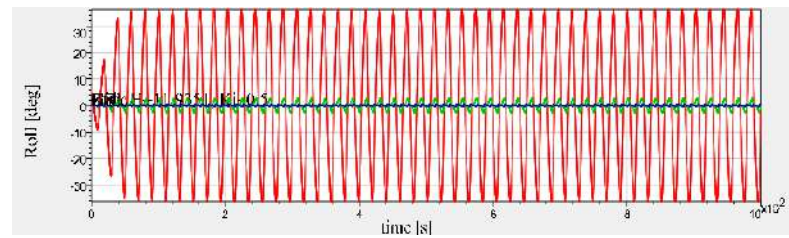


Figura 40- Caso de onda 10, $K_i=0,5$

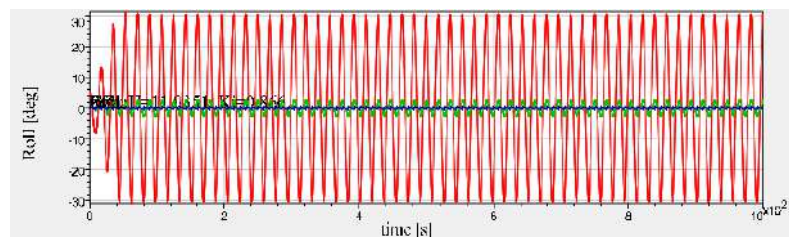


Figura 41- Caso de onda 10, $K_i=0,866$

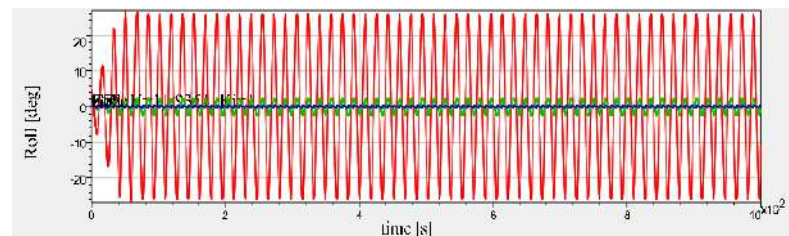


Figura 42- Caso de onda 10, $K_i=1,0$

Da Figura 36 até a Figura 39 são apresentados casos típicos em que o movimento decai com o tempo e da Figura 40 até a Figura 42 são apresentados casos típicos em que o movimento é amplificado.

Os ângulos máximos encontrados são apresentados na Tabela 17, para todos os casos de ondas e todos os aproamentos.

Tabela 17- Ângulos máximos de roll

h_j [m]/ K_i	-1	-0,866	-0,5	0	0,5	0,866	1
0,000	5	5	5	5	5,00	5	5
1,194	5,24	5,26	5,17	5,68	14,74	5,04	5,00
2,387	5,66	5,71	5,55	6,71	20,93	5,37	5,20
3,581	6,10	6,22	5,99	7,75	24,89	6,11	5,53
4,774	6,58	6,79	6,49	8,83	27,83	8,22	5,98
5,968	7,06	7,57	7,02	9,88	30,11	14,93	6,86
7,161	7,54	8,55	7,55	10,88	31,91	20,97	9,23
8,355	8,00	9,53	8,09	11,76	33,31	24,87	15,76
9,548	8,46	10,43	8,65	12,52	34,41	27,66	21,11
10,742	8,89	11,19	9,22	13,12	35,32	29,62	24,50
11,935	9,27	11,72	9,78	13,55	36,15	31,23	26,86

O próximo passo é obter o ângulo máximo de roll para cada altura de onda representativa H_{ri} , para os sete casos de aproamento K_i , através de interpolação linear dos valores apresentados na Tabela 17. Os ângulos obtidos e suas contribuições para o C2 foram apresentados no Apêndice I, na Tabela 62.

A Tabela 18 apresenta a contribuição de cada C2 (Fn_i) para o C2.

Tabela 18- Contribuições de cada C2 (Fn_i) para C2

K_i [1]	Fn_i	V_i [m/s]	Rel.Speed [m/s]	Período de encontro [s]	C2(Fn) [1]
1,000	0,207	10,51	30,74	8,524	0,000008
0,866	0,180	9,10	29,33	8,934	0,00053
0,500	0,104	5,25	25,48	10,282	0,168947
0,000	0,000	0,00	20,23	12,954	0
-0,500	0,104	5,25	-14,97	17,501	0
-0,866	0,180	9,10	-11,12	23,553	0
-1,000	0,207	10,51	-9,72	26,968	0

Fazendo a média desses valores, encontra-se C2 igual a 0,0242. Vale lembrar que se C1 OU C2 for menor que o valor crítico para ocorrência de roll ($R_{PR0} = 0,06$) o navio NÃO é vulnerável a sofrer esse modo de falha. Portanto, já que o valor de C2 é menor que 0,06 o C11 é não vulnerável a roll paramétrico para essa condição de carregamento.

Foi realizada uma análise para investigar a influência do ângulo inicial de roll no resultado de C2. Além disso, também foi investigada a influência dos parâmetros do

ajuste do amortecimento pelo método Ikeda utilizados (utilização de B1 e B2 ou utilização de B2 e B3). Os resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19- C2 em função do amortecimento e do ângulo inicial de roll

	C2	Status
B1 e B2 – 5 graus	0,041880	Não vulnerável
B1 e B2 – 10 graus	0,041880	Não vulnerável
B1 e B3 – 5 graus	0,024212	Não vulnerável
B1 e B3 – 10 graus	0,024212	Não vulnerável

Utilizando os parâmetros B1 e B2 como fatores no amortecimento foi encontrado um maior valor de C2, resultando em um resultado mais conservador. Além disso, o ângulo inicial não afetou o resultado de C2.

Uma simulação numérica no tempo do movimento de roll foi realizada a parte para a frequência de encontro igual a duas vezes a frequência natural, ou seja, período igual a 10,89 segundos. Constatou-se uma amplificação de roll para essa frequência, encontrando um ângulo máximo de roll igual a 31,84 graus para ondas com altura efetiva máxima de 11,935 metros.

As tabelas apresentadas a seguir comparam os resultados encontrados pelo estudo da delegação da França e os resultados encontrados nesse trabalho.

Tabela 20- Comparação perda pura de estabilidade – Nível 1

	DSSTAB	França	Comparação
$GM_{\text{mínimo}}$ - Método 1	-2,426	-2,44	0,47%
$GM_{\text{mínimo}}$ - Método 2	-0,540	-0,587	8,05%

Tabela 21- Comparação perda pura de estabilidade – Nível 2

	DSSTAB	França	Comparação
C_1	0,000109	0,002814	96,13%
C_2	0,094216	0,094216	0,00%

Tabela 22- Comparação roll paramétrico – Nível 1

	DSSTAB	França	Comparação
GM_c	2,751	2,749	-0,06%
$\delta GM_1/GM_c$ – Método 1	0,685	0,689	0,52%
$\delta GM_1/GM_c$ – Método 2	0,548	0,550	0,33%

Tabela 23- Comparação roll paramétrico – Nível 2

	DSSTAB	França	Comparação
C_1	0,216	0,225	4,00%
C_2	0,0242	0,0251	3,59%

A diferença entre os resultados encontrados nesse trabalho e os resultados encontrados pela delegação da França é pequena, com exceção dos valores de C_1 para a perda pura de estabilidade nível 2. Essa diferença é devida a diferença do ângulo de perda de estabilidade mínimo encontrada no caso de onda 7 e 8, conforme pode ser observada na Tabela 24.

Tabela 24- Comparação do ângulo de perda de estabilidade

Caso de onda	França	DSSTAB
	FiV.min (deg)	Min Phi_v [deg]
0	35	35
1	35	35
2	35	35
3	35	35
4	35	35
5	35	35
6	35	35
7	0	35
8	0	35
9	0	0
10	0	0

Essa diferença do ângulo de perda de estabilidade é visível quando as curvas GZ encontradas no DSSTAB e pela delegação da França são comparadas. Essa comparação é apresentada na Figura 43. A parte pontilha no canto direito da figura deixa claro que a curva GZ referente ao caso em que a crista da onda está posicionada em $-0,1L$, da delegação da França não corta o eixo das abcissas, considerando o menor ângulo de perda de estabilidade como sendo igual a zero. Já no caso da curva encontrada pelo DSSTAB a curva GZ passa a ser positiva para um ângulo de aproximadamente 30 graus tendo o ângulo de perda de estabilidade maior que 35 graus.

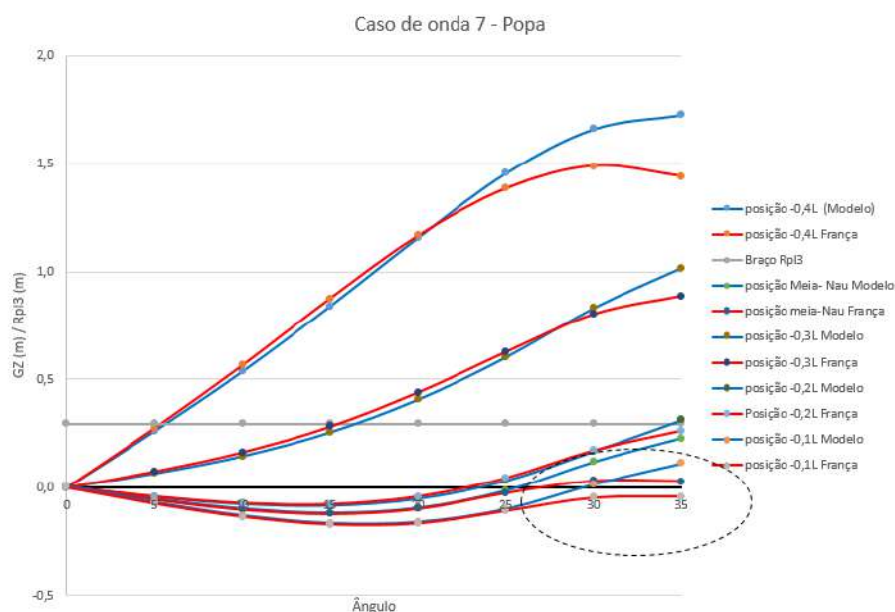


Figura 43- Curva GZ –diferença entre o ângulo de perda de estabilidade

Essa diferença é dada como aceitável e foi considerado que os resultados encontrados estão compatíveis com os resultados encontrados pela delegação da França e com a física dos problemas. Sendo assim, foi considerado que a ferramenta elaborada no DSSTAB para o cálculo da segunda geração é confiável.

4. 2 Navio de Apoio- PSV

O navio estudado nesse tópico será um PSV típico, com parâmetros principais de acordo com a Tabela 25.

Tabela 25- Características principais do PSV 4500

Comprimento do navio entre perpendiculares	L (m)	83,79
Boca	B(m)	16
Pontal	D(m)	7,8
Calado Máximo	d(m)	6,2
Velocidade de Serviço	Vs (nós)	13
Área projetada da bolina	$A_K (m^2)$	22,4
Deslocamento no calado D	VD (m^3)	9051,82
Coefficiente da seção mestra da condição de carregamento completamente carregada	C_m	0,979

A forma 3D do navio é apresentada na Figura 44.

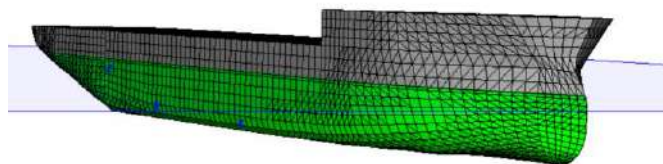


Figura 44- PSV 4500

Seis condições de carregamento são analisadas para o PSV, conforme descritas a seguir: Condição 1: navio completamente carregado em condição de partida;

- Condição 2: navio completamente carregado em condição de chegada;
- Condição 3: navio em condição de lastro em condição de partida;
- Condição 4: navio em condição de lastro em condição de chegada;
- Condição 5: navio com carregamento máximo no convés partida.
- Condição 6: navio com carregamento máximo no convés chegada.

As condições de carregamento são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26- Condição de carregamento

	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6
$A_k(m^2)$	22,240	22,240	22,240	22,240	22,240	22,240
d (m)	6,150	6,15	3,9	3,9	5,10	5,00
$A_{wp} (m^2)$	1287	1287	1209	1209	1272	1269
$\nabla (m^3)$	6928	6928	4082	4082	5579	5451
KG (m)	4,703	4,80	5,386	5,515	6,37	6,45
GM_c (m)	2,330	2,230	2,432	2,303	0,873	0,821

A seguir os resultados dos critérios gerais da primeira geração são apresentados para as seis condições de carregamento:

Tabela 27- Condição 1

Criterion	Value	Evaluation
GZ area up to 30° > 0.055 m.rad	0.245	Approved
GZ area up to 40° (or df angle) > 0.09 m.rad	0.376	Approved
GZ area from 30° to 40° (or df angle) > 0.03 m.rad	0.13	Approved
GZ arm at 30° > 0.20 m	0.738	Approved
GZ max (deg)	0.753	-
GZ max must occur at angle > 30° (25°)	35	Approved
GM_transv at 0° > 0.15 m	2.023	Approved

Tabela 28- Condição 2

condição 2	Value	Evaluation
GZ area up to 30° > 0.055 m.rad	0.227	Approved
GZ area up to 40° (or df angle) > 0.09 m.rad	0.344	Approved
GZ area from 30° to 40° (or df angle) > 0.03 m.rad	0.118	Approved
GZ arm at 30° > 0.20 m	0.674	Approved
GZ max (deg)	0.681	-
GZ max must occur at angle > 30° (25°)	35	Approved
GM_transv at 0° > 0.15 m	1.842	Approved

Tabela 29- Condição 3

Criterion	Value	Evaluation
GZ area up to 30° > 0.055 m.rad	0.337	Approved
GZ area up to 40° (or df angle) > 0.09 m.rad	0.583	Approved
GZ area from 30° to 40° (or df angle) > 0.03 m.rad	0.246	Approved
GZ arm at 30° > 0.20 m	1.35	Approved
GZ max (deg)	1.436	-
GZ max must occur at angle > 30° (25°)	35	Approved
GM_transv at 0° > 0.15 m	2.301	Approved

Tabela 30- Condição 4

Criterion	Value	Evaluation
GZ area up to 30° > 0.055 m.rad	0.337	Approved
GZ area up to 40° (or df angle) > 0.09 m.rad	0.583	Approved
GZ area from 30° to 40° (or df angle) > 0.03 m.rad	0.246	Approved
GZ arm at 30° > 0.20 m	1.35	Approved
GZ max (deg)	1.436	-
GZ max must occur at angle > 30° (25°)	35	Approved
GM_transv at 0° > 0.15 m	2.301	Approved

Tabela 31- Condição 5

Criterion	Value	Evaluation
GZ area up to 30° > 0.055 m.rad	0.116	Approved
GZ area up to 40° (or df angle) > 0.09 m.rad	0.177	Approved
GZ area from 30° to 40° (or df angle) > 0.03 m.rad	0.06	Approved
GZ arm at 30° > 0.20 m	0.393	Approved
GZ max (deg)	0.393	-
GZ max must occur at angle > 30° (25°)	30	Approved
GM_transv at 0° > 0.15 m	0.839	Approved

Tabela 32- Condição 6

Criterion	Value	Evaluation
GZ area up to 30° > 0.055 m.rad	0.101	Approved
GZ area up to 40° (or df angle) > 0.09 m.rad	0.157	Approved
GZ area from 30° to 40° (or df angle) > 0.03 m.rad	0.056	Approved
GZ arm at 30° > 0.20 m	0.369	Approved
GZ max (deg)	0.369	-
GZ max must occur at angle > 30° (25°)	30	Approved
GM_transv at 0° > 0.15 m	0.636	Approved

Das tabelas acima, é possível constatar que todos os critérios de estabilidade da primeira geração são cumpridos para as seis condições de carregamento, ou seja, não foi constatado nenhum problema de estabilidade intacta com esses critérios.

A seguir é apresentado os resultados para a segunda geração para perda pura de estabilidade e roll paramétrico:

4.2.1 Perda pura de estabilidade:

4.2.1.1 Primeiro Nível:

O primeiro passo é a entrada dos dados de entrada. As características principais são apresentadas na Tabela 25. As condições de carregamento analisadas no primeiro nível para esse modo de falha são as mesmas do primeiro nível de roll paramétrico e podem ser visualizadas na Tabela 26.

O próximo passo é verificar o número de Froude. A velocidade de serviço da embarcação é de 6,89 metros por segundo, resultando em um número de Froude de 0,24032, como esse valor é maior que 0,24000 a verificação do primeiro nível de perda pura de estabilidade deve ser aplicada.

O próximo procedimento é realizar a estimativa da variação da altura metacêntrica com a passagem da onda. Como o coeficiente prismático vertical é maior do que 1, para todas as condições de carregamento, conforme apresentado na Tabela 33, é possível realizar essa estimativa pelo primeiro e pelo segundo método.

Tabela 33-Coeficiente prismático

Condição	1	2	3	4	5	6
C_{PV}	1,00014	1,00014	1,05439	1,05439	1,01211	1,05181
Primeiro método é aplicável?	sim	sim	sim	sim	sim	sim

Os resultados do primeiro método são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34- Resultados do primeiro método

Condição	1	2	3	4	5	6
d	6,150	6,150	3,900	3,900	5,102	5,002
$d - 0,25d_{full}$	4,613	4,613	2,363	2,363	3,565	3,565
$LS_w/2$	1,399	1,399	1,399	1,399	1,399	1,399
dL	4,757	4,757	2,501192007	2,501184145	3,703	3,602
IL-Momento de inércia no calado dL (m^4)	24805,1	24805,1	21097,5915	21097,57767	23129,4	22964,0
GM_{min}	2,168	2,067	1,854	1,725	0,505	0,430

O valor limite para a ocorrência desse modo de falha é de 0,05, ou seja, os casos de carregamento que resultam em uma altura metacêntrica menor que 0,05 são considerados vulneráveis. As alturas metacênticas mínimas encontradas foram todas menores que o valor limite para a ocorrência desse modo de falha, para esse nível de avaliação, nessas condições de carregamento. Dessa forma, analisando só o resultado do primeiro método, nenhuma condição de carregamento seria suscetível a perda pura de estabilidade no primeiro nível.

O segundo método calcula o $GM_{mínimo}$ como sendo a altura metacêntrica mínima calculada para o navio, correspondente a condição de carregamento em consideração, considerando a superfície livre igual a superfície da onda e sua crista posicionada de 10 formas diferentes (com a crista centrada na Meia Nau e a 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L; 0,5L a vante desse ponto e 0,1L; 0,2L; 0,3L; 0,4L a ré desse ponto). A onda terá comprimento igual ao comprimento do navio, ou seja, de 83,79 metros, sendo esse o pior caso para ocorrência desse modo de falha segundo a física do problema e altura igual ao comprimento do navio vezes a declividade S_w , resultando em uma altura de 2,799 metros. Os valores encontrados para o GM, para cada posicionamento e o GM mínimo são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35- Resultados do segundo método

Condição	1	2	3	4	5	6
Posições Longitudinais da crista da onda	GM	GM	GM	GM	GM	GM
8,379	2,434	2,333	2,652	2,517	0,984	0,926
16,758	2,324	2,221	2,329	2,193	0,773	0,706
25,137	2,227	2,126	2,111	1,977	0,638	0,566
33,516	2,233	2,132	2,035	1,903	0,610	0,536
41,895	2,305	2,205	2,096	1,967	0,691	0,619
50,274	2,357	2,258	2,328	2,201	0,882	0,827
58,653	2,364	2,265	2,740	2,614	0,997	0,955
67,032	2,312	2,213	2,936	2,810	1,049	1,018

Condição	1	2	3	4	5	6
75,411	2,365	2,264	3,031	2,903	1,104	1,070
83,79	2,475	2,374	2,960	2,829	1,113	1,073
GM Mínimo	2,227	2,126	2,035	1,903	0,610	0,536

O $GM_{mínimo}$ será o menor valor entre os dois métodos. Como, para todas as condições de carregamento, nos dois métodos, os valores de $GM_{mínimo}$ são maiores que 0,05 o navio é considerado não vulnerável à perda pura de estabilidade para todas as condições de carregamento analisadas nesse nível.

4.2.1.2 Segundo Nível:

O segundo nível é iniciado com a entrada de dados. Nesse nível serão analisadas todas as condições de carregamento analisadas no primeiro nível desse modo de falha

O próximo passo é definir as 10 ondas regulares de referência que serão usadas. Essas ondas possuem comprimento igual ao comprimento entre perpendiculares do navio e as alturas são definidas conforme a seguir:

$$\text{Altura de onda: } h = 0,01iL, i = 0,1, \dots, 10$$

As características das ondas de referência encontradas utilizadas para o cálculo do ângulo de perda de estabilidade e ângulo de banda devido ao momento emborcador, Rpl3, junto com o valor do braço são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36- Ondas de referência

Onda	L	h	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6
			Rpl3	Rpl3	Rpl3	Rpl3	Rpl3	Rpl3
0	83,79	0,000	0,000	0	0	0	0,000	0,000
1	83,79	0,838	0,028	0,018	0,028	0,018	0,024	0,023
2	83,79	1,676	0,057	0,036	0,057	0,036	0,047	0,046
3	83,79	2,514	0,085	0,054	0,085	0,054	0,071	0,069
4	83,79	3,352	0,114	0,072	0,114	0,072	0,094	0,092
5	83,79	4,190	0,142	0,090	0,142	0,090	0,118	0,116
6	83,79	5,027	0,171	0,108	0,171	0,108	0,141	0,139
7	83,79	5,865	0,199	0,126	0,199	0,126	0,165	0,162
8	83,79	6,703	0,228	0,144	0,228	0,144	0,189	0,185
9	83,79	7,541	0,256	0,162	0,256	0,162	0,212	0,208
10	83,79	8,379	0,284	0,180	0,284	0,180	0,236	0,231

Para cada onda da Tabela 36, para cada condição de carregamento, são calculadas as curvas GZ em ondas, considerando a crista da onda posicionada em 10

posições diferentes. As curvas encontradas para a condição de carregamento 5 são apresentadas no Apêndice I, da Figura 79 até a Figura 87. Na Figura 47 é apresentada uma curva, para representar o resultado encontrado, da onda 1 para a quinta condição de carregamento e na Figura 48 é apresentado para a onda 10. As outras curvas não serão apresentadas nesse trabalho.

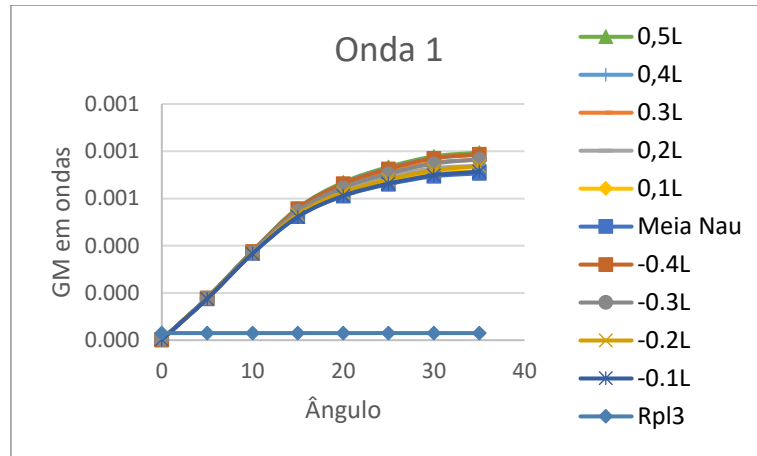


Figura 45- Curva GZ – Caso de onda 1 – condição de carregamento 1

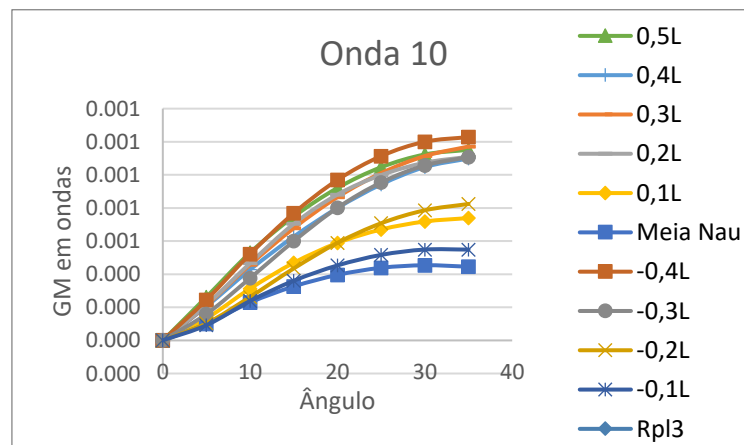


Figura 46- Curva GZ – Caso de onda 10 – condição de carregamento 1

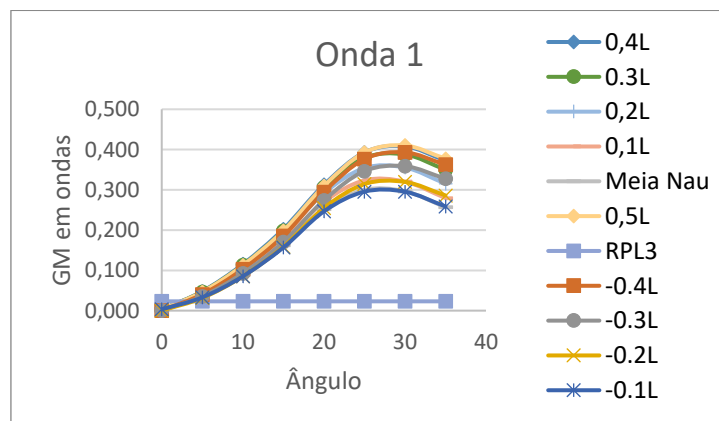


Figura 47- Curva GZ – Caso de onda 1 – condição de carregamento 5

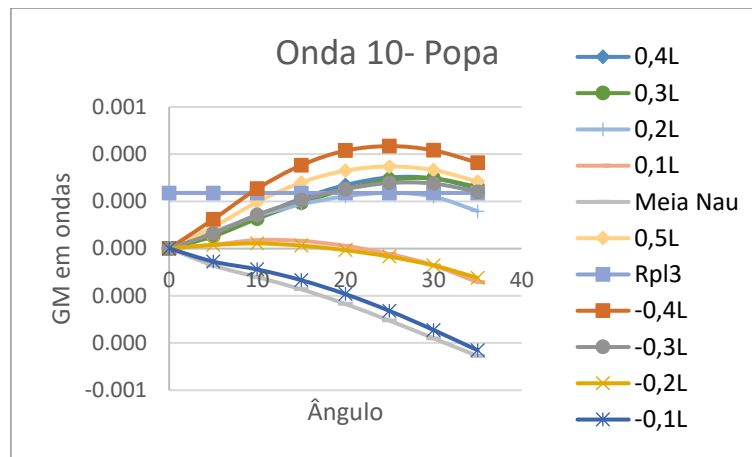


Figura 48- Curva GZ – Caso de onda 10- condição de carregamento 5

A curva verde da Figura 45 é referente ao caso em que a crista da onda está localizada 41,9 metros avante da meia nau (0,5L), essa curva possui os valores do braço de restauração (GZ) maiores que dos outros casos, como esperado, já que quando o cavado da onda está localizado próximo da meia nau, o calado à meia nau é menor e o calado na proa e na popa maiores, resultando em uma área molhada maior do que em águas calmas, ou seja, resultando em aumento de estabilidade. Observando essa mesma figura percebe-se que o braço de restauração diminui quando a crista caminha em direção a meia nau, tendo o seu menor valor para a crista localizada na meia nau. A curva volta a crescer (maiores valores de GZ) quando a crista da onda “caminha” para a ré do casco. Esse comportamento já era esperado, devido ao formato do casco.

Seguindo os cálculos do segundo nível, a próxima ação é determinar o ângulo de perda de estabilidade e o ângulo de banda devido ao braço emborcador Rpl3 para cada curva GZ em ondas encontrada.

Vale relembrar que se a curva de altura versus ângulo apresentar um pico para um certo passo de onda h_p , o valor do pico deve ser usado quando o passo da onda for maior que h_p . Da Tabela 37 até a Tabela 41 são apresentados os valores encontrados no DSSTAB.

Tabela 37- Valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda

Condição de Carregamento 1 - Navio completamente carregado em condição de partida						
Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0,000	0,000	35	0	35	0
1	0,838	0,028	35	0,758	35	0,758
2	1,676	0,057	35	1,590	35	1,590
3	2,514	0,085	35	2,484	35	2,484

Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
4	3,352	0,114	35	3,878	35	3,878
5	4,189	0,142	35	6,588	35	6,588
6	5,027	0,171	35	10,519	35	10,519
7	5,865	0,199	35	15,933	35	15,933
8	6,703	0,228	35	23,667	35	23,667
9	7,541	0,256	35	34,084	35	34,084
10	8,3790	0,285	35	35	35	35

Tabela 38- Valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda

Condição de Carregamento 2 - Navio completamente carregado em condição de chegada						
Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0	0,000	35	0	35	0
1	0,84	0,028	35	0,837	35	0,837
2	1,68	0,057	35	1,755	35	1,755
3	2,5137	0,085	35	2,750	35	2,750
4	3,35	0,114	35	4,367	35	4,367
5	4,189	0,142	35	7,699	35	7,699
6	5,027	0,171	35	12,718	35	12,718
7	5,865	0,199	35	20,216	35	20,216
8	6,703	0,228	35	32,176	35	32,176
9	7,541	0,256	35	35	35	35
10	8,3790	0,285	35	35	35	35

Tabela 39- Valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda

Condição de Carregamento 3 - Navio em condição de lastro em condição de partida						
Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0	0,000	35	0	35	0
1	0,84	0,018	35	0,537	35	0,537
2	1,68	0,036	35	1,162	35	1,162
3	2,5137	0,054	35	1,848	35	1,848
4	3,35	0,072	35	2,583	35	2,583
5	4,189	0,090	35	3,338	35	3,338
6	5,027	0,108	35	4,098	35	4,098
7	5,865	0,126	35	4,853	35	4,853
8	6,703	0,144	35	5,488	35	5,488
9	7,541	0,162	35	6,094	35	6,094
10	8,3790	0,180	35	6,733	35	6,733

Tabela 40- Valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda

Condição de Carregamento 4 - Navio em condição de lastro em condição de chegada						
Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0,000	0,000	35	0	35	0
1	0,838	0,018	35	0,540	35	0,540
2	1,676	0,036	35	1,165	35	1,165

Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
3	2.514	0.054	35	1.851	35	1.851
4	3.352	0.072	35	2.586	35	2.586
5	4.189	0.090	35	3.341	35	3.341
6	5.027	0.108	35	4.101	35	4.101
7	5.865	0.126	35	4.856	35	4.856
8	6.703	0.144	35	5.490	35	5.490
9	7.541	0.162	35	6.096	35	6.096
10	8.3790	0.180	35	6.735	35	6.735

Tabela 41- Valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda

Condição de Carregamento 5 - Navio completamente carregado em condição de partida						
Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0,00	0,00	35,00	0,00	35,00	0,00
1	0,84	0,02	35,00	2,46	35,00	2,46
2	1,68	0,05	35,00	5,59	35,00	5,59
3	2,51	0,07	35,00	8,15	35,00	8,15
4	3,35	0,09	35,00	11,47	35,00	11,47
5	4,19	0,12	30,67	35,00	30,67	35,00
6	5,03	0,14	22,16	35,00	22,16	35,00
7	5,87	0,17	12,70	35,00	12,70	35,00
8	6,70	0,19	0,00	35,00	0,00	35,00
9	7,54	0,21	0,00	35,00	0,00	35,00
10	8,38	0,24	0,00	35,00	0,00	35,00

Tabela 42- Valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda

Condição de Carregamento 6 - Navio completamente carregado em condição de chegada						
Onda	Height [m]	R_PL3 [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	Min Phi_v [deg]	Max Phi_s [deg]
0	0,00	0,00	35,00	0,00	35,00	0,00
1	0,84	0,02	35,00	3,65	35,00	3,65
2	1,68	0,05	35,00	7,37	35,00	7,37
3	2,51	0,07	35,00	11,14	35,00	11,14
4	3,35	0,09	35,00	35,00	35,00	35,00
5	4,19	0,12	25,69	35,00	25,69	35,00
6	5,03	0,14	16,24	35,00	16,24	35,00
7	5,87	0,16	6,50	35,00	6,50	35,00
8	6,70	0,18	0,00	35,00	0,00	35,00
9	7,54	0,21	0,00	35,00	0,00	35,00
10	8,38	0,23	0,00	35,00	0,00	35,00

Analisando as curvas de restauração e as tabelas acima é possível concluir que quanto maior a altura da onda, maior é a variação da restauração e maior será a perda de estabilidade devido a passagem da onda. Além disso, as condições de carregamento 5 e 6 possuem a menor altura metacêntrica em águas calmas e são os que sofrem a maior variação de estabilidade,

Em relação ao ângulo de perda de estabilidade, ele foi considerado igual a zero se a curva GZ for toda negativa até o ângulo de 35 graus e considerado igual a 35 graus se a curva GZ for positiva e não cruzar o eixo das abscissas até 35 graus.

O próximo passo é definir as alturas efetivas para cada combinação de Hs e Tz da tabela de dispersão e calcular os ângulos de perda de estabilidade e os ângulos de banda devido ao braço emborcador Rpl3 para todas as alturas efetivas, através de interpolação linear das 10 ondas de referência. É feita então uma avaliação desses ângulos. A Tabela 65, no Apêndice I, apresenta os resultados encontrados para esse procedimento para a condição de carregamento 5, os outros resultados foram omitidos.

Os valores de CR1 e CR2 encontrados são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43- Valores de CR1 e CR2

	CR1	CR2	RPL0	Status
Condição 1	0	0,003317	0,06	Não vulnerável
Condição 2	0	0,005285	0,06	Não vulnerável
Condição 3	0	0	0,06	Não vulnerável
Condição 4	0	0	0,06	Não vulnerável
Condição 5	0,080096	0,112912	0,06	Vulnerável
Condição 6	0,136639	0,282176	0,06	Vulnerável

O critério avaliou o PSV como não vulnerável para as condições de carregamento 1, 2, 3 e 4 analisadas, já que o maior valor entre os dois critérios, CR_1 e CR_2 é menor que R_{PL0} , para essas condições. Porém, o navio foi julgado como suscetível a perda pura de estabilidade no segundo nível para a condição 5 e para a condição 6. Dessa forma, é possível concluir que os dois níveis de avaliação não são consistentes, já que o navio foi considerado não vulnerável no primeiro nível de avaliação para a condição 5 e 6 e vulnerável no nível 2, apresentado assim um falso negativo no primeiro nível para essas condições.

4.2.2 Roll paramétrico:

4.2.2.1 Primeiro Nível:

O primeiro passo é a entrada dos dados de entrada. As características principais são apresentadas na Tabela 25. As condições de carregamento analisadas no primeiro nível para esse modo de falha são as mesmas do primeiro nível de roll paramétrico e podem ser visualizadas na Tabela 26.

O próximo procedimento é realizar a estimativa da variação da altura metacêntrica com a passagem da onda. Como o coeficiente prismático vertical é maior do que 1, para todas as condições de carregamento, conforme apresentado na Tabela 44, é possível realizar essa estimativa por dois métodos.

Tabela 44-Coeficiente prismático

Condição	1	2	3	4	5	6
C_{PV}	1,0001	1,00014	1,054	1,054	1,012	1,00014
Primeiro método é aplicável?	sim	sim	sim	sim	sim	sim

Aplicando o primeiro método, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 45.

Tabela 45- Resultados do primeiro método

Condição	1	2	3	4	5	6
d	6,150	6,150	3,900	3,900	5,102	5,002
$d - 0,25d_{full}$	4,613	4,613	2,363	2,363	3,565	3,465
$LS_w/2$	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
dh	6,856	6,856	4,600	4,600	5,802	5,701
dL	5,457	5,457	3,201	3,201	4,403	4,301
IL-Momento de inércia no calado dL (m^4)	26091	26091	24576	24576	24278	24124
Ih-Momento de inércia no calado dh (m^4)	25473	25473	22301	22301	25703	25620
δGM_1	0,045	0,045	0,279	0,279	0,128	0,137
$\delta GM_1/GM_c$	0,019	0,020	0,115	0,121	0,146	0,167

O valor crítico de referência para a ocorrência de roll (R_{pr}) calculado foi de 0,877, ou seja, para que ocorra roll paramétrico é necessário que a variação da altura metacêntrica em ondas seja maior que 87,7% da altura metacêntrica em águas calmas. A maior variação encontrada, considerando todas as condições de carregamento analisadas, foi de 16,7% da altura metacêntrica em águas calmas, estando esse valor muito abaixo do limite de vulnerabilidade. Dessa forma, o PSV, para essas condições de carregamento,

encontra-se fora da faixa de vulnerabilidade para ocorrência de roll paramétrico, para esse primeiro método.

Foi realizando também o segundo método, que é a estimativa da variação da altura metacêntrica com a passagem da onda. Essa onda é definida conforme a equação 8, resultando em uma altura de 1,399 metros e comprimento igual ao comprimento do navio. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 46.

Tabela 46- Resultados do segundo método

Condição	1	2	3	4	5	6
Xc	GM	GM	GM	GM	GM	GM
-33,516	2,360	2,259	2,530	2,398	0,909	0,854
-25,137	2,312	2,211	2,361	2,227	0,815	0,750
-16,758	2,293	2,192	2,236	2,103	0,742	0,674
-8,379	2,290	2,190	2,190	2,059	0,727	0,659
0	2,299	2,199	2,233	2,104	0,780	0,712
8,379	2,331	2,231	2,368	2,239	0,866	0,812
16,758	2,332	2,233	2,569	2,440	0,917	0,879
25,137	2,353	2,253	2,721	2,593	0,975	0,929
33,516	2,369	2,269	2,763	2,633	0,995	0,948
41,895	2,369	2,268	2,688	2,557	0,965	0,920
GM Mínimo	2,290	2,190	2,190	2,059	0,727	0,659
GM Máximo	2,369	2,269	2,763	2,633	0,995	0,948
Delta GM	0,039	0,040	0,286	0,287	0,134	0,948
Delta GM/GMc	0,017	0,118	0,115	0,125	0,153	0,176

As maiores alturas metacêntricas encontradas foram para a crista da onda localizada a 41,895 metros a vante da meia nau e as menores alturas foram para a crista localizada a 8,379 metros para a ré da meia nau. Esses resultados estão consistentes com a física do problema, já que quando o cavado da onda está localizado próximo da meia nau, o calado à meia nau é menor e o calado na proa e na popa maior, resultando em uma área molhada maior do que em águas calmas, ou seja, resultando em aumento de estabilidade. Entretanto, quando a crista da onda está localizada na meia nau, a situação é invertida, o calado na proa e na popa são menores e na meia nau maior, o que faz com que a área do plano de linha d'água seja menor, resultando em diminuição de estabilidade.

A maior variação encontrada, considerando todas as condições de carregamento analisadas, foi de 17,6% da altura metacêntrica em águas calmas, estando esse valor muito abaixo do limite de vulnerabilidade, que é de 87,7%. Dessa forma, o PSV, para essa condição de carregamento, encontra-se dentro da faixa de vulnerabilidade para ocorrência

de roll paramétrico, para esse segundo método, para todas as condições de carregamento analisadas.

O PSV não é vulnerável ao Roll Paramétrico, para essas condições de carregamento, nesse nível de análise já que o valor encontrado de $\delta GM_1/GM_c$ é menor que R_{pr} para todas as condições de carregamento analisadas.

4.2.2.2 Primeiro Nível:

O segundo nível de verificação de vulnerabilidade para roll paramétrico consiste em verificar os valores de $C1$ e $C2$, em relação a $R_{PR0} = 0,06$. Se os valores de $C1$ e $C2$ forem menores que R_{PR0} o navio NÃO é vulnerável a sofrer esse modo de falha. O fluxograma do segundo nível é apresentado na Figura 28.

A primeira verificação pode ser considerada como a continuação do primeiro nível. Porém, nesse nível, a variação de GM é considerada para 16 ondas. É introduzida também uma verificação para a velocidade do navio. Para realizar a verificação desse nível três condições de carregamento foram usadas: condição 1, condição 3 e condição 5, conforme definidas no nível 1.

As características das ondas usadas são fornecidas na Tabela 47.

Tabela 47- Dados das ondas utilizadas na análise

Caso de onda	W_i	$\lambda_i(m)$	$H_i(m)$	S_{wi}
1	0,000013	22,566	0,350	0,01550
2	0,001654	37,303	0,495	0,01327
3	0,020912	55,724	0,857	0,01538
4	0,092799	77,830	1,295	0,01663
5	0,199218	103,620	1,732	0,01671
6	0,248788	133,094	2,205	0,01656
7	0,208699	166,252	2,697	0,01621
8	0,128984	203,095	3,176	0,01563
9	0,062446	243,622	3,625	0,01487
10	0,02479	287,833	4,040	0,01403
11	0,008367	335,728	4,421	0,01316
12	0,002473	387,308	4,769	0,01231
13	0,000658	442,572	5,097	0,01151
14	0,000158	501,520	5,370	0,01070
15	0,000034	564,152	5,621	0,00996
16	0,000007	630,469	5,950	0,00943

Além da variação δGM_1 , também é verificada a velocidade de referência de roll V_{PRi} . Se essa velocidade for menor que a velocidade de serviço, o navio pode sofrer roll paramétrico. Os resultados, são apresentados na Tabela 48 para a condição 1, na

Tabela 49 para a condição 3 e na

Tabela 50 para a condição 5.

Tabela 48- Resultados para o PSV- Condição 1

h_j [m]	λ_i [m]	GM min [m]	GM max [m]	GMm [m]	dGM [m]	dGM/GM [1]	GM Status	V_{PRi} [m/s]	Speed Status	Status	Ci Wi [1]
0,35	22,57	2,315	2,326	2,320	0,006	0,002	OK	0,70	FAIL	OK	0
0,50	37,32	2,308	2,333	2,320	0,012	0,005	OK	1,02	FAIL	OK	0
0,86	55,74	2,317	2,336	2,325	0,009	0,004	OK	3,60	FAIL	OK	0
1,29	77,86	2,286	2,367	2,326	0,040	0,017	OK	7,04	OK	OK	0
1,73	103,66	2,319	2,320	2,319	0,000	0,000	OK	11,30	OK	OK	0
2,21	133,14	2,319	2,320	2,319	0,000	0,000	OK	16,43	OK	OK	0
2,70	166,31	2,318	2,319	2,319	0,001	0,000	OK	22,42	OK	OK	0
3,18	203,16	2,317	2,319	2,318	0,001	0,000	OK	29,26	OK	OK	0
3,63	243,70	2,317	2,320	2,318	0,002	0,001	OK	36,95	OK	OK	0
4,04	287,93	2,316	2,319	2,318	0,002	0,001	OK	45,50	OK	OK	0
4,42	335,84	2,316	2,320	2,318	0,002	0,001	OK	54,90	OK	OK	0
4,77	387,44	2,317	2,320	2,318	0,002	0,001	OK	65,16	OK	OK	0
5,10	442,72	2,317	2,320	2,318	0,002	0,001	OK	76,28	OK	OK	0
5,37	501,69	2,317	2,320	2,318	0,002	0,001	OK	88,24	OK	OK	0
5,62	564,35	2,317	2,320	2,318	0,002	0,001	OK	101,07	OK	OK	0
5,95	630,68	2,317	2,320	2,318	0,001	0,001	OK	114,74	OK	OK	0

Tabela 49- Resultados para o PSV- Condição 3

h_j [m]	λ_i [m]	GMmin [m]	GM max [m]	GMm [m]	dGM [m]	dGM/GM [1]	GM Status	V_{PRi} [m/s]	Speed Status	Status	Ci Wi [1]
0,35	22,57	2,39	2,48	2,43	0,047	0,019	OK	1,31	FAIL	OK	0
0,50	37,32	2,36	2,52	2,43	0,078	0,032	OK	0,02	FAIL	OK	0
0,86	55,74	2,32	2,57	2,44	0,129	0,053	OK	2,11	FAIL	OK	0
1,29	77,86	2,20	2,74	2,44	0,269	0,110	OK	4,98	FAIL	OK	0
1,73	103,66	2,43	2,43	2,43	0,000	0,000	OK	8,54	OK	OK	0
2,21	133,14	2,43	2,43	2,43	0,001	0,000	OK	12,89	OK	OK	0
2,70	166,31	2,43	2,43	2,43	0,001	0,001	OK	17,99	OK	OK	0
3,18	203,16	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	23,85	OK	OK	0
3,63	243,70	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	30,47	OK	OK	0
4,04	287,93	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	37,84	OK	OK	0
4,42	335,84	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	45,97	OK	OK	0
4,77	387,44	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	54,85	OK	OK	0

h_j [m]	λ_i [m]	GMmin [m]	GM max [m]	GMm [m]	dGM [m]	dGM/GM [1]	GM Status	V_{PRi} [m/s]	Speed Status	Status	Ci Wi [1]
5,10	442,72	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	64,50	OK	OK	0
5,37	501,69	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	74,90	OK	OK	0
5,62	564,35	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	86,05	OK	OK	0
5,95	630,68	2,43	2,43	2,43	0,002	0,001	OK	97,96	OK	OK	0

Tabela 50- Resultados para o PSV- Condição 5

h_j [m]	λ_i [m]	GMmin [m]	GM max [m]	GMm [m]	dGM [m]	dGM/GM [1]	GM Status	V_{PRi} [m/s]	Speed Status	Status	Ci Wi [1]
0,35	22,57	0,85	0,90	0,87	0,0217	0,0248	OK	2,79	FAIL	OK	0
0,50	37,32	0,84	0,92	0,88	0,0386	0,0440	OK	2,42	FAIL	OK	0
0,86	55,74	0,83	0,92	0,88	0,0465	0,0529	OK	1,53	FAIL	OK	0
1,29	77,86	0,74	0,98	0,88	0,1219	0,1388	OK	0,14	FAIL	OK	0
1,73	103,66	0,87	0,87	0,87	0,0000	0,0000	OK	1,73	FAIL	OK	0
2,21	133,14	0,87	0,87	0,87	0,0003	0,0003	OK	4,14	FAIL	OK	0
2,70	166,31	0,87	0,87	0,87	0,0007	0,0008	OK	7,06	OK	OK	0
3,18	203,16	0,87	0,87	0,87	0,0010	0,0012	OK	10,49	OK	OK	0
3,63	243,70	0,87	0,87	0,87	0,0013	0,0014	OK	14,44	OK	OK	0
4,04	287,93	0,87	0,87	0,87	0,0013	0,0015	OK	18,91	OK	OK	0
4,42	335,84	0,87	0,87	0,87	0,0013	0,0015	OK	23,88	OK	OK	0
4,77	387,44	0,87	0,87	0,87	0,0012	0,0014	OK	29,38	OK	OK	0
5,10	442,72	0,87	0,87	0,87	0,0012	0,0013	OK	35,39	OK	OK	0
5,37	501,69	0,87	0,87	0,87	0,0010	0,0012	OK	41,91	OK	OK	0
5,62	564,35	0,87	0,87	0,87	0,0009	0,0011	OK	48,95	OK	OK	0
5,95	630,68	0,87	0,87	0,87	0,0008	0,0010	OK	56,50	OK	OK	0

Cada tabela acima representa uma condição de carregamento e cada coluna de cada tabela representa um caso de onda, com a altura e o comprimento aumentando de baixo para cima. Dessa forma, cada caso de onda representa uma sintonia diferente. Para considerar o navio vulnerável a roll paramétrico nessa avaliação o valor da variação da altura metacêntrica deve ser maior que 87,7% (R_{pr} calculado da mesma forma que no primeiro nível) da altura metacêntrica média para cada caso de onda, considerando a altura metacêntrica variando com a passagem da onda. Além dessa verificação da variação da estabilidade, também é avaliado a relação entre a frequência de encontro e a frequência natural, ou seja, é avaliado se a velocidade de referência para ocorrência de roll paramétrico é menor que a velocidade de serviço, sendo que a velocidade de referência é calculada considerando a frequência de encontro duas vezes a frequência natural de roll.

De acordo com as tabelas acima, apesar de ter alguns casos nos quais a velocidade de referência de roll paramétrico está abaixo da velocidade de serviço, nenhum caso apresenta uma variação da estabilidade maior que 87,7% da altura metacêntrica média. Dessa forma, o PSV não foi considerado suscetível a esse modo de falha para as condições de carregamento analisadas, sendo assim, para todas as condições de carregamento analisadas o C1 resultou em zero.

O próximo passo é realizar a verificação do C2.

Os dados hidrostáticos de entrada para a segunda verificação são apresentados na Tabela 51, na Tabela 55, na Tabela 53 e na Tabela 54 .

Tabela 51- Dados hidrostáticos

Condição de carregamento	Condição 1	Condição 3	Condição 5
Velocidade de serviço [m/s]	6,89	6,89	6,89
T_{ϕ} [s]	8,63	9,75	14,35
Init. Roll [deg]	5	5	5
I44 [ton.m ²]	248644	194160	248644,0293
A44 [ton.m ²]	55099	44765	55099,12997

Tabela 52- B1 e B3 por velocidade – condição 1

Froude	Velocidade [m/s]	B1 [ton.m ²]	B2 [ton.m ² /s]	B3 [ton.m ² /rad ²]
0,00	0,000	9941,268	0,000	402822,812
0,12	3,446	9956,317	0,000	402822,812
0,21	5,968	9967,385	0,000	402822,812
0,24	6,891	9971,410	0,000	402822,812

Tabela 53- B1 e B3 por velocidade – condição 3

Froude	Speed [m/s]	B1 [ton.m ²]	B2 [ton.m ² /s]	B3 [ton.m ² /rad ²]
0,00	0,000	6297,980	0,000	731102,892
0,12	3,446	6317,356	0,000	731102,892
0,21	5,968	6331,536	0,000	731102,892
0,24	6,891	6336,726	0,000	731102,892

Tabela 54- B1 e B3 por velocidade – condição 5

Froude	Velocidade [m/s]	B1 [ton.m ²]	B2 [ton.m ² /s]	B3 [ton.m ² /rad ²]
0,00	0,000	3069,886	0,000	1115893,888
0,12	3,446	3093,823	0,000	1115893,888
0,21	5,968	3111,342	0,000	1115893,888
0,24	6,891	3117,754	0,000	1115893,888

O valor de C2 é calculado como sendo uma média de valores de C2 (Fn_i), para sete frequências de encontro diferentes, definidas conforme a equação 28.

O valor de cada componente de C2 depende do fator de peso dado pela tabela de dispersão e o valor de C_i , que será zero ou um dependendo do ângulo máximo de roll obtido, conforme a equação 30.

Para calcular o valor de C_i dado pela equação 30, é necessário encontrar ângulo máximo de roll para cada altura de referência H_{r_i} . Para tal, é utilizado onze casos de onda, sendo que para cada caso de onda, o ângulo máximo de roll é encontrado através da solução numérica da equação de roll. As alturas de referência h_j foram definidas como sendo uma fração do comprimento do navio.

Para a restauração dez curvas de GZ foram calculadas, uma para cada onda, com a crista da onda posicionada em dez posições diferentes. Dessas curvas é possível perceber que a variação de estabilidade cresce à medida que a altura da onda e o comprimento aumentam, ou seja, a onda 10 apresenta a maior variação de estabilidade. A seguir são apresentadas duas curvas de GZ representativas, sendo a Figura 49 referente ao caso de onda 1 e a Figura 50 referente ao caso de onda 10, para a condição de carregamento 1. A curva verde, localizada mais acima das outras, representa o caso em que a crista da onda está localizada mais a ré e mais a vante da meia nau (-33,516 e 41,895 metros da meia nau respectivamente), apresentando uma máxima magnitude da restauração hidrostática. Já a curva azul, localizada abaixo de todas as curvas, representa o caso em que a crista da onda está localizada a meia nau, apresentando uma menor restauração hidrostática.

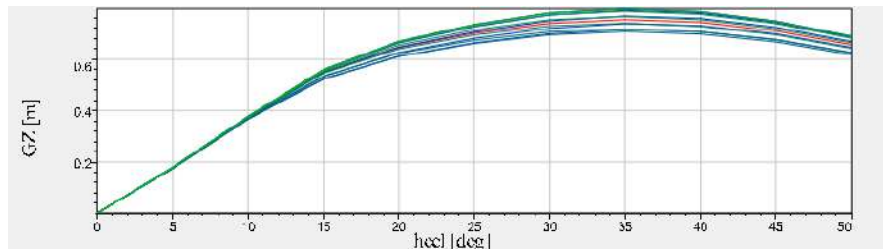


Figura 49- Curvas GZ – caso de onda 1- condição de carregamento 1

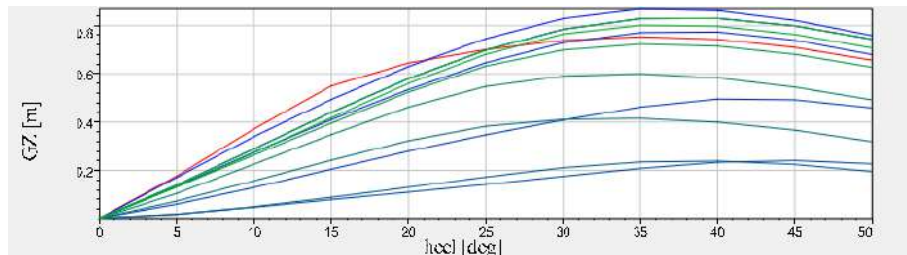


Figura 50- Curvas GZ – caso de onda 10- condição de carregamento 1

Resolvendo a equação de roll desacoplada foram encontradas 70 séries temporais (7 aproamentos x 10 alturas diferentes). A seguir é apresentado as séries encontradas para a maior altura de referência (8,38 metros) para dois aproamento, para a condição de carregamento 1, representando o caso típico de decaimento do movimento e da amplificação do movimento:

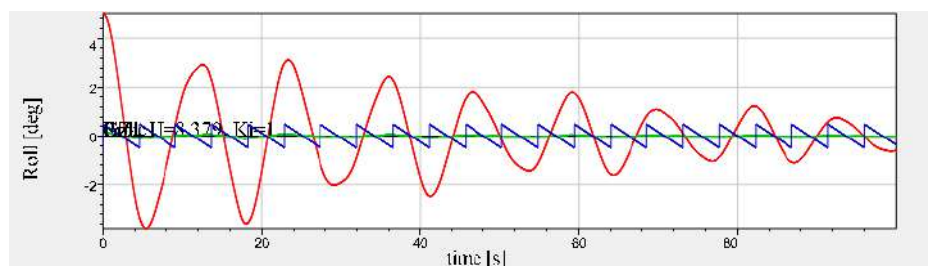


Figura 51- Caso de onda 10, $K_i=-1,0$ - Condição de carregamento 1

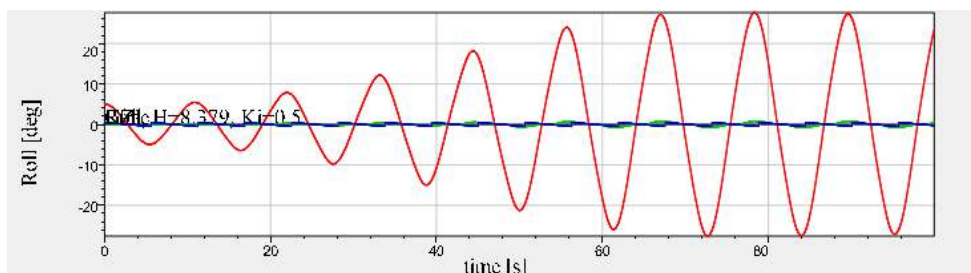


Figura 52- Caso de onda 10, $K_i=-0,5$ - Condição de carregamento 1

Os ângulos máximos encontrados são apresentados na Tabela 55 para a condição 1, na Tabela 33 para a condição 3 e na Tabela 57 para a condição 5.

Tabela 55- Ângulos máximos de roll- condição 1

h_j [m]	Ki=1,000	Ki=0,866	Ki=0,500	Ki=0,000	Ki=-0,500	Ki=-0,866	Ki=-1,000
0	5	5	5	5	5	5	5
0,838	5	5	5	5	5	5	5
1,676	5	5	5	5	5,00	5,00	5,00
2,514	5	5	5	5,00	5,00	5,00	5,00
3,352	5	5	5	5,00	5,00	5,00	5,00
4,190	5,00	6,40	5,19	5,18	5,49	5,00	5,00
5,027	5,00	5,00	7,47	5,77	14,99	5,00	5,00
5,865	5,00	5,00	25,91	6,32	13,60	5,25	5,00
6,703	5,00	5,00	29,15	7,18	9,53	5,59	5,00
7,541	5,00	5,00	28,90	8,61	8,60	6,02	5,05
8,379	5,00	5,00	27,61	11,20	8,79	6,65	5,23

Tabela 56- Ângulos máximos de roll- condição 3

h_j [m]	Ki=1,000	Ki=0,866	Ki=0,500	Ki=0,000	Ki=-0,500	Ki=-0,866	Ki=-1,000
0	5	5	5	5	5	5	5
0,8379	5,00	5,00	5	5	5	5	5
1,6758	5,00	5,00	5,87	5,29	5,06	5,02	5,00
2,5137	5,00	5,09	6,82	5,54	5,25	5,19	5,10
3,3516	5,09	5,53	7,54	5,76	5,44	5,34	5,23
4,1895	5,21	18,14	8,12	5,93	5,63	5,49	5,34
5,0274	5,51	19,71	8,50	6,09	5,82	5,63	5,44
5,8653	13,34	20,25	8,66	6,18	6,01	5,75	5,51
6,7032	15,44	20,27	8,62	6,17	6,22	5,84	5,55
7,5411	13,94	19,73	8,55	6,13	6,57	5,88	5,54
8,379	7,49	18,50	8,44	6,05	6,85	5,83	5,45

Tabela 57- Ângulos máximos de roll- condição 5

h_j [m]	Ki=1,000	Ki=0,866	Ki=0,500	Ki=0,000	Ki=-0,500	Ki=-0,866	Ki=-1,000
0	5	5	5	5	5	5	5
0,8379	5,00	5,00	5	5	5	5	5
1,6758	5,00	5,00	5,00	5	5,00	5,00	5,00
2,5137	5,00	5,00	5,00	5	5,00	5,00	5,00
3,3516	5,00	5,00	5,00	5	5,00	5,00	5,00
4,1895	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,04
5,0274	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,03	5,45
5,8653	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,99	6,48

h_j [m]	Ki=1,000	Ki=0,866	Ki=0,500	Ki=0,000	Ki=-0,500	Ki=-0,866	Ki=-1,000
6,7032	5,00	5,00	5,00	5,00	8,82	7,89	9,01
7,5411	5,00	5,00	5,00	5,00	12,62	10,47	12,96
8,379	5,00	5,00	5,00	5,00	15,12	13,36	17,67

O próximo passo é obter o ângulo máximo de roll para cada altura de onda representativa H_{ri} , para os sete casos de aproamento K_i , através de interpolação linear dos valores apresentados na Tabela 17. Os ângulos obtidos e suas contribuições para o C2 foram apresentados no Apêndice I, na Tabela 64, para a condição 1.

A Tabela 58 apresenta a contribuição de cada C2 (Fn_i) para o C2 para a condição 1, a Tabela 35 para a condição 3 e a para a condição 5.

Tabela 58- Contribuições de cada C2 (Fn_i) para C2- condição 1

Ki [1]	Fn_i	V_i [m/s]	Rel.Speed [m/s]	Período de encontro [s]	C2(Fn) [1]
1,000	0,240	6,890	18,328	4,57	0,000000
0,866	0,208	5,967	17,404	4,81	0,000000
0,500	0,120	3,445	14,883	5,63	0,000139
0,000	0,000	0,000	11,438	7,33	0,000000
-0,500	0,120	3,445	-7,993	10,48	0,000000
-0,866	0,208	5,967	-5,471	15,32	0,000000
-1,000	0,240	6,890	-4,548	18,42	0,000000

Tabela 59- Contribuições de cada C2 (Fn_i) para C2- condição 3

Ki [1]	Fn_i	V_i [m/s]	Rel.Speed [m/s]	Período de encontro [s]	C2(Fn) [1]
1,000	0,240	6,890	18,328	4,572	0,000
0,866	0,208	5,967	17,404	4,814	0,000
0,500	0,120	3,445	14,883	5,630	0,000
0,000	0,000	0,000	11,438	7,326	0,000
-0,500	0,120	3,445	-7,993	5,630	0,000
-0,866	0,208	5,967	-5,471	4,814	0,000
-1,000	0,240	6,890	-4,548	4,572	0,000

Tabela 60- Contribuições de cada C2 (Fn_i) para C2- condição 5

Ki [1]	Fn_i	V_i [m/s]	Rel.Speed [m/s]	Período de encontro [s]	C2(Fn) [1]
1	0,24	6,89	18,33	4,57	0,000000
0,866	0,21	5,97	17,40	4,81	0,000000
0,5	0,12	3,44	14,88	5,63	0,000000
0	0,00	0,00	11,44	7,33	0,000000
-0,5	0,12	3,44	-7,99	10,48	0,000000

Ki [/1]	Fn_i	V_i [m/s]	Rel.Speed [m/s]	Período de encontro [s]	C2(Fn) [/1]
-0,866	0,21	5,97	-5,47	15,32	0,000000
-1	0,24	6,89	-4,55	18,42	0,000000

O valor de C2 é igual a 0 para as condições 1 e 5 e 0,00002 para a condição 1, como o valor de C1 e C2 são menores que 0,06, para as três condições de carregamento, o PSV é não vulnerável a roll paramétrico para as condições analisadas.

Utilizando um ângulo inicial de roll maior e igual a dez graus o navio continua não sendo vulnerável, mas o ângulo máximo de roll encontrados são um pouco maiores.

A seguir é feita uma análise da curva de KG máximo. É calculado o KG máximo considerando as regras da primeira geração e para a segunda geração para os modos de falha de perda pura de estabilidade (primeiro nível- PL1 e segundo nível- PL2) e roll paramétrico (primeiro nível-PR1). Como nenhuma inconsistência foi encontrada para o roll paramétrico, somente o primeiro nível foi calculado, já que esse nível foi constatado mais rigoroso que o primeiro, conforme era esperado. A Figura 53 apresenta a curva de KG máximo para cada caso.

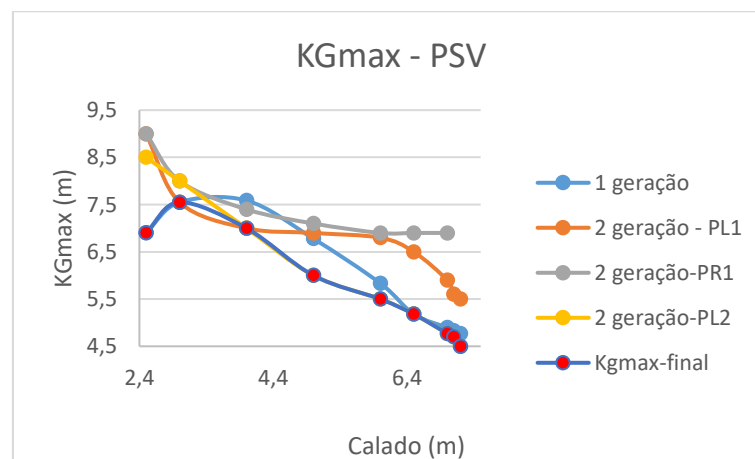


Figura 53- KG máximo

Da curva de KG máximo é possível constatar que a partir do calado igual a 3 metros, o critério da segunda geração passa a restringir mais o KG que os critérios da primeira geração. Dessa forma, se somente a primeira geração fosse aplicada no estudo de estabilidade do PSV, algumas condições de vulnerabilidades não seriam constatadas.

Conclusões e Recomendações

No presente trabalho foram investigados e analisados os critérios de estabilidade da segunda geração para dois modos de falha, roll paramétrico e perda pura de estabilidade, para um navio do tipo porta-contentor, por ser um navio típico de ocorrência de instabilidades dinâmicas e para um navio de apoio (PSV), com especial interesse em investigar a ocorrência de falsos negativos para perda pura de estabilidade.

Este trabalho faz parte do projeto de desenvolvimento de uma ferramenta numérica (DSSTAB) que será usada para a futura avaliação dos critérios da segunda geração. O DSSTAB vem sendo desenvolvido pelo grupo de investigação de estabilidade dinâmica da COPPE-UFRJ, Tecgraf-PUC Rio e CENPES-Petrobras. Os resultados encontrados para o C11, foram comparados com os resultados da delegação da IMO-França, dessa forma o C11 serviu de *benchmarking* para o presente trabalho.

Na verificação de perda pura de estabilidade, o C11 foi considerado como sendo vulnerável no primeiro nível para os dois métodos de avaliação, já que o valor encontrado para a altura metacêntrica mínima é igual a -2,426 m no primeiro método e igual a -0,540 m no segundo método, sendo que o valor da altura metacêntrica crítica é de 0,05 m, ou seja, qualquer altura metacêntrica menor que 0,05 o navio é considerado vulnerável.

O C11 também resultou vulnerável a perda pura de no segundo nível. Vale salientar que os dois níveis são consistentes para o C11, não apresentando nenhum falso negativo. Do ponto de vista prático da aplicação do critério, duas opções seriam possíveis com esse resultado. A primeira seria realizar uma análise com o terceiro nível, que é a avaliação direta (*direct assessment*), ou seja, é o nível no qual é realizada uma simulação não linear no domínio do tempo. Se nesse nível for constatado que o C11 é vulnerável à ocorrência de roll paramétrico, deve-se, então, incluir, no guia de operação, os procedimentos para evitar essa ocorrência. A segunda opção seria incluir no guia de operação, os procedimentos para evitar essa ocorrência sem ter que realizar a verificação do terceiro nível.

O navio C11 foi considerado vulnerável no primeiro nível, para os dois métodos de avaliação, já que o valor encontrado da variação da altura metacêntrica é igual a 68,5% da altura metacêntrica em águas calmas no primeiro método e igual 54,8% no segundo método, sendo maior que o valor crítico para ocorrência de roll paramétrico, que nesse caso é de 40,5%. Observando os valores encontrados, foi possível concluir que o resultado

encontrado no primeiro método é mais conservador. Além disso, esse método é mais fácil de ser aplicado, já que é possível utilizar programas de estabilidades intactas da primeira geração para realizar os seus cálculos.

No segundo nível de roll paramétrico, o C11 foi avaliado como sendo não vulnerável a roll paramétrico. Analisando as curvas GZ obtidas nesse método, observou-se mudanças significativas da estabilidade com a passagem da onda. Porém, ao realizar a simulação numérica no tempo nenhuma amplificação grande no roll foi observada. Uma atenção especial foi dada para a região que continha a frequência de encontro igual a duas vezes a frequência natural de roll, encontrando uma amplificação do ângulo de roll nessa região. É possível concluir, que para esse navio, para essa condição de carregamento, o critério da segunda geração é bem consistente, já que nenhum falso negativo foi encontrado entre os dois níveis.

A diferença entre os resultados encontrados nesse trabalho e os resultados encontrados pela delegação da IMO-França é pequena, com exceção dos valores de C1 para a perda pura de estabilidade nível 2. Essa diferença é devida a diferença do ângulo de perda de estabilidade mínimo encontrada no caso de onda 7 e 8, conforme explicado no tópico 3 do capítulo 4.

O navio PSV foi considerado não vulnerável no primeiro nível para as seis condições de carregamento analisadas, passando com bastante folga. Porém, no segundo nível o PSV não passou em duas condições de carregamento. Dessa forma, foi constatado uma inconsistência para esse PSV entre os dois níveis de perda pura de estabilidade. Esse resultado é compatível com o resultado reportado por algumas delegações da IMO para outros navios do tipo PSV IMO (2016).

No caso do roll paramétrico, o navio PSV foi considerado como não vulnerável no primeiro nível, para as seis condições de carregamento analisadas. Do ponto de vista formal do critério, com esses resultados do primeiro nível não seria mais necessária a aplicação do segundo nível. No entanto, com o intuito de verificar a consistência entre ambos os níveis foi feita a verificação de três das condições de carregamento no segundo nível.

As três condições analisadas passaram no segundo nível, sendo consideradas não vulneráveis. Vale ressaltar, que durante as observou-se desenvolvimento do roll paramétrico em duas condições, porém sem atingir o patamar de amplitude de roll considerado crítico, passando com bastante folga nos critérios desse modo de falha.

Nenhuma inconsistência foi encontrada entre os dois níveis, ou seja, nenhum falso negativo foi encontrado. É possível concluir que essa embarcação não é suscetível a roll paramétrico para as condições de carregamento analisadas.

Apesar do PSV passar em todos os critérios de estabilidade da primeira geração, foi constatado que ele possui vulnerabilidade a sofrer perda pura de estabilidade em duas condições de carregamento. Além disso, da curva de KG máximo é possível constatar que a partir do calado igual a 3 metros, o critério da segunda geração passa a restringir mais o KG que os critérios da primeira geração. Dessa forma, se somente a primeira geração fosse aplicada no estudo de estabilidade do PSV, algumas condições de vulnerabilidades não seriam constatadas.

Comparando os limites para a ocorrência de roll paramétrico do PSV e do C11 no primeiro nível, é possível perceber que o C11 é mais sensível a esse modo de falha. O C11 é considerado vulnerável se sua variação na estabilidade for maior que 40,4% da altura metacêntrica em águas calmas enquanto que o PSV tem um limite de 87,7%, ou seja, o PSV precisa de uma variação maior de estabilidade para ser considerado vulnerável. Essa diferença de limite está relacionada principalmente com a forma do navio e com sua capacidade de amortecimento (bolina e etc.).

As ferramentas e os cálculos para verificar os modos de falha da segunda geração demonstraram-se de fácil utilização. Sendo assim, eles podem ser aplicados na fase preliminar do projeto, proporcionando um aumento na segurança dos navios em termos de estabilidade.

Com base nas experiências aprendidas no desenvolvimento deste trabalho, recomenda-se os seguintes trabalhos futuros:

- Para as embarcações estudadas, analisar e verificar mais condições de carregamentos;
- Fazer o mesmo estudo para vários navios tipo porta-contentores. Assim será possível garantir a aplicabilidade dos critérios, além de garantir nenhum falso negativo entre os níveis;
- Fazer o mesmo estudo para vários navios tipo PSV. Assim será possível garantir a aplicabilidade dos critérios, além de garantir nenhum falso negativo entre os níveis.

- Estudar distintos tipos de navios. Dessa forma, será possível garantir que os critérios da segunda geração conseguem detectar as instabilidades dinâmicas para todos os tipos de embarcações.
- Realizar o terceiro nível e verificar a consistência dos outros dois níveis.

Vale ressaltar, que os critérios ainda não foram finalizados, dessa forma, em trabalhos futuros é de extrema importância uma análise cuidadosa das formulações vigentes.

Apêndice

A. Critérios atuais (primeira geração) de estabilidade para um PSV

Os critérios de estabilidade intacta para um PSV com comprimento não maior que 100m fornecidos pela IMO são explicados a seguir (IMO. Resolution MSC.267(85) Annex 2, 2008):

- A área sob a Curva de Estabilidade Estática (curva GZ) compreendida entre os ângulos de inclinação de 0° e 15° não deve ser inferior a 0,070 m.rad quando o braço de endireitamento máximo ocorrer em 15° . E não deverá ser inferior a 0,055 m.rad até o ângulo de inclinação de 30° quando o braço de endireitamento máximo ocorrer em 30° ou em um ângulo superior. Quando o braço de endireitamento máximo ocorrer em um ângulo de inclinação entre 15° e 30° , a área correspondente sob a curva deverá ser, no mínimo :

$$0,055 + 0,001(30^\circ - \varphi_{\max}) \text{ metros} - \text{rad} \quad (59)$$

- A área sob a Curva de Estabilidade Estática compreendida entre os ângulos de inclinação de 30° e 40° , ou entre 30° e o ângulo de alagamento (θ_f), caso este seja menor do que 40° , não deverá ser inferior a 0,030 m.rad.
- O braço de endireitamento correspondente ao ângulo de inclinação de 30° não deverá ser menor do que 0,20 m.
- O braço de endireitamento máximo deverá ocorrer em um ângulo de inclinação maior ou igual a 15° .
- A altura metacêntrica inicial (GMo) não deve ser menor do que 0,15 m.

B. Análise da equação linear de roll

Nesse tópico é explicado em detalhe a base teórica por trás do primeiro nível do critério para a ocorrência de Roll paramétrico. A dedução a seguir foi baseada no paper “*The second Generation of Intact Stability Criteria: A overview of Development*” (PETERS et al., 2011).

A equação linear de roll é dada por:

$$(I_x + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + \Delta \cdot GM\phi = 0 \quad (60)$$

Sendo I_x o momento de inércia transversal, A_{44} a massa adicional de roll, B_{44} o coeficiente de amortecimento linear e Δ o peso deslocado do navio.

Uma forma de torna essa equação mais representativo do fenômeno real é utilizar o GM dependente do tempo.

$$(I_x + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + \Delta \cdot GM(t)\phi = 0 \quad (61)$$

Para ondas regulares, a variação da altura metacêntrica é pequena, portanto o GM pode ser aproximado para uma função senoidal:

$$GM(t) = GM_m + \delta GM \cos(\omega_e t) \quad (62)$$

Sendo ω_e a frequência de encontro, GM_m é o valor médio do GM, e δGM e a amplitude do GM em ondas. Como uma primeira aproximação, podemos aproximar o GM_m e o δGM para:

$$\delta GM = 0,5 (GM_{max} - GM_{min}) \quad (63)$$

$$GM_m = 0,5 (GM_{max} + GM_{min}) \quad (64)$$

Colocando a equação de roll na forma canônica:

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \omega_m^2(1 + h\cos(\omega_e t))\phi = 0 \quad (65)$$

Sendo:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_m}{I_x + A_{44}}} \quad (66)$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{\Delta \cdot \delta GM}{I_x + A_{44}}} \quad (67)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{B_{44}}{I_x + A_{44}} \quad (68)$$

$$h = \frac{\omega_a^2}{\omega_m^2} \quad (69)$$

Introduzindo:

$$\tau = \omega_e t \quad (70)$$

Realizando a seguinte troca de variável:

$$\phi(\tau) = x(\tau)e^{(-\mu\tau)} \quad (71)$$

Com suas derivadas no tempo dadas por:

$$\dot{\phi}(\tau) = \omega_e \dot{x}(\tau)e^{(-\mu\tau)} - \mu\omega_e x(\tau)e^{(-\mu\tau)} \quad (72)$$

$$\ddot{\phi}(\tau) = \omega_e^2 \ddot{x}(\tau)e^{(-\mu\tau)} - 2\mu\omega_e^2 \dot{x}(\tau)e^{(-\mu\tau)} + \omega_e^2 \mu^2 x(\tau)e^{(-\mu\tau)} \quad (73)$$

Substituindo na equação canônica:

$$\begin{aligned} \omega_e^2 \ddot{x}(\tau)e^{(-\mu\tau)} - 2\mu\omega_e^2 \dot{x}(\tau)e^{(-\mu\tau)} + \omega_e^2 \mu^2 x(\tau)e^{(-\mu\tau)} + \\ 2\delta(\omega_e \dot{x}(\tau)e^{(-\mu\tau)} - \omega_e \mu x(\tau)e^{(-\mu\tau)}) + \\ \omega_m^2(1 + h\cos(\omega_e t))(x(\tau)e^{(-\mu\tau)}) = 0 \end{aligned} \quad (74)$$

Resultando em:

$$\begin{aligned} \omega_e^2 \ddot{x}(\tau) + (-2\mu\omega_e^2 + 2\omega_e \delta)\dot{x}(\tau) \\ + (\omega_e^2 \mu^2 - 2\delta\omega_e \mu + \omega_m^2 + \omega_m^2 h\cos(\omega_e t))x(\tau) = 0 \end{aligned} \quad (75)$$

Sendo:

$$\mu = \frac{\delta}{\omega_e} \quad (76)$$

Tem-se:

$$\omega_e^2 \ddot{x}(\tau) + (\omega_e^2 \mu^2 - 2\delta\omega_e \mu + \omega_m^2 + \omega_m^2 h\cos(\omega_e t))x(\tau) = 0 \quad (77)$$

$$\omega_e^2 \ddot{x}(\tau) + (-\delta^2 + \omega_m^2 + \omega_m^2 h\cos(\omega_e t))x(\tau) = 0$$

$$\omega_e^2 \ddot{x}(\tau) + (-\mu^2\omega_e^2 + \omega_m^2 + \omega_m^2 h\cos(\omega_e t))x(\tau) = 0$$

O que leva à equação de Mathieu:

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} + (p + q\cos(\tau))x = 0$$

Sendo:

$$\mu = \frac{\delta}{\omega_e} \quad (78)$$

$$p = (\bar{\omega}_m^2 - \mu^2) \quad (79)$$

$$\bar{\omega}_m = \frac{\omega_m}{\omega_e} \quad (80)$$

$$q = \bar{\omega}_m^2 h \quad (81)$$

A solução de Mathieu não pode ser expressa por funções elementares. Uma função especial, a função de Mathieu, foi introduzida para descrever a solução dessa equação. A característica mais importante dessa solução é que ela pode ou não ter limites conforme apresentado da Figura 54 abaixo.

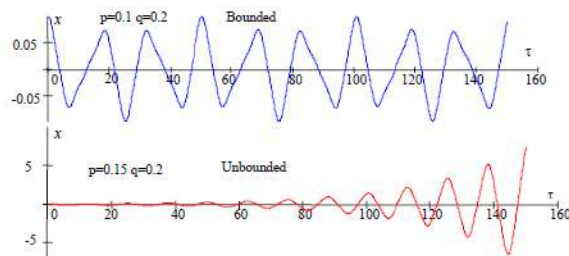


Figura 54- Soluções com limite e sem da Equação de Mathieu. *Fonte: Peters et Al. (2011)*

Combinações diferentes dos coeficientes p e q resultam em soluções com limites e soluções limitadas e ilimitadas, conforme apresentado na Figura 54. O diagrama de Ince-Srutt, apresentado na Figura 55, mapeia as soluções com limites e sem limites, dependentes dos coeficientes p e q . As áreas cinzas, na Figura 55, identificadas por número romanos, identificam as soluções que não possuem limites, ou seja, a resposta cresce com cada ciclo. Essas zonas são zonas de instabilidade.

A primeira zona de instabilidade intercepta o eixo p exatamente em $p=0,25$, o que corresponde a razão de frequência igual a 2; logo a frequência de excitação é duas vezes a frequência natural de roll nesse ponto. O movimento instável pertencente a essa região é conhecido como a principal zona de ressonância paramétrica. Essa zona é apresentada em destaque na Figura 55.

A equação de Mathieu tem uma solução periódica limitada já que o amortecimento foi excluído através da transformação de variáveis, conforme explicado acima. Isso significa que, o roll correspondente $\phi(\tau)$, decai com o decremento do amortecimento, μ , se $x(\tau)$ é uma solução periódica da equação de Mathieu, como apresentado na Figura 54. Isso também significa que existe um valor limite para o amortecimento de roll para cada par dos parâmetros p e q . Se o valor de amortecimento é menor que o valor limite, o roll será ilimitado como uma solução da equação de Mathieu. Se o amortecimento de roll for maior que o limite, o roll é limitado, mesmo que a solução da equação de Mathieu seja ilimitada. O incremento da equação de Mathieu não é suficiente para superar o decremento do amortecimento de roll. Significa também que,

com amortecimento linear, a zona de instabilidade é mais estreita e requer algum valor finito de variações GM mesmo em $p = 1/4$, ou seja, essa zona não toca no eixo de p , conforme a Figura 56.

Os limites para indicar onde a ressonância paramétrica é possível revelam duas condições interdependentes que podem ser usadas para formular os seguintes critérios: Condição de frequência e condição de excitação paramétrica. A condição de frequência depende da frequência natural de roll e da frequência de encontro. A frequência natural depende da condição de carregamento, enquanto a frequência de encontro depende dos parâmetros da onda, velocidade do navio e o ângulo de incidência. A condição de excitação paramétrica requer que a mudança na estabilidade seja grande o suficiente para causar instabilidade; essa condição depende da geometria do casco e dos parâmetros da onda utilizada para a avaliação.

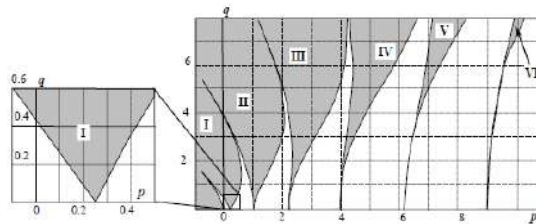


Figura 55- Diagrama de Ince-Strutt. Fonte: Peters et Al. (2011)

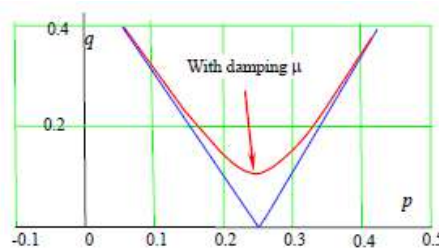


Figura 56- Influência do amortecimento na primeira zona de instabilidade.

Fonte: Peters et Al. (2011)

Para derivar um critério para a excitação paramétrica crítica que cria o crescimento do roll, é necessário considerar uma solução aproximada da equação do tipo de Mathieu (para exatamente a ressonância principal $\omega_e = 2\omega_m$), como apresentado por Hayashi (1985) e usado para derivar o critério do “estado transiente” para roll paramétrico por Spyrou (2005) como a seguir:

$$\phi(t) = e^{-\delta t} (C_1 e^{k\omega_m t} \text{sen}(\omega_m t - \varepsilon) + C_2 e^{-k\omega_m t} \text{sen}(\omega_m t + \varepsilon)) \quad (82)$$

Sendo C_1 e C_2 são constantes arbitrárias, as quais são determinadas pela condição inicial e k é um parâmetro que controla o crescimento ou decaimento das oscilações.

$$k = -\frac{1}{4}\sqrt{a^2h^2 - 4(a-1)^2} \quad (83)$$

E a é a variável que expressa a razão das frequências:

$$a = 4\frac{\omega_m^2}{\omega_e^2} \quad (84)$$

Se $\omega_e = 2\omega_m$ tem-se que $a = 1$, o que é exatamente a metade da zona de instabilidade (da ressonância paramétrica principal) do diagrama de Strutt.

A fase ε é determinada por:

$$\cos(2\varepsilon) = \frac{2(a-1)}{a.h}; \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varepsilon \leq 0 \quad (85)$$

A frequência de encontro considerada é a frequência que corresponde a principal ressonância paramétrica:

$$a = 1 \quad (86)$$

$$k = -\frac{h}{4} \quad (87)$$

Considerando a velocidade inicial de roll igual a zero e o roll inicial de ϕ_0 , encontra-se os seguintes valores para as constantes de integração:

$$\varepsilon = -\frac{\pi}{4} \quad (88)$$

$$\dot{\phi}_0 = 0 \quad (89)$$

Substituindo:

$$\phi(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \phi_0 e^{-\delta t} \left(e^{-\frac{h}{4}\omega_m t} \text{sen} \left(\omega_m t + \frac{\pi}{4} \right) - e^{\frac{h}{4}\omega_m t} \text{sen} \left(\omega_m t - \frac{\pi}{4} \right) \right) \quad (90)$$

A equação acima permite calcular o fator de amplificação, f , depois de n oscilações:

$$f = \frac{1}{\phi_0} \phi(t) = \frac{1}{\phi_0} \phi \left(\frac{2\pi n}{\omega_m} \right) \quad (91)$$

Da equação de $\phi(t)$ tem-se que o termo com expoente negativo é desprezível comparado com o termo positivo que cresce exponencialmente. Substituindo a equação de $\phi(t)$ na equação de amplificação f :

$$f = -\frac{\sqrt{2}}{2} e^{\left(\frac{h}{2}\pi n - \frac{\delta 2\pi n}{\omega_m} \right)} \text{sen} \left(2\pi n - \frac{\pi}{4} \right) \quad (92)$$

Isolando o termo h da equação acima:

$$h = 2 \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4\delta}{\omega_m} \quad (93)$$

Dado um fator de amplificação e o número de oscilações, deduz-se o seguinte critério, assumindo que as mudanças de estabilidade nas ondas são simétricas em relação aos valores da água calma:

$$\frac{\delta GM}{GM_c} \geq 2 \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4\delta}{\omega_0} \quad (94)$$

Portanto, o critério dependerá do coeficiente de amortecimento δ e da frequência ω_0 , do número de ciclos n e do fator de amplificação f . Lembrando que:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_m}{I_x + A_{44}}} \rightarrow GM_m = \omega_m^2 \cdot \left(\frac{\Delta}{I_x + A_{44}} \right) \quad (95)$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{W \cdot GM_a}{I_x + A_{44}}} \rightarrow \delta GM = \omega_a^2 \cdot \left(\frac{\Delta}{I_x + A_{44}} \right) \quad (96)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{B_{44}}{I_x + A_{44}} \quad (99)$$

Seguindo a recomendação da ABS (2004), uma estimativa conservativa seria:

$$\frac{\delta}{\omega_c} = 0,03 \quad (97)$$

E usando uma estimativa de $f = 5$ e $n = 4$, tem-se que:

$$\frac{\delta GM}{GM_c} \geq 0,5 \quad (98)$$

Fazendo uma análise desconsiderando a solução transiente, ou seja, f e n indo para o infinito, tem-se que:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ f \rightarrow \infty}} \left(2 \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4\delta}{\omega_0} \right) = \frac{4\delta}{\omega_c} \rightarrow \frac{GM_a}{GM_c} \geq \frac{4\delta}{\omega_c} \quad (100)$$

E o critério seria:

$$\frac{\delta GM}{GM_c} \geq 0,1 \quad (101)$$

C. Procedimento para determinar o ângulo de roll com técnica de simulação numérica no domínio do tempo

A equação linear de roll estudada no Apêndice B é um modelo adequado para identificar o início do fenômeno de roll paramétrico. Entretanto, não é possível prever com esse modelo a amplitude do movimento de roll, já que uma vez que iniciada a ressonância paramétrica em um sistema linear, a amplitude irá crescer sem nenhum limite. São as não linearidades que estabilizam o mecanismo. Além disso, o ângulo máximo de roll é alcançado durante o estado estacionário do roll paramétrica. Portanto, é necessária uma grande parte da curva GZ para encontrar o ângulo máximo de roll. A Figura 57 apresenta um gráfico com representação do movimento, ao utilizar o modelo linear e o não linear.

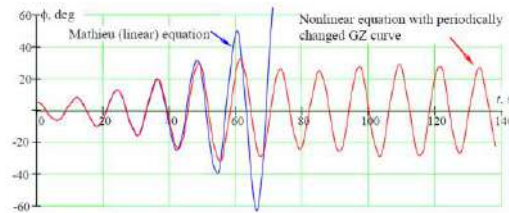


Figura 57- Representação do Roll Paramétrico utilizando modelo linear. Fonte: Peters et Al. (2011)

O mecanismo de estabilização está relacionado principalmente à não-linearidade da curva GZ. Uma vez que a amplitude da oscilação do roll se torna suficientemente grande, a condição de frequência para a ressonância paramétrica não é mais satisfeita, pois a mudança no GM instantâneo leva a uma mudança na frequência natural instantânea. Isso significa que, uma vez que uma certa amplitude do roll for excedida, o fluxo de energia no sistema dinâmico irá parar. A energia adicional está disponível somente abaixo dessa amplitude, o que leva ao estabelecimento do equilíbrio energia / trabalho e à estabilização da amplitude e, eventualmente, leva a um ciclo limite. Portanto, o modelo matemático mais simples, capaz de reproduzir a estabilização do Roll paramétrico, deve incluir a Curva GZ não linear.

O amortecimento não linear de roll também pode ser um fator de estabilização. Um aumento na amplitude dos movimentos de roll leva a um aumento na magnitude da taxa de roll quando o navio atravessa o ponto de equilíbrio. O aumento na taxa de roll torna o amortecimento não linear grande o suficiente para elevar o limite acima do nível atual de excitação paramétrica. Isso também interrompe o fluxo de energia para o sistema dinâmico e estabiliza o Roll Paramétrico.

No entanto, a não-linearidade de amortecimento de roll é relativamente fraca em comparação com os efeitos da curva GZ e deve ser considerada como um fator secundário para a estabilização em ondas regulares. Além disso, se a amplitude do roll for grande o suficiente, o amortecimento torna-se dependente do ângulo do roll. Esta dependência pode levar a uma diminuição do amortecimento (quando a bolina emerge da água), bem como a um aumento do amortecimento (quando a borda do convés fica submersa na água). Essas considerações, no entanto, tornam o modelo matemático muito complexo para a verificação de vulnerabilidade de segundo nível, então faz sentido limitar a descrição do amortecimento a uma aproximação cúbica ou quadrática.

Isto posto, o modelo matemático mais simples capaz de estimar o ângulo máximo de roll inclui quatro momentos:

1. O momento de Inércia, incluindo a inércia adicional (ou massa adicional), M_{IN}
2. Momento devido ao amortecimento e roll, o qual expressa a energia dissipada devido a propagação de ondas causadas pelo movimento de roll, vórtices e fricção, M_D .
3. Momento devido a restauração de roll (rigidez), que é moldada através da curva GZ em águas calmas; A variação da estabilidade em ondas é incluída pelo GM representado como um sinal seno, M_R .
4. Momento devido a forças transversais em ondas.

Segundo a segunda lei de Newton, a equação do movimento de roll é expressada pela igualdade das forças inerciais com a soma das outras forças. Considerando o navio em ondas longitudinais, a força transversal devido a onda será nula, logo tem-se:

$$M_{IN} = -M_D - M_R \quad (102)$$

Na equação acima, os valores negativos foram inseridos porque a força de amortecimento e a força de restauração são diretamente contrárias ao movimento de roll. A equação de roll pode ser reescrita de forma que cada termo tenha em evidencia os parâmetros de dependência:

$$M_{IN}(\ddot{\phi}) = -M_D(\dot{\phi}) - M_R(t, \phi) \quad (103)$$

Sendo $\ddot{\phi}$ a aceleração angular de roll, $\dot{\phi}$ velocidade angular de roll, ϕ deslocamento de roll e t é o tempo. A velocidade angular de roll é a derivada do movimento de roll e a aceleração é a derivada da velocidade.

O momento de inércia de roll do navio é medido através do momento longitudinal de inércia. Em ausência de dados específicos do navio, é recomendado assumir que o raio de giração r_x como 40% da boca moldada, B .

$$r_x = 0,4 B \quad (104)$$

Então, o momento de inércia I_x , é calculado por:

$$I_x = \rho \nabla r_x^2 \quad (105)$$

Sendo ρ a massa específica do fluido e ∇ o volume de deslocamento.

A massa adicional, em ausência de dados específicos da embarcação, pode ser considerada como sendo:

$$A_{44} = 0,25 I_x \quad (106)$$

Logo, a inércia de roll é dada por:

$$M_{IN}(\ddot{\phi}) = (I_x + A_{44})\ddot{\phi} \quad (107)$$

Onde:

$$I_x + A_{44} = \frac{\rho \nabla G M_c T_\phi^2}{4\pi^2} \quad (108)$$

Sendo T_ϕ o período natural de roll e $G M_c$ a altura metacêntrica em águas calmas.

O amortecimento do movimento de roll é essencialmente uma transferência de energia do movimento do navio para o meio ambiente. O teste com modelos é a fonte mais confiável para informações do amortecimento, devido à complexidade desse fenômeno físico. Porém, na ausência dos dados de testes com modelos, o método simplificado do Ikeda pode ser usado. O amortecimento devido a roll é apresentado da seguinte maneira:

$$M_D(\dot{\phi}) = (I_x + A_{44})(\delta_1 \dot{\phi} + \delta_3 \dot{\phi}^3) \quad (109)$$

Sendo δ_1 e δ_3 coeficientes determinados pelo método do Ikeda. O método simplificado do Ikeda possui alguns elementos empíricos e, por essa razão, o intervalo de aplicabilidade deve ser observado.

Uma representação adequada da restauração do roll é muito importante para uma correta representação do roll paramétrico. O cálculo da restauração de roll instantânea pode ser muito complexa para o segundo nível. Consequentemente, uma abordagem quase estática pode ser usada. Uma abordagem quase estática significa que, a curva GZ do navio em ondas é calculada através forma estática tradicional, porém a linha d'água não é *flat*. Ela é determinada através da interseção da onda e da superfície do casco. Para a avaliação do roll paramétrico é recomendado calcular a curva GZ até o ângulo de 180

graus. Isso define um máximo natural e impede que a solução numérica cresça muito e cause um erro numérico. Alternativamente, pode ser usado um ângulo de corte máximo. Ao ultrapassar esse ângulo de roll de corte o cálculo é interrompido. A variação do GZ em ondas é apresentada na Figura 58. Cada curva apresentada nessa figura é calculada para uma posição particular da crista da onda em relação a meia nau. Para valores intermediários do ângulo e da posição da crista da onda pode ser usada uma interpolação bi linear.

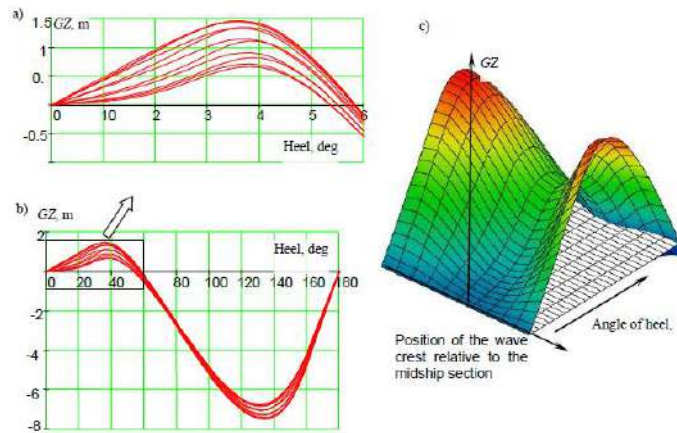


Figura 58- Curva GZ em ondas. Fonte: (IMO, 2016)

A definição do posicionamento da crista da onda é apresentada na Figura 59.

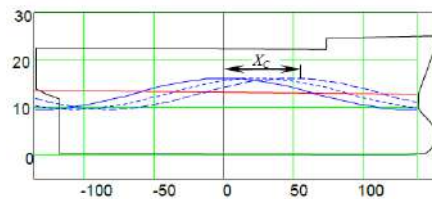


Figura 59- Posição da crista da onda em relação a Meia Nau. Fonte: (IMO, 2016)

A posição da crista da onda é uma função do tempo, que possui um movimento uniforme com a celeridade constante igual a velocidade de encontro, fornecida na equação 230. Sendo V_e a velocidade de encontro e X_0 posição inicial da crista em relação a meia nau.

$$X_c = V_e t + X_0 \quad (110)$$

Vale ressaltar que a equação apresentada pela IMO (2016), dada pela equação 229, é inconsistente com a física do problema, já que o movimento da crista é retilíneo uniforme com a celeridade constante igual a velocidade de encontro e não senoidal como proposto pela IMO.

$$X_C = 0,5\lambda \text{ sen}(\omega_e t) \quad (111)$$

Onde:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V_s \cos(\beta) \quad (112)$$

Sendo β o ângulo de incidência (igual a 0 em mar de popa e 180° em mar de proa).

Logo o valor da curva GZ em ondas pode ser apresentada como uma função do tempo e do ângulo de roll:

$$GZ = GZ(t, \phi) \quad (113)$$

Se, o software de cálculo não estiver disponível, a curva GZ em onda pode ser aproximada usando apenas o valor GM em ondas. Então, o GZ em ondas pode ser aproximado por:

$$GZ(t, \phi) = \frac{GM(t)}{GM_C} GZ_C(\phi) \quad (114)$$

Sendo GZ_C a curva de endireitamento em águas calmas, GM_C a altura metacêntrica em águas calmas e $GM(t)$ a altura metacêntrica em ondas.

Para uma curva GZ simétrica:

$$M_R = \text{sign}(\phi) \rho \nabla g \cdot GZ(t, |\phi|) \quad (115)$$

$$\text{sign}(\phi) = \begin{cases} 1 & \phi \geq 0 \\ -1 & \phi < 0 \end{cases} \quad (116)$$

Para uma curva GZ assimétrica, o cálculo deve ser feito para bombordo e estibordo (ou boreste) separadamente e o momento de restauração total será:

$$M_R = \nabla g \cdot GZ_B(t, \phi) \quad (117)$$

$$GZ_B(t, \phi) = \begin{cases} GZ_S(t, \phi) & \phi \geq 0 \\ GZ_P(t, \phi) & \phi < 0 \end{cases} \quad (118)$$

Onde:

$GZ_B(t, \phi) = \text{curva de endireitamento completa, (m)}$

$GZ_S(t, \phi) = \text{curva de endireitamento para estibordo, (m)}$

$GZ_P(t, \phi) = \text{curva de endireitamento para bombordo, (m)}$

Assume-se que a curva é descrita por um valor positivo quando estiver indo para estibordo e negativa para bombordo.

A equação de roll é, portanto, dada por:

$$(I_x + A_{44})\ddot{\phi} + (I_x + A_{44})(\delta_1\dot{\phi} + \delta_3\dot{\phi}^3) + \nabla g \cdot GZ_B(t, \phi) = 0 \quad (119)$$

Essa equação pode ser resolvida através de um método numérico apropriado. Com esse propósito, a equação de roll é apresentada na forma de uma função de autovalor:

$$F\left(\begin{pmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \end{pmatrix}, t\right) = \frac{1}{I_x + A_{44}} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ -M_D(\dot{\phi}) - M_R(t, \phi) \end{pmatrix} \quad (120)$$

Além da função de autovalor, também é requerido condições iniciais.

Para completar os dados de entrada necessários para calcular a amplitude máxima de roll, são necessários mais dois parâmetros: o incremento do tempo Δt e o número total de pontos, N . Esses parâmetros podem ser relacionados com a frequência natural de roll, ω_c , em águas calmas, já que o estado estacionário do movimento de roll paramétrico em ondas longitudinais ocorre nessa frequência:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{\rho \nabla g \cdot GZ_c}{I_x + A_{44}}} \quad (121)$$

Logo, o período do movimento de roll em águas calmas é:

$$T_\phi = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (122)$$

O incremento do tempo Δt pode ser expresso em termos do número de pontos por período N_{ppp} :

$$\Delta t = \frac{T_\phi}{N_{ppp}} \quad (123)$$

Portanto, o número de pontos depende do número de períodos a serem reproduzidos N_{per} :

$$N = N_{ppp} N_{per} \quad (124)$$

Pela experiência prática, recomenda-se:

$$N_{ppp} = 30, N_{per} = 15 \quad (125)$$

A resposta do roll paramétrico tem uma transição do estado onde as condições iniciais ainda têm uma influência para o estado estacionário onde as amplitudes são semelhantes ou próximas uma da outra. Diferentes critérios de "proximidade" podem ser usados: relativo (a diferença é menor que 3 - 5%) ou absoluto (a diferença é menor que um grau). Seguindo estes critérios, a porção de estado estacionário da resposta pode ser

extraída, conforme a Figura 60, e o ângulo de roll máximo resultante pode ser encontrado como uma média de amplitudes de roll no estado estacionário.

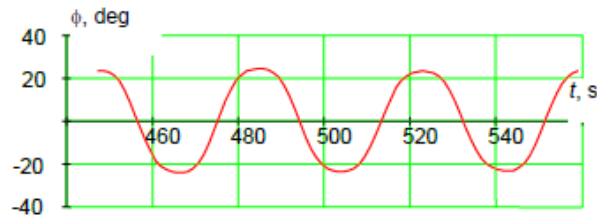


Figura 60- Parte estacionária do movimento de roll em ressonância paramétrica.

Fonte: (IMO, 2016)

Outra resposta possível da equação de roll é representada por oscilações que decaem em função do tempo de oscilação. O máximo ângulo de roll nesse caso é o ângulo correspondente a condição inicial, conforme pode ser observado na Figura 61. No caso apresentado nessa figura o ângulo da condição inicial é de 5° que é o maior ângulo de roll nesse caso.

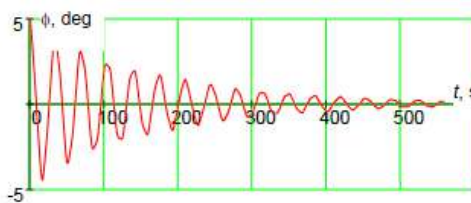


Figura 61- Resposta de roll em ausência de roll paramétrico. Fonte: (IMO, 2016)

Outra possibilidade pode incluir “capsizing” se a curva GZ for calculada para o intervalo inteiro até 180°.

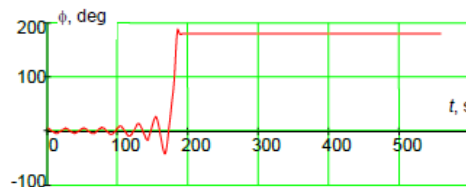


Figura 62- Resposta de roll com roll paramétrico e capsizing. Fonte: (IMO, 2016)

O modelo matemático, apresentado nesse apêndice é, provavelmente, muito simples para modelar o *capsizing* real, mas a resposta, semelhante à mostrada na Figura 62, indica de fato uma condição de roll paramétrico forte no qual o ângulo de roll máximo excede o nível padrão de 25 graus.

Em casos raros, a resposta da equação de roll não se estabiliza. A amplitude do roll pode crescer constantemente ou parecer com uma resposta de roll em mare irregular. Essas respostas não são o resultado de um erro, mas de um tipo conhecido de comportamento não-linear. Neste caso, é utilizado o ângulo de roll máximo alcançado durante os períodos N_{per} .

D. Procedimento analítico para determinar o ângulo de roll

Os métodos analíticos aproximados para a solução da equação do roll foram amplamente utilizados no passado (por exemplo, Sanchez & Nayfeh, (1990); Oh, et al., 2000; Bulian, (2004); Spyrou, (2005)) e provaram ser bastante eficientes para modelos relativamente simples. A descrição do amortecimento é feita por uma aproximação cúbica ou quadrática, com os coeficientes sendo encontrados através de um teste de decaimento ou pelo método do Ikeda e a restauração pode ser aproximada por:

$$f(\phi, t) = \phi + l_3\phi^3 + l_5\phi^5 + \frac{1}{GM_c}(GM(H_i, \lambda_i) - GM_c + \delta GM \cos(\omega_e t)) \cdot \phi \cdot \left(1 - \left(\frac{\phi}{\pi}\right)^2\right) \quad (126)$$

Sendo l_3 e l_5 coeficientes polinomiais para a curva GZ em águas calmas. Uma solução aproximada baseada no primeiro harmônico pode ser encontrada usando um método conhecido como "média" ou "equilíbrio harmônico", como a seguir:

$$\phi = \phi_a \cos(\omega t - \varepsilon); \quad \omega = \omega_e/2 \quad (127)$$

Substituindo (127) na equação de roll (126) a seguinte equação algébrica pode ser obtida para derivar a amplitude do estado estacionário ϕ_a , da solução periódica;

$$\begin{aligned} \pi^4 \omega^2 \left(\frac{3\phi_a^2 \omega^2 \delta_3 + 8\delta}{2\pi^2 - \phi_a^2} \right)^2 & \quad (130) \\ + \frac{1}{16} \left(\frac{6\phi_a^2 \omega^2 - 8\pi^2 \omega_c^2}{\pi^2 - \phi_a^2} \frac{GM_m - GM}{GM} \right. \\ & \left. - \pi^2 \frac{5\phi_a^4 l_5 \omega_c^2 + 6\phi_a^2 l_3 \omega_c^2 + 8(\omega_c^2 - \omega^2)}{\pi^2 - \phi_a^2} \right)^2 \\ = \omega_\phi^4 \left(\frac{\delta GM}{GM} \right)^2 \end{aligned}$$

Pode ser demonstrado que a equação (130) fornece uma solução linear se:

$$l_3 = l_5 = GM_m = 0; \quad \omega = \omega_0 \quad (128)$$

Substituindo a equação (128) na (130):

$$\left(\frac{8\pi^2 \delta_E}{(2\pi^2 - \phi_a^2) \omega_0} \right) = \frac{GM_a}{GM} \quad (129)$$

Sendo δ_E um coeficiente equivalente de amortecimento linear. Essa equação é consistente com a encontrada no Apêndice B. Isso pode ser mostrado ao fazer a amplitude ϕ_a bem pequena. Assim, o coeficiente

equivalente de amortecimento linear, δ_E , torna-se o coeficiente de amortecimento linear, δ , e com o quadrado da amplitude de roll sendo pequeno relativo a $2\pi^2$ a equação (129) se torna a equação (100). Portanto, os dois níveis são condizentes.

E. Período Natural de roll

O cálculo do período natural é fornecido no SDC 4/5/1 no anexo 2 e no anexo 5 (IMO, 2016). Para o cálculo do período natural 3 métodos são definidos:

1. O primeiro método, que utiliza somente as características principais do casco, é usada no regulamento atual da IMO, *IMO Weather Criterion*, como previsto no parágrafo 2.3.4 da parte A (IMO, 2008) e explicado abaixo:

$$T = \frac{2 * C * B}{\sqrt{GM}} \text{ (s)} \quad (131)$$

Sendo:

$$C = 0,373 + 0,023(B/d) - 0,043(L_{wl}/100) \quad (132)$$

2. O segundo método, usando a distribuição de massa do container, foi recentemente proposta para porta-contentores:

$$T = 2\pi\sqrt{I_{xx}/(mgGM)} \quad (133)$$

Sendo:

$$I_{xx} = 1,1 m_1(B/3)^2 + 1,1m_1l^2 + 1,1 \sum \{m_i[y_i^2 + (z_i - z_T)^2] + (b_i^2 + h_i^2)m_i/12\} \quad (134)$$

O parâmetro l é a distância do centro de massa do navio até o centro de massa do navio sem os containers no convés, o m_i é a massa de cada container carregado no navio, o y_i é a coordenada transversal do centro de massa de cada container e z_i a coordenada vertical, o z_T é a altura vertical do centro de gravidade do navio e o m_1 a massa do navio sem container no convés

3. O terceiro método é para navios de passageiro e de carga geral. Esse método foi originalmente usado para critérios ambientais desde 1950, pode ser usado alternativamente para o período natural de roll:

$$I_{xx} = mK^2 \quad (135)$$

Onde:

$$\left(\frac{K}{B}\right)^2 = 0,125 \left[C_u \cdot C_b + 1,10 C_u(1 - C_b) \left(\frac{H_s}{d} - 2,20\right) + \left(\frac{H_s}{B}\right)^2 \right] \quad (136)$$

$$C_u = \frac{A_u}{L_u B} = \text{coeficiente da área do convés superior} \quad (137)$$

A_u = Área projetada do convés superior (m^2)

L_u = comprimento total do convés superior (m)

$$H_s = D + \left(\frac{A'}{L_{pp}} \right) \quad (138)$$

$D =$ Pontal moldado (m);

$L_{pp} =$ Comprimento entre perpendiculares (m)

$$A' = A + A_c \quad (139)$$

$A =$ Área lateral projetada ddo do castelo de proa (forecastle) e da casaria do convés (deck house) (m²)

$A_c =$ Área do convés de carga (deck cargo) (m²)

Em alternativa, o período natural de roll pode ser definido para qualquer navio utilizando métodos de avaliação direta (*direct assessment methods*) para o modo de falha de aceleração excessiva ou a partir de ensaios de modelo realizados de acordo com o MSC.1 / Circ.1200 ou procedimentos de ensaio alternativos aprovados pela Administração.

F. Método para determinar o caso de onda

A seleção dos casos de ondas que será utilizada no critério de vulnerabilidade para o primeiro nível de Roll Paramétrico e Perda Pura de estabilidade deverá ser feita seguindo o seguinte procedimento:

- 1) Selecionar o wave scatter que será utilizado (recomendação IMO: IACS No. 34)
- 2) Input wave scatter (estatística de ocorrências de estado de mar): $f(j = H_{1/3}, i = T_z) = N_{ij}$
- 3) Calcular tabela de probabilidades de estados de mar:

$$P(i,j) = N_{ij}/N \quad (140)$$

N = Número de ocorrências totais

- 4) Calcular as probabilidades de ocorrência de cada $T_z(i)$:

$$W_i(T_z) = \sum_{i=1}^{NH} p(i,j) \quad (141)$$

NH: número de linhas do wave scatter (alturas significativas registradas).

- 5) Obter o período médio, que assumindo o espectro de mar de Bretschneider é dado por:

$$T_{mean}(i) = 1.00864 \cdot T_z(i) \quad (142)$$

$$T_{mean}(i) = 1.00864 \cdot T_z(i)$$

- 6) Calcular a altura de onda referênte ao período médio:

$$\lambda_i(i) = \frac{g \cdot T_{mean}(i)^2}{2\pi} \quad (143)$$

- 7) Calcular tabela de ponderação de alturas significativas de todas as ondas do wave scatter

$$g(i,j) = H_{1/3}(i) * p(i,j) \quad (144)$$

- 8) Para cada $T_z(i)$, calcular a ponderação de alturas significativas:

$$G(T_z(i)) = \sum_{i=1}^{NH} g(i,j) \quad (145)$$

- 9) Calcular a altura de referência para cada $T_z(i)$:

$$H_{1/3,ref,i}(T_z) = \frac{G_i(T_z)}{W_i(T_z)} \quad (146)$$

Para Roll Paramétrico:

10) Considerar

$$k_{PR} = 0,7 \quad (147)$$

11) Calcular a declividade para cada caso de onda:

$$S_{w,i} = k_{PR} \cdot \frac{H_{1/3,ref,i}}{\lambda_i} \quad (148)$$

12) Os casos de ondas considerados na verificação 1 do nível 2 do Roll Paramétrico será dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Comprimento de onda: } \lambda_i \quad (\text{dada no passo 6}) \\ \text{Altura de onda: } H_i = k_{PR} H_{1/3,ref,i} \quad (H_{1/3,ref,i} \text{ dado no passo 9}) \\ \text{Fator de peso: } W_i \quad (\text{dado no passo 4}) \\ \text{com: } k_{PR} = 0,7 \end{array} \right. \quad (149)$$

13) A declividade a ser usada no nível 1 do Roll Paramétrico será dada por :

$$S_w = \max \left(k_{PR} \cdot \frac{H_{1/3,ref,i}}{\lambda_i} \right) \quad i = 1, \dots, N \quad (150)$$

Para Perda Pura de estabilidade :

14) Considerar

$$k_{PL} = 1,4 \quad (151)$$

15) Calcular a declividade para cada caso de onda:

$$S_{w,i} = k_{PL} \cdot \frac{H_{1/3,ref,i}}{\lambda_i} \quad (152)$$

16) Os casos de ondas para Perda Pura de Estabilidade é dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Comprimento de onda: } \lambda_i \text{ (dada no passo 6)} \\ \text{Altura de onda: } H_i = k_{PL} H_{1/3,ref,i} \text{ (} H_{1/3,ref,i} \text{ dado no passo 9)} \\ \text{Fator de peso: } W_i \text{ (dado no passo 4)} \\ \text{com: } k_{PL} = 1,4 \end{array} \right. \quad (153)$$

17) A declividade a ser usada no nível 1 do Perda Pura de Estabilidade será dada por :

$$S_w = \max \left(k_{PL} \cdot \frac{H_{1/3,ref,i}}{\lambda_i} \right) \quad i = 1, \dots, N \quad (154)$$

A Tabela 61 apresentada o diagrama de dispersão recomendado em N° 34 da IACCS:

Tabela 61- Diagrama de dispersão de ondas fornecido pela recomendação N°34 da IACS

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	13	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3060
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2150.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	656.5	3206.5	5675.0	5059.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3088.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2508.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	190.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4906
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	295.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	95.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9290	15922	24879	20870	12896	6245	2479	837	247	66	16	3	1	10000

G. Algoritmo – Perda pura de estabilidade

Algoritmo primeiro nível:

```
...
Lw = L
Hw = L*Sá
IF Cpv >= 1 THEN
! Método 1
TL
KB
KG
Calcula IL !linha d'água plana no "calado inferior" TL
GMMin =KB+ (IL/Vol) -KG
ELSE

! Método 2
For i=-5, -4...4,5
    Xc(i) = 0.1 * i * Lw
    Calcula GM(i) !navio equilibrado em "sinkage" e trim na onda crítica com a
    crista em Xc(i)
End For
Gumming = Min (GM)
IF (GMMin > RPLA) THEN
    "FIM" (navio não vulnerável)
ELSE
    GOTO Level 2 (navio vulnerável)
```

Algoritmo segundo nível:

```
...
Lwr = L
For rw=1,...,10 !10 ondas regulares de comprimento Lwr, e altura hw
    hw(rw)= rw * 0.01*Lwr
    Calcula Rpl3(rw)
    For i=-5, -4...4,5
        Xc(i) = 0.1 * i * Lw
        Calcular GZ(i) !navio equilibrado em "sinkage" e trim na onda crítica
        com a crista em Xc(i)
        Calcular φv(i) !ângulo de perda de estabilidade (ângulo em que GZ passa
        a ser negativo)
        Calcular φs(i) !ângulo de banda devido à Rpl3
    End For
    φv,min (rw)=mín φv
    φs,max(rw)=máx φs
End For
For n=1,...,N !N ondas de referência obtidas do wave scatter
    Hr(n)
```

$W_r(n)$
 $\phi_{v,minr}(n) = \text{interpolação}(H_r(n), h_w, \phi_{v,min})$
 $\phi_{s,maxr}(n) = \text{interpolação}(H_r(n), h_w, \phi_{s,max})$

IF $\phi_{v,minr}(n) > \phi_{v,minr}(n-1)$ **THEN** ! aplicando a verificação fornecida no item do Explanatory

$\phi_{v,minr}(n) = \phi_{v,minr}(n)$ Notes de PL, parágrafo 3.3 e figura 3.6.

ELSE

$\phi_{v,minr}(n) = \phi_{v,minr}(n-1)$

End IF

IF $\phi_{s,maxr}(n) > \phi_{s,maxr}(n-1)$ **THEN** ! aplicando a verificação fornecida no item do Explanatory

$\phi_{s,maxr}(n) = \phi_{s,maxr}(n)$ Notes de PL, parágrafo 3.3 e figura 3.6.

ELSE

$\phi_{s,maxr}(n) = \phi_{s,maxr}(n-1)$

End IF

IF $H_r(n) > 0.1L$ **THEN** ! Verificação da altura de referência

$H_r(n) = 0.1L$

ELSE

$H_r(n) = H_r(n)$

End IF

!Criterion 1

IF $\phi_{v,minr}(n) < 30^\circ$ **THEN**

$C1w(n) = 1$

ELSE

$C1w(n) = 0$

End IF

!Criterion 2

IF $\phi_{s,max}(n) > R_{pl2}$ **THEN**

$C2w(n) = 1$

ELSE

$C2w(n) = 0$

End IF

End For

$CR1 = \text{soma}(C1w * W_r)$

$CR2 = \text{soma}(C2w * W_r)$

IF $(\text{Max}\{CR1, CR2\} > R_{PLA})$ **THEN**

GOTO Level 2 (navio vulnerável)

ELSE

“FIM” (navio não vulnerável)

H. Algoritmo e fluxogramas – Roll paramétrico

Algoritmo primeiro nível:

...

$L_w = L$

$H_w = L * S_w$

IF $C_{pv} \geq 1$ **THEN**

! Método 1

T_L

T_H

Calcula I_L !linha d'água plana

Calcula I_H !linha d'água plana

$\delta GM = 0.5 * (I_H - I_L) / Vol$

ELSE

! Método 2

For $i = -5, -4 \dots 4, 5$

$X_c(i) = 0.1 * i * L_w$

Calcula $GM(i)$!navio equilibrado em "sinkage" e trim na onda crítica com a crista em $X_c(i)$

End For

$GM_{max} = \text{Max}(GM)$

$GM_{min} = \text{Min}(GM)$

$\delta GM = 0.5 * (GM_{max} - GM_{min})$

IF $(\delta GM / GM_c > R_{PR})$ **THEN**

GOTO Level 2 (navio vulnerável)

ELSE

"FIM" (navio não vulnerável)

Os fluxogramas desse algoritmo são apresentados a seguir:

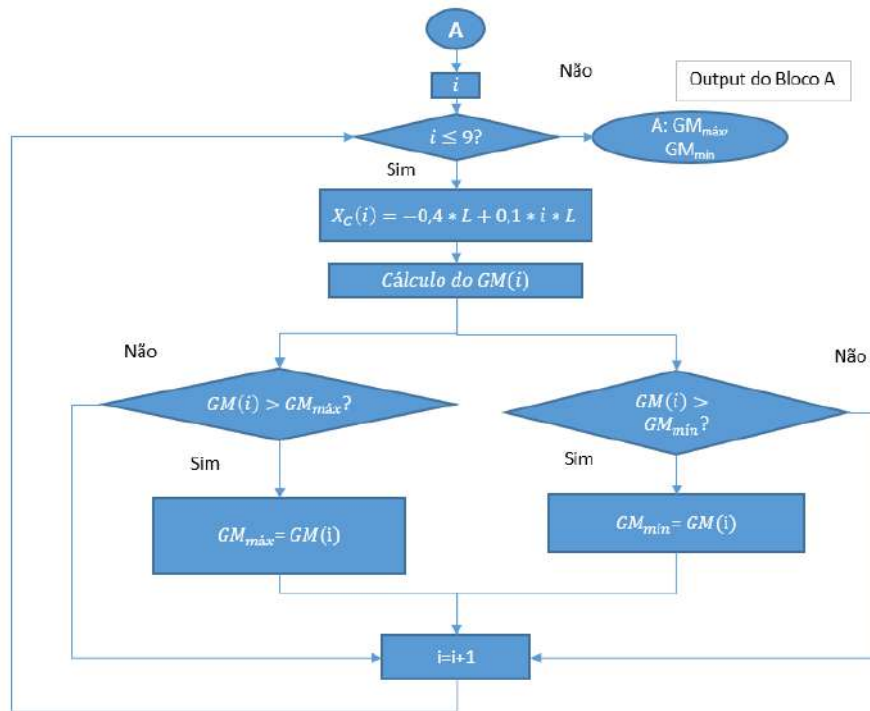


Figura 63- Fluxograma Nível 1 -Roll Paramétrico- A: "Loop"

Algoritmo segundo nível:

PR - Level 2 (verificação 1):

```

...
For i=1...N                                     !N ondas de referência obtidas do wave scatter
  Lwr(i)
  Hwr(i)
  Wr(i)
  For j=-4, -3, ...4,5
    Xc(j) = 0.1 * j * L
    Calcula GM(j)                                 !navio equilibrado em "sinkage" e trim para cada onda i, com
  End For
  GMmax(i) = Max (GM)
  GMmin(i) = Min (GM)
  GMm(i) = Mean(GM)
  δGM(i)= 0.5*(GMmax(i) – GMmin(i))
  Vpr(i)=|2*Lwr(i)/Tφ*raiz(GMm(i)/GMc) – raiz(g*Lwr(i)/(2π))|
  IF [(GMm (i) < 0) OR (δGM(i)/GMm(i) > Rpro)] AND [Vs > Vpr(i) ] THEN
    C1(i)=1
  ELSE
    C1(i)=0
  END IF

```

Xc variando

End For

C1 = Soma(C1*Wr)

...

PR - Level 2 (verificação 2):

...

Lwr = L

For i=1,2

aproam(i)

For j = 0,..,3

V(j)=k(j)*Vs

For rw=1,..,10 !10 ondas regulares de comprimento Lwr e altura hw

hw(rw)= rw*0.01*Lwr

Calcular $\phi_{\max}(rw)$!resolver eq. de roll

End For

For n=1,..,N !N ondas de referência obtidas do wave scatter

Hr(n)

Wr(n)

$\phi_{\maxr}(n)$ = interpolação (Hr(n),hw, ϕ_{\max})

IF $\phi_{\maxr}(n) > 25^\circ$ **THEN**

C2w(n) = 1

ELSE

C2w(n) = 0

End IF

End For

C2(i,j)=soma(C2w*Wr)

End For

End For

C2h=soma(C2(1,1:3))

C20=(C2(1,0)+C2(2,0))/2

C2f=soma(C2(2,1:3))

C2=(C2h+C20+C2f)/7

Os fluxogramas desse algoritmo são apresentados a seguir:

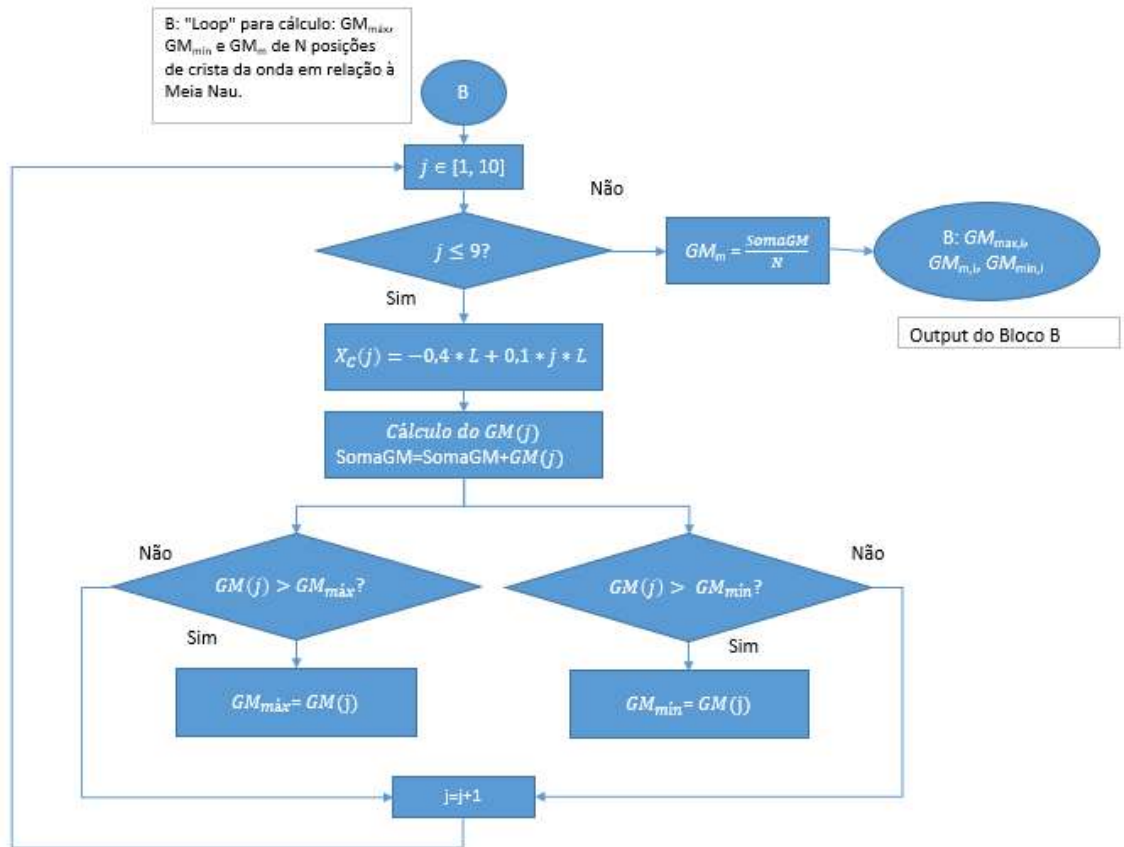


Figura 64- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico- B: "Loop"

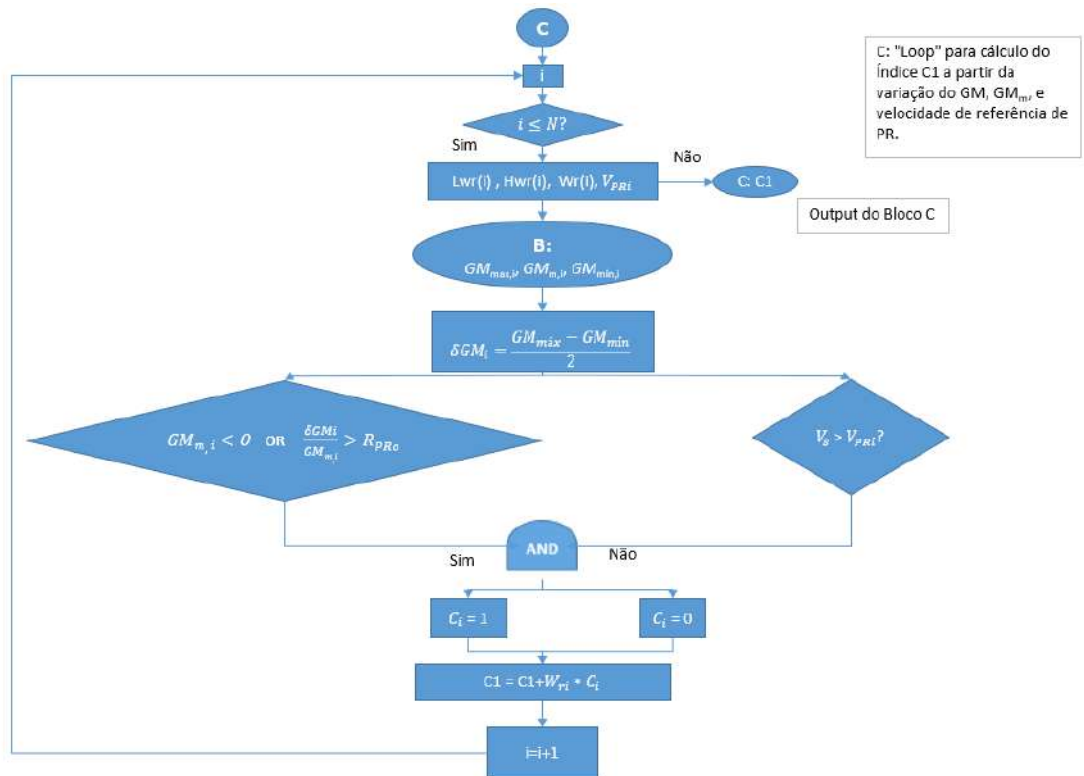


Figura 65- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico- C: "Loop"

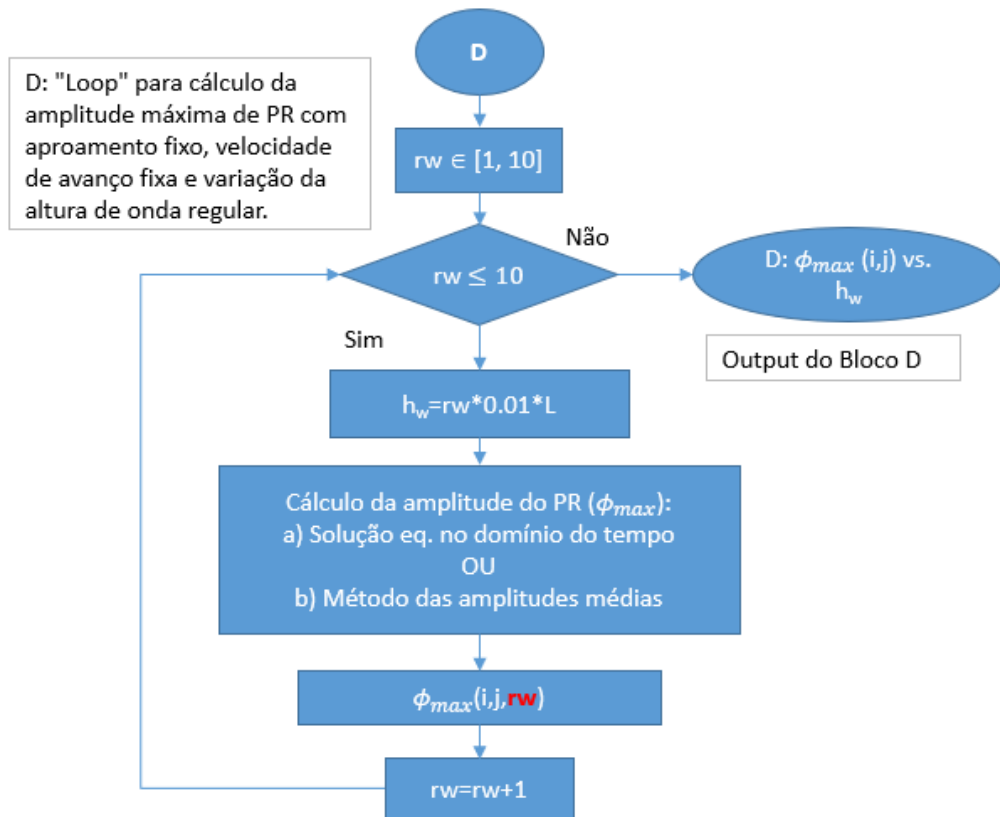


Figura 66- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico- D: "Loop"

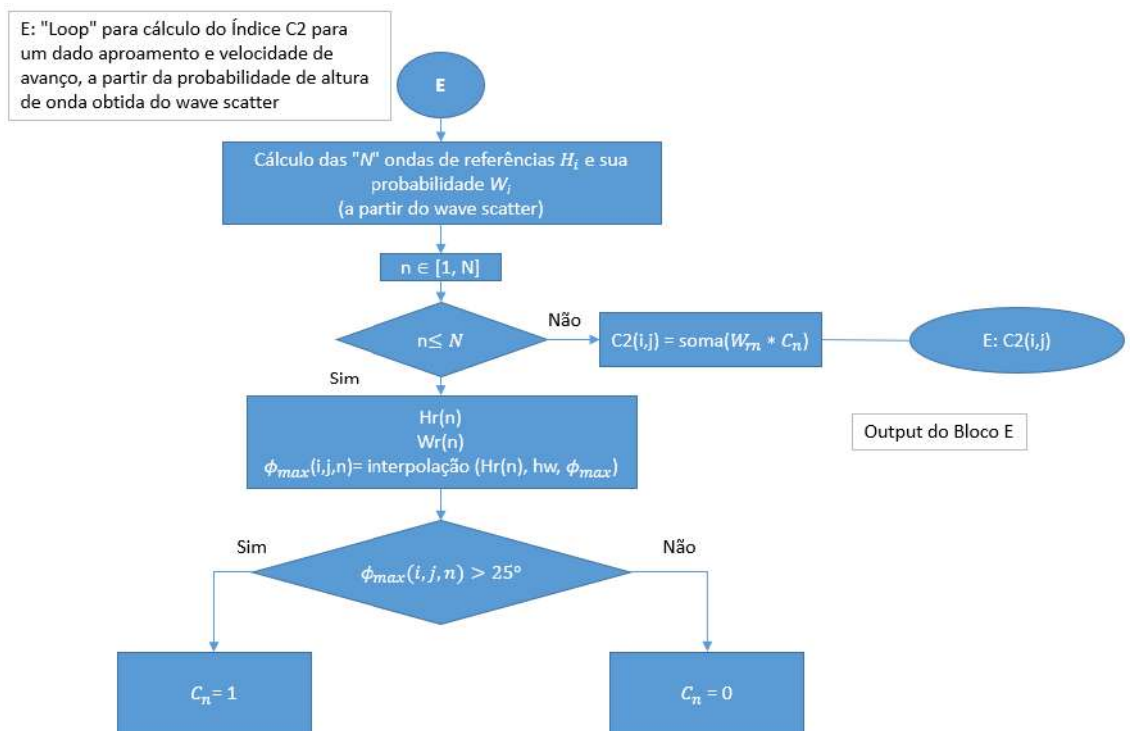


Figura 67- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico- E: "Loop"

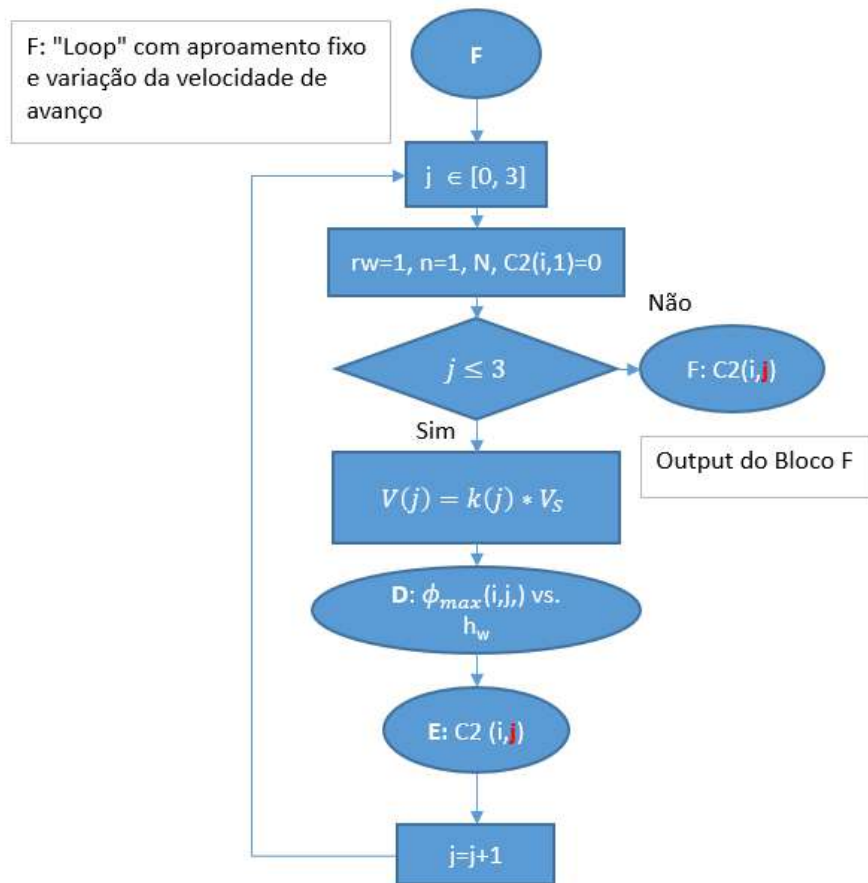


Figura 68- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico- F: "Loop"

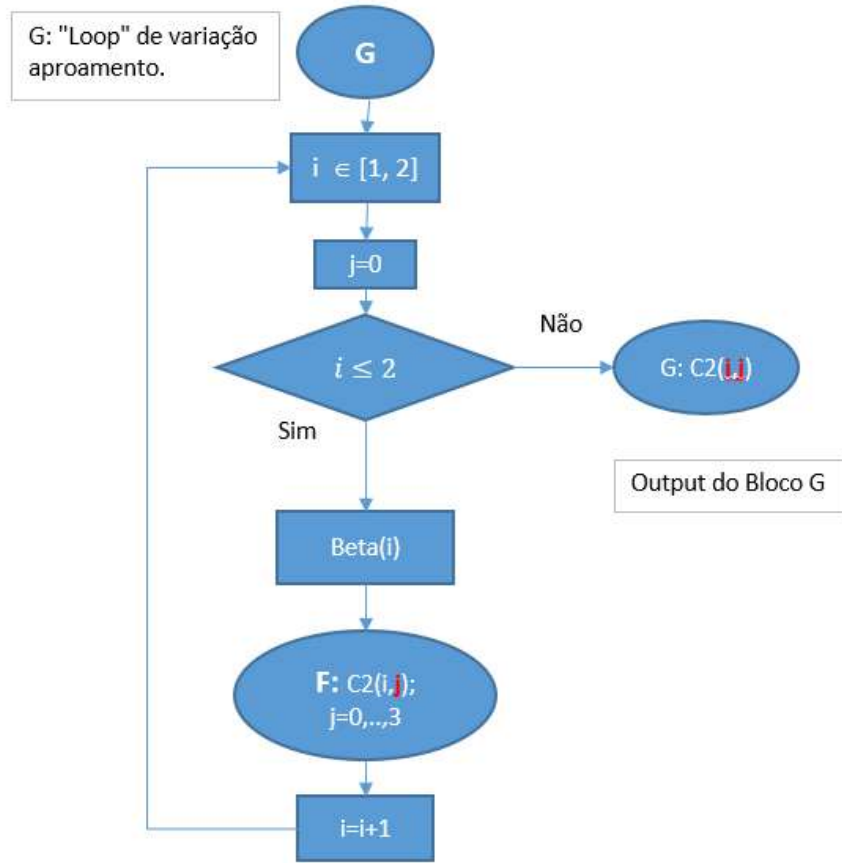


Figura 69- Fluxograma Nível 2 – Roll Paramétrico- G: "Loop"

I. Resultados

Porta-contentor C11

Roll paramétrico

Tabela 62- Ângulos máximos de roll e suas contribuições para C2

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	K=-1		K=-0.866		K=-0.5		K=0	
			Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
3,5	0,5	0,03	5,00	0,000000	5,00	0,000000	5,58	0,000000	5,02	0,000000
4,5	0,5	0,05	5,00	0,000000	5,00	0,000000	6,11	0,000000	5,04	0,000000
4,5	1,5	0,16	5,00	0,000000	5,01	0,000000	8,32	0,000000	5,11	0,000000
4,5	2,5	0,26	5,00	0,000000	5,02	0,000000	10,53	0,000000	5,19	0,000000
4,5	3,5	0,37	5,01	0,000000	5,03	0,000000	12,75	0,000000	5,26	0,000000
5,5	0,5	0,10	5,00	0,000000	5,01	0,000000	7,11	0,000000	5,07	0,000000
5,5	1,5	0,30	5,01	0,000000	5,03	0,000000	11,32	0,000000	5,21	0,000000
5,5	2,5	0,50	5,01	0,000000	5,05	0,000000	15,53	0,000000	5,36	0,000000
5,5	3,5	0,70	5,01	0,000000	5,07	0,000000	19,74	0,000000	5,50	0,000000
5,5	4,5	0,90	5,02	0,000000	5,08	0,000000	23,96	0,000000	5,64	0,000000
5,5	5,5	1,11	5,02	0,000000	5,10	0,000000	28,17	0,000010	5,78	0,000000
5,5	6,5	1,31	5,05	0,000000	5,14	0,000000	31,27	0,000002	5,95	0,000000
6,5	0,5	0,19	5,00	0,000000	5,02	0,000000	9,03	0,000000	5,14	0,000000
6,5	1,5	0,58	5,01	0,000000	5,05	0,000000	17,09	0,000000	5,41	0,000000
6,5	2,5	0,96	5,02	0,000000	5,09	0,000000	25,14	0,021588	5,68	0,000000
6,5	3,5	1,35	5,06	0,000000	5,15	0,000000	31,71	0,006955	5,98	0,000000
6,5	4,5	1,73	5,14	0,000000	5,26	0,000000	35,99	0,001961	6,33	0,000000
6,5	5,5	2,11	5,23	0,000000	5,37	0,000000	40,28	0,000510	6,68	0,000000
6,5	6,5	2,50	5,32	0,000000	5,53	0,000000	43,88	0,000126	7,03	0,000000
6,5	7,5	2,88	5,42	0,000000	5,81	0,000000	45,80	0,000030	7,38	0,000000
6,5	8,5	3,27	5,53	0,000000	6,09	0,000000	47,73	0,000007	7,74	0,000000
6,5	9,5	3,65	5,65	0,000000	6,48	0,000000	49,52	0,000002	8,09	0,000000
7,5	0,5	0,28	5,01	0,000000	5,03	0,000000	10,88	0,000000	5,20	0,000000
7,5	1,5	0,84	5,02	0,000000	5,08	0,000000	22,65	0,000000	5,60	0,000000
7,5	2,5	1,40	5,07	0,000000	5,17	0,000000	32,35	0,062300	6,04	0,000000
7,5	3,5	1,97	5,19	0,000000	5,33	0,000000	38,62	0,032265	6,54	0,000000
7,5	4,5	2,53	5,32	0,000000	5,55	0,000000	44,02	0,013543	7,05	0,000000
7,5	5,5	3,09	5,48	0,000000	5,96	0,000000	46,83	0,004984	7,57	0,000000
7,5	6,5	3,65	5,65	0,000000	6,47	0,000000	49,51	0,001670	8,09	0,000000
7,5	7,5	4,21	5,91	0,000000	7,72	0,000000	51,28	0,000521	8,63	0,000000
7,5	8,5	4,77	6,18	0,000000	8,97	0,000000	53,06	0,000154	9,17	0,000000
7,5	9,5	5,33	6,66	0,000000	13,61	0,000000	54,28	0,000043	9,70	0,000000
7,5	10,5	5,90	7,15	0,000000	18,26	0,000000	55,51	0,000012	10,24	0,000000
7,5	11,5	6,46	8,47	0,000000	23,19	0,000000	56,91	0,000003	10,75	0,000000
7,5	12,5	7,02	9,90	0,000000	28,15	0,000001	58,35	0,000001	11,26	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
8,5	0,5	0,34	5,01	0,000000	5,03	0,000000	12,06	0,000000	5,24	0,000000
8,5	1,5	1,01	5,02	0,000000	5,09	0,000000	26,17	0,055697	5,72	0,000000
8,5	2,5	1,68	5,13	0,000000	5,25	0,000000	35,48	0,074495	6,29	0,000000
8,5	3,5	2,36	5,28	0,000000	5,44	0,000000	42,99	0,056750	6,90	0,000000
8,5	4,5	3,03	5,46	0,000000	5,92	0,000000	46,54	0,032885	7,52	0,000000
8,5	5,5	3,71	5,67	0,000000	6,59	0,000000	49,68	0,016029	8,14	0,000000
8,5	6,5	4,38	5,99	0,000000	8,09	0,000000	51,81	0,006903	8,79	0,000000
8,5	7,5	5,05	6,42	0,000000	11,28	0,000000	53,67	0,002701	9,43	0,000000
8,5	8,5	5,73	7,00	0,000000	16,85	0,000000	55,14	0,000979	10,08	0,000000
8,5	9,5	6,40	8,32	0,000000	22,67	0,000000	56,77	0,000332	10,70	0,000000
8,5	10,5	7,07	10,04	0,000000	28,63	0,000107	58,49	0,000107	11,31	0,000000
8,5	11,5	7,75	15,02	0,000000	32,87	0,000033	59,21	0,000033	11,90	0,000000
8,5	12,5	8,42	20,42	0,000000	36,71	0,000010	60,01	0,000010	12,48	0,000000
8,5	13,5	9,09	25,27	0,000003	39,20	0,000003	62,92	0,000003	13,05	0,000000
8,5	14,5	9,77	29,53	0,000001	41,42	0,000001	64,53	0,000001	13,56	0,000000
9,5	0,5	0,36	5,01	0,000000	5,03	0,000000	12,56	0,000000	5,26	0,000000
9,5	1,5	1,08	5,02	0,000000	5,10	0,000000	27,67	0,023757	5,77	0,000000
9,5	2,5	1,80	5,16	0,000000	5,29	0,000000	36,81	0,048604	6,40	0,000000
9,5	3,5	2,52	5,32	0,000000	5,55	0,000000	44,01	0,050991	7,05	0,000000
9,5	4,5	3,25	5,52	0,000000	6,07	0,000000	47,61	0,038575	7,72	0,000000
9,5	5,5	3,97	5,80	0,000000	7,18	0,000000	50,51	0,023727	8,40	0,000000
9,5	6,5	4,69	6,14	0,000000	8,78	0,000000	52,79	0,012579	9,09	0,000000
9,5	7,5	5,41	6,73	0,000000	14,24	0,000000	54,45	0,005944	9,78	0,000000
9,5	8,5	6,13	7,63	0,000000	20,30	0,000000	56,08	0,002559	10,46	0,000000
9,5	9,5	6,85	9,48	0,000000	26,68	0,001019	57,92	0,001019	11,11	0,000000
9,5	10,5	7,57	13,62	0,000000	31,85	0,000379	59,06	0,000379	11,75	0,000000
9,5	11,5	8,30	19,46	0,000000	36,12	0,000133	59,67	0,000133	12,38	0,000000
9,5	12,5	9,02	24,71	0,000000	38,91	0,000044	62,59	0,000044	12,98	0,000000
9,5	13,5	9,74	29,40	0,000014	41,35	0,000014	64,58	0,000014	13,54	0,000000
9,5	14,5	10,46	32,63	0,000004	43,15	0,000004	63,39	0,000004	13,98	0,000000
9,5	15,5	11,18	35,44	0,000001	45,01	0,000001	63,96	0,000001	14,30	0,000000
10,5	0,5	0,36	5,01	0,000000	5,03	0,000000	12,58	0,000000	5,26	0,000000
10,5	1,5	1,09	5,02	0,000000	5,10	0,000000	27,73	0,007035	5,77	0,000000
10,5	2,5	1,81	5,16	0,000000	5,29	0,000000	36,86	0,020660	6,40	0,000000
10,5	3,5	2,53	5,32	0,000000	5,56	0,000000	44,04	0,028380	7,06	0,000000
10,5	4,5	3,26	5,52	0,000000	6,08	0,000000	47,66	0,026855	7,72	0,000000
10,5	5,5	3,98	5,80	0,000000	7,20	0,000000	50,55	0,020083	8,41	0,000000
10,5	6,5	4,70	6,14	0,000000	8,81	0,000000	52,84	0,012686	9,10	0,000000
10,5	7,5	5,43	6,74	0,000000	14,36	0,000000	54,48	0,007032	9,79	0,000000
10,5	8,5	6,15	7,68	0,000000	20,45	0,000000	56,12	0,003506	10,47	0,000000
10,5	9,5	6,87	9,53	0,000000	26,85	0,001599	57,97	0,001599	11,13	0,000000
10,5	10,5	7,60	13,79	0,000000	31,98	0,000675	59,08	0,000675	11,77	0,000000
10,5	11,5	8,32	19,65	0,000000	36,25	0,000266	59,69	0,000266	12,40	0,000000
10,5	12,5	9,04	24,90	0,000000	39,00	0,000099	62,70	0,000099	13,00	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
10,5	13,5	9,77	29,52	0,000035	41,41	0,000035	64,53	0,000035	13,56	0,000000
10,5	14,5	10,49	32,76	0,000012	43,22	0,000012	63,34	0,000012	14,00	0,000000
10,5	15,5	11,21	35,55	0,000004	45,09	0,000004	64,03	0,000004	14,31	0,000000
10,5	16,5	11,94	38,10	0,000001	47,00	0,000001	65,74	0,000001	14,56	0,000000
11,5	0,5	0,35	5,01	0,000000	5,03	0,000000	12,31	0,000000	5,25	0,000000
11,5	1,5	1,05	5,02	0,000000	5,10	0,000000	26,93	0,001607	5,74	0,000000
11,5	2,5	1,74	5,14	0,000000	5,27	0,000000	36,15	0,006445	6,34	0,000000
11,5	3,5	2,44	5,30	0,000000	5,49	0,000000	43,60	0,011141	6,98	0,000000
11,5	4,5	3,14	5,49	0,000000	6,00	0,000000	47,09	0,012752	7,62	0,000000
11,5	5,5	3,84	5,74	0,000000	6,89	0,000000	50,10	0,011260	8,27	0,000000
11,5	6,5	4,54	6,06	0,000000	8,44	0,000000	52,31	0,008259	8,94	0,000000
11,5	7,5	5,23	6,58	0,000000	12,78	0,000000	54,07	0,005249	9,61	0,000000
11,5	8,5	5,93	7,18	0,000000	18,56	0,000000	55,58	0,002969	10,27	0,000000
11,5	9,5	6,63	8,91	0,000000	24,71	0,000000	57,35	0,001522	10,91	0,000000
11,5	10,5	7,33	11,62	0,000000	30,39	0,000717	58,85	0,000717	11,53	0,000000
11,5	11,5	8,03	17,28	0,000000	34,52	0,000314	59,44	0,000314	12,14	0,000000
11,5	12,5	8,72	22,60	0,000000	37,83	0,000128	61,32	0,000128	12,74	0,000000
11,5	13,5	9,42	27,63	0,000050	40,40	0,000050	64,34	0,000050	13,32	0,000000
11,5	14,5	10,12	31,11	0,000018	42,30	0,000018	63,95	0,000018	13,77	0,000000
11,5	15,5	10,82	34,16	0,000006	44,05	0,000006	63,10	0,000006	14,18	0,000000
11,5	16,5	11,51	36,62	0,000002	45,89	0,000002	64,75	0,000002	14,41	0,000000
12,5	0,5	0,33	5,01	0,000000	5,03	0,000000	11,89	0,000000	5,23	0,000000
12,5	1,5	0,99	5,02	0,000000	5,09	0,000000	25,68	0,000305	5,70	0,000000
12,5	2,5	1,65	5,12	0,000000	5,24	0,000000	35,04	0,001602	6,25	0,000000
12,5	3,5	2,30	5,27	0,000000	5,43	0,000000	42,38	0,003377	6,85	0,000000
12,5	4,5	2,96	5,44	0,000000	5,87	0,000000	46,19	0,004551	7,45	0,000000
12,5	5,5	3,62	5,63	0,000000	6,40	0,000000	49,41	0,004636	8,06	0,000000
12,5	6,5	4,28	5,94	0,000000	7,87	0,000000	51,49	0,003868	8,69	0,000000
12,5	7,5	4,94	6,32	0,000000	10,31	0,000000	53,42	0,002767	9,32	0,000000
12,5	8,5	5,59	6,89	0,000000	15,75	0,000000	54,85	0,001746	9,95	0,000000
12,5	9,5	6,25	7,94	0,000000	21,36	0,000000	56,39	0,000992	10,56	0,000000
12,5	10,5	6,91	9,62	0,000000	27,18	0,000515	58,07	0,000515	11,16	0,000000
12,5	11,5	7,57	13,56	0,000000	31,81	0,000247	59,06	0,000247	11,74	0,000000
12,5	12,5	8,23	18,89	0,000000	35,70	0,000110	59,61	0,000110	12,32	0,000000
12,5	13,5	8,88	23,75	0,000000	38,42	0,000046	62,01	0,000046	12,87	0,000000
12,5	14,5	9,54	28,50	0,000018	40,85	0,000018	64,86	0,000018	13,42	0,000000
12,5	15,5	10,20	31,46	0,000007	42,50	0,000007	63,82	0,000007	13,82	0,000000
12,5	16,5	10,86	34,30	0,000002	44,16	0,000002	63,19	0,000002	14,19	0,000000
13,5	1,5	0,92	5,02	0,000000	5,09	0,000000	24,24	0,000000	5,65	0,000000
13,5	2,5	1,53	5,10	0,000000	5,21	0,000000	33,76	0,000337	6,15	0,000000
13,5	3,5	2,14	5,23	0,000000	5,38	0,000000	40,59	0,000843	6,70	0,000000
13,5	4,5	2,75	5,39	0,000000	5,72	0,000000	45,15	0,001309	7,26	0,000000
13,5	5,5	3,37	5,56	0,000000	6,16	0,000000	48,21	0,001509	7,83	0,000000
13,5	6,5	3,98	5,80	0,000000	7,20	0,000000	50,55	0,001408	8,41	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
13,5	7,5	4,59	6,09	0,000000	8,56	0,000000	52,48	0,001117	8,99	0,000000
13,5	8,5	5,20	6,55	0,000000	12,52	0,000000	54,00	0,000776	9,58	0,000000
13,5	9,5	5,81	7,08	0,000000	17,58	0,000000	55,33	0,000483	10,16	0,000000
13,5	10,5	6,43	8,39	0,000000	22,91	0,000000	56,83	0,000273	10,72	0,000000
13,5	11,5	7,04	9,95	0,000000	28,32	0,000142	58,40	0,000142	11,28	0,000000
13,5	12,5	7,65	14,24	0,000000	32,30	0,000068	59,13	0,000068	11,81	0,000000
13,5	13,5	8,26	19,20	0,000000	35,92	0,000031	59,64	0,000031	12,35	0,000000
13,5	14,5	8,87	23,69	0,000000	38,39	0,000013	61,97	0,000013	12,86	0,000000
13,5	15,5	9,49	28,10	0,000005	40,64	0,000005	64,62	0,000005	13,37	0,000000
13,5	16,5	10,10	31,01	0,000002	42,25	0,000002	63,98	0,000002	13,76	0,000000
14,5	1,5	0,85	5,02	0,000000	5,08	0,000000	22,75	0,000000	5,60	0,000000
14,5	2,5	1,41	5,07	0,000000	5,17	0,000000	32,45	0,000063	6,04	0,000000
14,5	3,5	1,98	5,19	0,000000	5,33	0,000000	38,74	0,000182	6,55	0,000000
14,5	4,5	2,54	5,33	0,000000	5,56	0,000000	44,09	0,000319	7,07	0,000000
14,5	5,5	3,11	5,48	0,000000	5,97	0,000000	46,92	0,000410	7,59	0,000000
14,5	6,5	3,67	5,66	0,000000	6,52	0,000000	49,57	0,000422	8,11	0,000000
14,5	7,5	4,24	5,92	0,000000	7,78	0,000000	51,36	0,000367	8,65	0,000000
14,5	8,5	4,80	6,20	0,000000	9,20	0,000000	53,12	0,000277	9,19	0,000000
14,5	9,5	5,37	6,69	0,000000	13,87	0,000000	54,35	0,000187	9,73	0,000000
14,5	10,5	5,93	7,18	0,000000	18,55	0,000000	55,58	0,000114	10,27	0,000000
14,5	11,5	6,50	8,56	0,000000	23,52	0,000000	57,01	0,000064	10,78	0,000000
14,5	12,5	7,06	10,01	0,000000	28,52	0,000033	58,46	0,000033	11,30	0,000000
14,5	13,5	7,63	14,03	0,000000	32,15	0,000016	59,10	0,000016	11,79	0,000000
14,5	14,5	8,19	18,61	0,000000	35,50	0,000007	59,58	0,000007	12,28	0,000000
14,5	15,5	8,75	22,83	0,000000	37,95	0,000003	61,45	0,000003	12,76	0,000000
14,5	16,5	9,32	26,90	0,000001	40,03	0,000001	63,90	0,000001	13,23	0,000000
15,5	1,5	0,78	5,01	0,000000	5,07	0,000000	21,32	0,000000	5,55	0,000000
15,5	2,5	1,30	5,05	0,000000	5,14	0,000000	31,17	0,000011	5,94	0,000000
15,5	3,5	1,82	5,16	0,000000	5,29	0,000000	36,96	0,000035	6,41	0,000000
15,5	4,5	2,34	5,27	0,000000	5,44	0,000000	42,75	0,000069	6,88	0,000000
15,5	5,5	2,86	5,41	0,000000	5,79	0,000000	45,66	0,000097	7,36	0,000000
15,5	6,5	3,37	5,56	0,000000	6,17	0,000000	48,25	0,000109	7,83	0,000000
15,5	7,5	3,89	5,76	0,000000	7,01	0,000000	50,28	0,000102	8,32	0,000000
15,5	8,5	4,41	6,01	0,000000	8,17	0,000000	51,92	0,000084	8,82	0,000000
15,5	9,5	4,93	6,31	0,000000	10,28	0,000000	53,41	0,000061	9,32	0,000000
15,5	10,5	5,45	6,76	0,000000	14,57	0,000000	54,54	0,000040	9,81	0,000000
15,5	11,5	5,97	7,22	0,000000	18,87	0,000000	55,67	0,000024	10,31	0,000000
15,5	12,5	6,49	8,55	0,000000	23,46	0,000000	56,99	0,000013	10,78	0,000000
15,5	13,5	7,01	9,88	0,000000	28,05	0,000007	58,32	0,000007	11,25	0,000000
15,5	14,5	7,53	13,23	0,000000	31,57	0,000003	59,02	0,000003	11,71	0,000000
15,5	15,5	8,05	17,44	0,000000	34,64	0,000001	59,46	0,000001	12,16	0,000000
15,5	16,5	8,57	21,46	0,000000	37,25	0,000001	60,63	0,000001	12,60	0,000000
16,5	2,5	1,19	5,02	0,000000	5,11	0,000000	29,95	0,000002	5,84	0,000000
16,5	3,5	1,67	5,13	0,000000	5,25	0,000000	35,29	0,000006	6,27	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
16,5	4,5	2,14	5,23	0,000000	5,38	0,000000	40,60	0,000013	6,70	0,000000
16,5	5,5	2,62	5,35	0,000000	5,62	0,000000	44,48	0,000021	7,14	0,000000
16,5	6,5	3,10	5,48	0,000000	5,97	0,000000	46,86	0,000025	7,58	0,000000
16,5	7,5	3,57	5,61	0,000000	6,31	0,000000	49,24	0,000025	8,02	0,000000
16,5	8,5	4,05	5,83	0,000000	7,36	0,000000	50,77	0,000022	8,47	0,000000
16,5	9,5	4,52	6,06	0,000000	8,42	0,000000	52,27	0,000017	8,93	0,000000
16,5	10,5	5,00	6,37	0,000000	10,84	0,000000	53,56	0,000012	9,38	0,000000
16,5	11,5	5,48	6,79	0,000000	14,79	0,000000	54,59	0,000007	9,84	0,000000
16,5	12,5	5,95	7,20	0,000000	18,73	0,000000	55,63	0,000004	10,29	0,000000
16,5	13,5	6,43	8,39	0,000000	22,93	0,000000	56,84	0,000002	10,72	0,000000
16,5	14,5	6,90	9,61	0,000000	27,14	0,000001	58,06	0,000001	11,16	0,000000
16,5	15,5	7,38	12,05	0,000000	30,71	0,000001	58,90	0,000001	11,58	0,000000
17,5	3,5	1,53	5,10	0,000000	5,21	0,000000	33,74	0,000001	6,15	0,000000
17,5	4,5	1,97	5,19	0,000000	5,33	0,000000	38,61	0,000002	6,54	0,000000
17,5	5,5	2,40	5,29	0,000000	5,46	0,000000	43,39	0,000004	6,94	0,000000
17,5	6,5	2,84	5,41	0,000000	5,78	0,000000	45,58	0,000005	7,34	0,000000
17,5	7,5	3,28	5,53	0,000000	6,10	0,000000	47,76	0,000006	7,74	0,000000
17,5	8,5	3,71	5,68	0,000000	6,61	0,000000	49,70	0,000005	8,15	0,000000
17,5	9,5	4,15	5,88	0,000000	7,58	0,000000	51,08	0,000004	8,57	0,000000
17,5	10,5	4,59	6,09	0,000000	8,55	0,000000	52,47	0,000003	8,99	0,000000
17,5	11,5	5,02	6,39	0,000000	11,02	0,000000	53,60	0,000002	9,41	0,000000
17,5	12,5	5,46	6,77	0,000000	14,64	0,000000	54,55	0,000001	9,82	0,000000
17,5	13,5	5,90	7,15	0,000000	18,26	0,000000	55,50	0,000001	10,24	0,000000
18,5	5,5	2,20	5,24	0,000000	5,40	0,000000	41,28	0,000001	6,76	0,000000
18,5	6,5	2,60	5,35	0,000000	5,61	0,000000	44,41	0,000001	7,13	0,000000
18,5	7,5	3,01	5,46	0,000000	5,90	0,000000	46,41	0,000001	7,49	0,000000
18,5	8,5	3,41	5,57	0,000000	6,19	0,000000	48,41	0,000001	7,86	0,000000
18,5	9,5	3,81	5,72	0,000000	6,82	0,000000	50,00	0,000001	8,24	0,000000
18,5	10,5	4,21	5,91	0,000000	7,71	0,000000	51,27	0,000001	8,63	0,000000
18,5	11,5	4,61	6,10	0,000000	8,60	0,000000	52,54	0,000001	9,01	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	K=0.5		K=0.866		K=1	
			Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]
3,5	0,5	0,03	5,01	0,000000	5,01	0,000000	5,01	0,000000
4,5	0,5	0,05	5,01	0,000000	5,01	0,000000	5,01	0,000000
4,5	1,5	0,16	5,03	0,000000	5,04	0,000000	5,04	0,000000
4,5	2,5	0,26	5,06	0,000000	5,07	0,000000	5,07	0,000000
4,5	3,5	0,37	5,08	0,000000	5,10	0,000000	5,10	0,000000
5,5	0,5	0,10	5,02	0,000000	5,03	0,000000	5,03	0,000000
5,5	1,5	0,30	5,06	0,000000	5,09	0,000000	5,08	0,000000
5,5	2,5	0,50	5,11	0,000000	5,14	0,000000	5,13	0,000000
5,5	3,5	0,70	5,15	0,000000	5,20	0,000000	5,19	0,000000
5,5	4,5	0,90	5,19	0,000000	5,26	0,000000	5,24	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
5,5	5,5	1,11	5,23	0,000000	5,31	0,000000	5,30	0,000000
5,5	6,5	1,31	5,29	0,000000	5,38	0,000000	5,36	0,000000
6,5	0,5	0,19	5,04	0,000000	5,05	0,000000	5,05	0,000000
6,5	1,5	0,58	5,12	0,000000	5,16	0,000000	5,15	0,000000
6,5	2,5	0,96	5,20	0,000000	5,27	0,000000	5,26	0,000000
6,5	3,5	1,35	5,30	0,000000	5,40	0,000000	5,37	0,000000
6,5	4,5	1,73	5,43	0,000000	5,55	0,000000	5,51	0,000000
6,5	5,5	2,11	5,56	0,000000	5,70	0,000000	5,65	0,000000
6,5	6,5	2,50	5,69	0,000000	5,85	0,000000	5,79	0,000000
6,5	7,5	2,88	5,83	0,000000	6,02	0,000000	5,93	0,000000
6,5	8,5	3,27	5,97	0,000000	6,18	0,000000	6,08	0,000000
6,5	9,5	3,65	6,11	0,000000	6,36	0,000000	6,23	0,000000
7,5	0,5	0,28	5,06	0,000000	5,08	0,000000	5,08	0,000000
7,5	1,5	0,84	5,18	0,000000	5,24	0,000000	5,23	0,000000
7,5	2,5	1,40	5,32	0,000000	5,42	0,000000	5,40	0,000000
7,5	3,5	1,97	5,51	0,000000	5,64	0,000000	5,59	0,000000
7,5	4,5	2,53	5,70	0,000000	5,86	0,000000	5,80	0,000000
7,5	5,5	3,09	5,90	0,000000	6,11	0,000000	6,01	0,000000
7,5	6,5	3,65	6,11	0,000000	6,36	0,000000	6,22	0,000000
7,5	7,5	4,21	6,36	0,000000	6,67	0,000000	6,45	0,000000
7,5	8,5	4,77	6,60	0,000000	6,98	0,000000	6,68	0,000000
7,5	9,5	5,33	6,85	0,000000	7,44	0,000000	6,92	0,000000
7,5	10,5	5,90	7,11	0,000000	7,90	0,000000	7,15	0,000000
7,5	11,5	6,46	7,36	0,000000	8,39	0,000000	7,38	0,000000
7,5	12,5	7,02	7,62	0,000000	8,89	0,000000	7,61	0,000000
8,5	0,5	0,34	5,07	0,000000	5,10	0,000000	5,09	0,000000
8,5	1,5	1,01	5,21	0,000000	5,29	0,000000	5,27	0,000000
8,5	2,5	1,68	5,41	0,000000	5,53	0,000000	5,49	0,000000
8,5	3,5	2,36	5,64	0,000000	5,79	0,000000	5,73	0,000000
8,5	4,5	3,03	5,88	0,000000	6,08	0,000000	5,99	0,000000
8,5	5,5	3,71	6,14	0,000000	6,39	0,000000	6,25	0,000000
8,5	6,5	4,38	6,43	0,000000	6,76	0,000000	6,52	0,000000
8,5	7,5	5,05	6,73	0,000000	7,21	0,000000	6,80	0,000000
8,5	8,5	5,73	7,03	0,000000	7,76	0,000000	7,08	0,000000
8,5	9,5	6,40	7,34	0,000000	8,34	0,000000	7,35	0,000000
8,5	10,5	7,07	7,64	0,000000	8,94	0,000000	7,63	0,000000
8,5	11,5	7,75	7,96	0,000000	9,55	0,000000	7,90	0,000000
8,5	12,5	8,42	8,27	0,000000	10,16	0,000000	8,17	0,000000
8,5	13,5	9,09	8,59	0,000000	10,73	0,000000	8,43	0,000000
8,5	14,5	9,77	8,92	0,000000	11,27	0,000000	8,69	0,000000
9,5	0,5	0,36	5,08	0,000000	5,10	0,000000	5,10	0,000000
9,5	1,5	1,08	5,23	0,000000	5,31	0,000000	5,29	0,000000
9,5	2,5	1,80	5,45	0,000000	5,58	0,000000	5,54	0,000000
9,5	3,5	2,52	5,70	0,000000	5,86	0,000000	5,80	0,000000
9,5	4,5	3,25	5,96	0,000000	6,17	0,000000	6,07	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
9,5	5,5	3,97	6,25	0,000000	6,53	0,000000	6,35	0,000000
9,5	6,5	4,69	6,56	0,000000	6,93	0,000000	6,65	0,000000
9,5	7,5	5,41	6,89	0,000000	7,50	0,000000	6,95	0,000000
9,5	8,5	6,13	7,21	0,000000	8,10	0,000000	7,24	0,000000
9,5	9,5	6,85	7,54	0,000000	8,74	0,000000	7,54	0,000000
9,5	10,5	7,57	7,88	0,000000	9,39	0,000000	7,83	0,000000
9,5	11,5	8,30	8,21	0,000000	10,05	0,000000	8,12	0,000000
9,5	12,5	9,02	8,56	0,000000	10,66	0,000000	8,40	0,000000
9,5	13,5	9,74	8,90	0,000000	11,25	0,000000	8,68	0,000000
9,5	14,5	10,46	9,25	0,000000	11,77	0,000000	8,95	0,000000
9,5	15,5	11,18	9,60	0,000000	12,20	0,000000	9,19	0,000000
10,5	0,5	0,36	5,08	0,000000	5,10	0,000000	5,10	0,000000
10,5	1,5	1,09	5,23	0,000000	5,31	0,000000	5,29	0,000000
10,5	2,5	1,81	5,45	0,000000	5,58	0,000000	5,54	0,000000
10,5	3,5	2,53	5,70	0,000000	5,86	0,000000	5,80	0,000000
10,5	4,5	3,26	5,96	0,000000	6,18	0,000000	6,07	0,000000
10,5	5,5	3,98	6,26	0,000000	6,54	0,000000	6,36	0,000000
10,5	6,5	4,70	6,57	0,000000	6,94	0,000000	6,65	0,000000
10,5	7,5	5,43	6,89	0,000000	7,51	0,000000	6,95	0,000000
10,5	8,5	6,15	7,22	0,000000	8,12	0,000000	7,25	0,000000
10,5	9,5	6,87	7,55	0,000000	8,76	0,000000	7,55	0,000000
10,5	10,5	7,60	7,89	0,000000	9,41	0,000000	7,84	0,000000
10,5	11,5	8,32	8,22	0,000000	10,07	0,000000	8,13	0,000000
10,5	12,5	9,04	8,57	0,000000	10,68	0,000000	8,41	0,000000
10,5	13,5	9,77	8,91	0,000000	11,27	0,000000	8,69	0,000000
10,5	14,5	10,49	9,27	0,000000	11,79	0,000000	8,96	0,000000
10,5	15,5	11,21	9,62	0,000000	12,21	0,000000	9,20	0,000000
10,5	16,5	11,94	9,97	0,000000	12,59	0,000000	9,44	0,000000
11,5	0,5	0,35	5,07	0,000000	5,10	0,000000	5,09	0,000000
11,5	1,5	1,05	5,22	0,000000	5,30	0,000000	5,28	0,000000
11,5	2,5	1,74	5,43	0,000000	5,55	0,000000	5,52	0,000000
11,5	3,5	2,44	5,67	0,000000	5,83	0,000000	5,77	0,000000
11,5	4,5	3,14	5,92	0,000000	6,13	0,000000	6,03	0,000000
11,5	5,5	3,84	6,19	0,000000	6,46	0,000000	6,30	0,000000
11,5	6,5	4,54	6,50	0,000000	6,85	0,000000	6,59	0,000000
11,5	7,5	5,23	6,81	0,000000	7,36	0,000000	6,87	0,000000
11,5	8,5	5,93	7,12	0,000000	7,93	0,000000	7,16	0,000000
11,5	9,5	6,63	7,44	0,000000	8,55	0,000000	7,45	0,000000
11,5	10,5	7,33	7,76	0,000000	9,17	0,000000	7,73	0,000000
11,5	11,5	8,03	8,09	0,000000	9,80	0,000000	8,01	0,000000
11,5	12,5	8,72	8,42	0,000000	10,41	0,000000	8,29	0,000000
11,5	13,5	9,42	8,75	0,000000	11,00	0,000000	8,56	0,000000
11,5	14,5	10,12	9,09	0,000000	11,52	0,000000	8,82	0,000000
11,5	15,5	10,82	9,43	0,000000	12,01	0,000000	9,08	0,000000
11,5	16,5	11,51	9,76	0,000000	12,37	0,000000	9,30	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
12,5	0,5	0,33	5,07	0,000000	5,09	0,000000	5,09	0,000000
12,5	1,5	0,99	5,21	0,000000	5,28	0,000000	5,26	0,000000
12,5	2,5	1,65	5,40	0,000000	5,51	0,000000	5,48	0,000000
12,5	3,5	2,30	5,62	0,000000	5,77	0,000000	5,72	0,000000
12,5	4,5	2,96	5,86	0,000000	6,05	0,000000	5,96	0,000000
12,5	5,5	3,62	6,10	0,000000	6,34	0,000000	6,21	0,000000
12,5	6,5	4,28	6,38	0,000000	6,71	0,000000	6,48	0,000000
12,5	7,5	4,94	6,67	0,000000	7,11	0,000000	6,75	0,000000
12,5	8,5	5,59	6,97	0,000000	7,65	0,000000	7,02	0,000000
12,5	9,5	6,25	7,27	0,000000	8,21	0,000000	7,29	0,000000
12,5	10,5	6,91	7,57	0,000000	8,79	0,000000	7,56	0,000000
12,5	11,5	7,57	7,87	0,000000	9,39	0,000000	7,83	0,000000
12,5	12,5	8,23	8,18	0,000000	9,98	0,000000	8,09	0,000000
12,5	13,5	8,88	8,49	0,000000	10,55	0,000000	8,35	0,000000
12,5	14,5	9,54	8,81	0,000000	11,11	0,000000	8,61	0,000000
12,5	15,5	10,20	9,13	0,000000	11,58	0,000000	8,85	0,000000
12,5	16,5	10,86	9,44	0,000000	12,03	0,000000	9,09	0,000000
13,5	1,5	0,92	5,19	0,000000	5,26	0,000000	5,25	0,000000
13,5	2,5	1,53	5,36	0,000000	5,47	0,000000	5,44	0,000000
13,5	3,5	2,14	5,56	0,000000	5,71	0,000000	5,66	0,000000
13,5	4,5	2,75	5,78	0,000000	5,96	0,000000	5,88	0,000000
13,5	5,5	3,37	6,00	0,000000	6,23	0,000000	6,12	0,000000
13,5	6,5	3,98	6,26	0,000000	6,54	0,000000	6,36	0,000000
13,5	7,5	4,59	6,52	0,000000	6,88	0,000000	6,61	0,000000
13,5	8,5	5,20	6,79	0,000000	7,33	0,000000	6,86	0,000000
13,5	9,5	5,81	7,07	0,000000	7,83	0,000000	7,11	0,000000
13,5	10,5	6,43	7,35	0,000000	8,37	0,000000	7,36	0,000000
13,5	11,5	7,04	7,63	0,000000	8,91	0,000000	7,61	0,000000
13,5	12,5	7,65	7,91	0,000000	9,46	0,000000	7,86	0,000000
13,5	13,5	8,26	8,20	0,000000	10,02	0,000000	8,11	0,000000
13,5	14,5	8,87	8,49	0,000000	10,54	0,000000	8,35	0,000000
13,5	15,5	9,49	8,78	0,000000	11,06	0,000000	8,59	0,000000
13,5	16,5	10,10	9,08	0,000000	11,51	0,000000	8,81	0,000000
14,5	1,5	0,85	5,18	0,000000	5,24	0,000000	5,23	0,000000
14,5	2,5	1,41	5,32	0,000000	5,42	0,000000	5,40	0,000000
14,5	3,5	1,98	5,51	0,000000	5,64	0,000000	5,60	0,000000
14,5	4,5	2,54	5,70	0,000000	5,87	0,000000	5,80	0,000000
14,5	5,5	3,11	5,91	0,000000	6,11	0,000000	6,02	0,000000
14,5	6,5	3,67	6,12	0,000000	6,37	0,000000	6,23	0,000000
14,5	7,5	4,24	6,37	0,000000	6,68	0,000000	6,46	0,000000
14,5	8,5	4,80	6,61	0,000000	7,00	0,000000	6,70	0,000000
14,5	9,5	5,37	6,87	0,000000	7,47	0,000000	6,93	0,000000
14,5	10,5	5,93	7,12	0,000000	7,93	0,000000	7,16	0,000000
14,5	11,5	6,50	7,38	0,000000	8,43	0,000000	7,39	0,000000
14,5	12,5	7,06	7,64	0,000000	8,93	0,000000	7,62	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
14,5	13,5	7,63	7,90	0,000000	9,44	0,000000	7,85	0,000000
14,5	14,5	8,19	8,16	0,000000	9,95	0,000000	8,08	0,000000
14,5	15,5	8,75	8,43	0,000000	10,44	0,000000	8,30	0,000000
14,5	16,5	9,32	8,70	0,000000	10,92	0,000000	8,52	0,000000
15,5	1,5	0,78	5,16	0,000000	5,22	0,000000	5,21	0,000000
15,5	2,5	1,30	5,29	0,000000	5,38	0,000000	5,36	0,000000
15,5	3,5	1,82	5,46	0,000000	5,58	0,000000	5,54	0,000000
15,5	4,5	2,34	5,63	0,000000	5,78	0,000000	5,73	0,000000
15,5	5,5	2,86	5,82	0,000000	6,00	0,000000	5,92	0,000000
15,5	6,5	3,37	6,01	0,000000	6,23	0,000000	6,12	0,000000
15,5	7,5	3,89	6,22	0,000000	6,49	0,000000	6,32	0,000000
15,5	8,5	4,41	6,44	0,000000	6,78	0,000000	6,54	0,000000
15,5	9,5	4,93	6,67	0,000000	7,11	0,000000	6,75	0,000000
15,5	10,5	5,45	6,90	0,000000	7,54	0,000000	6,96	0,000000
15,5	11,5	5,97	7,14	0,000000	7,96	0,000000	7,18	0,000000
15,5	12,5	6,49	7,38	0,000000	8,42	0,000000	7,39	0,000000
15,5	13,5	7,01	7,61	0,000000	8,88	0,000000	7,60	0,000000
15,5	14,5	7,53	7,85	0,000000	9,35	0,000000	7,81	0,000000
15,5	15,5	8,05	8,10	0,000000	9,82	0,000000	8,02	0,000000
15,5	16,5	8,57	8,34	0,000000	10,28	0,000000	8,23	0,000000
16,5	2,5	1,19	5,25	0,000000	5,34	0,000000	5,32	0,000000
16,5	3,5	1,67	5,41	0,000000	5,52	0,000000	5,49	0,000000
16,5	4,5	2,14	5,57	0,000000	5,71	0,000000	5,66	0,000000
16,5	5,5	2,62	5,73	0,000000	5,90	0,000000	5,83	0,000000
16,5	6,5	3,10	5,91	0,000000	6,11	0,000000	6,01	0,000000
16,5	7,5	3,57	6,08	0,000000	6,32	0,000000	6,19	0,000000
16,5	8,5	4,05	6,29	0,000000	6,58	0,000000	6,39	0,000000
16,5	9,5	4,52	6,49	0,000000	6,84	0,000000	6,58	0,000000
16,5	10,5	5,00	6,70	0,000000	7,17	0,000000	6,78	0,000000
16,5	11,5	5,48	6,92	0,000000	7,56	0,000000	6,97	0,000000
16,5	12,5	5,95	7,13	0,000000	7,95	0,000000	7,17	0,000000
16,5	13,5	6,43	7,35	0,000000	8,37	0,000000	7,36	0,000000
16,5	14,5	6,90	7,57	0,000000	8,79	0,000000	7,56	0,000000
16,5	15,5	7,38	7,79	0,000000	9,22	0,000000	7,75	0,000000
17,5	3,5	1,53	5,36	0,000000	5,47	0,000000	5,44	0,000000
17,5	4,5	1,97	5,51	0,000000	5,64	0,000000	5,59	0,000000
17,5	5,5	2,40	5,65	0,000000	5,81	0,000000	5,75	0,000000
17,5	6,5	2,84	5,81	0,000000	6,00	0,000000	5,92	0,000000
17,5	7,5	3,28	5,97	0,000000	6,19	0,000000	6,08	0,000000
17,5	8,5	3,71	6,14	0,000000	6,39	0,000000	6,25	0,000000
17,5	9,5	4,15	6,33	0,000000	6,63	0,000000	6,43	0,000000
17,5	10,5	4,59	6,52	0,000000	6,88	0,000000	6,61	0,000000
17,5	11,5	5,02	6,71	0,000000	7,18	0,000000	6,79	0,000000
17,5	12,5	5,46	6,91	0,000000	7,54	0,000000	6,97	0,000000
17,5	13,5	5,90	7,10	0,000000	7,90	0,000000	7,15	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi	Max Roll	C2i Wi
18,5	5,5	2,20	5,59	0,000000	5,73	0,000000	5,68	0,000000
18,5	6,5	2,60	5,73	0,000000	5,90	0,000000	5,83	0,000000
18,5	7,5	3,01	5,87	0,000000	6,07	0,000000	5,98	0,000000
18,5	8,5	3,41	6,02	0,000000	6,24	0,000000	6,13	0,000000
18,5	9,5	3,81	6,18	0,000000	6,44	0,000000	6,29	0,000000
18,5	10,5	4,21	6,35	0,000000	6,67	0,000000	6,45	0,000000
18,5	11,5	4,61	6,53	0,000000	6,89	0,000000	6,62	0,000000

Perda pura de estabilidade

Curvas GZ encontrada para no segundo nível de perda pura de estabilidade para cada onda de referência para o navio C11

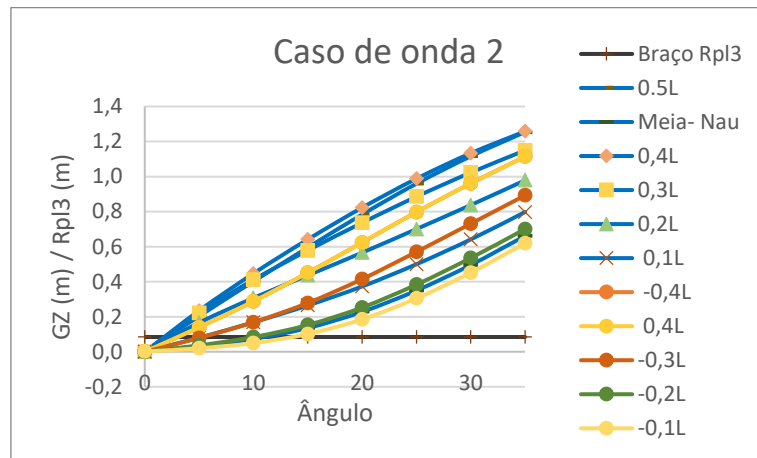


Figura 70 - Curva GZ – Caso de onda 2

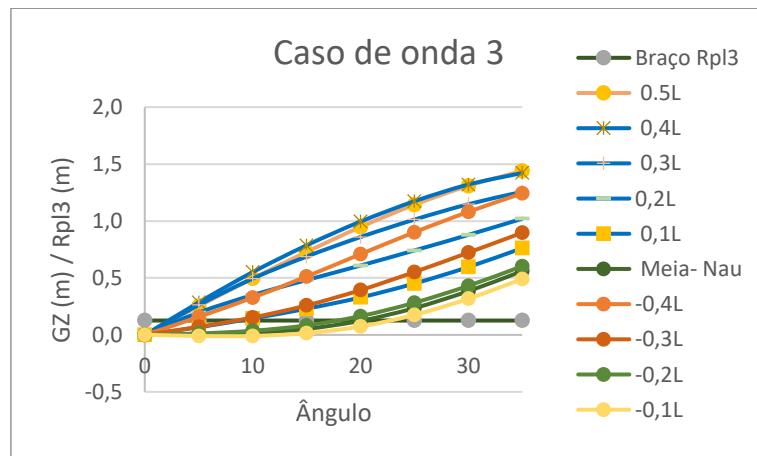


Figura 71- Curva GZ – Caso de onda 3

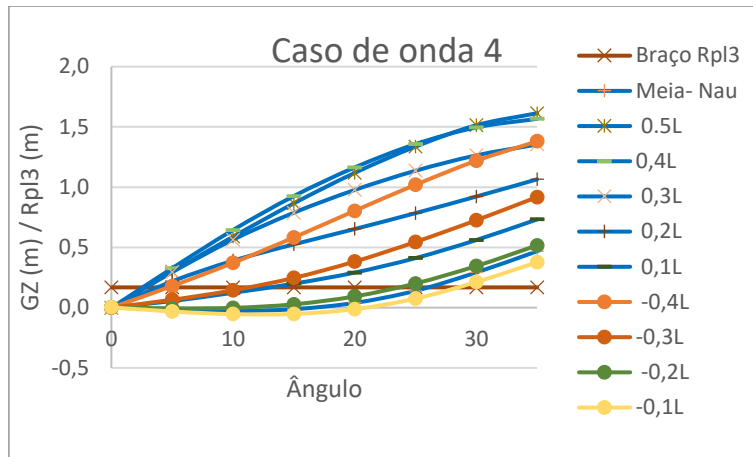


Figura 72 - Curva GZ – Caso de onda 4

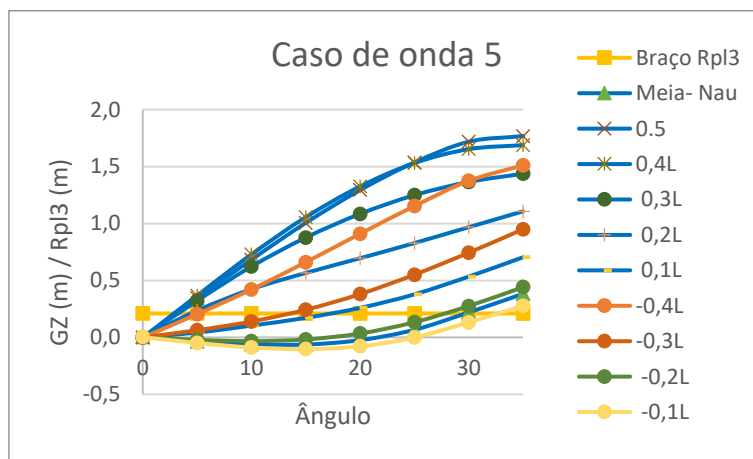


Figura 73- Curva GZ – Caso de onda 5

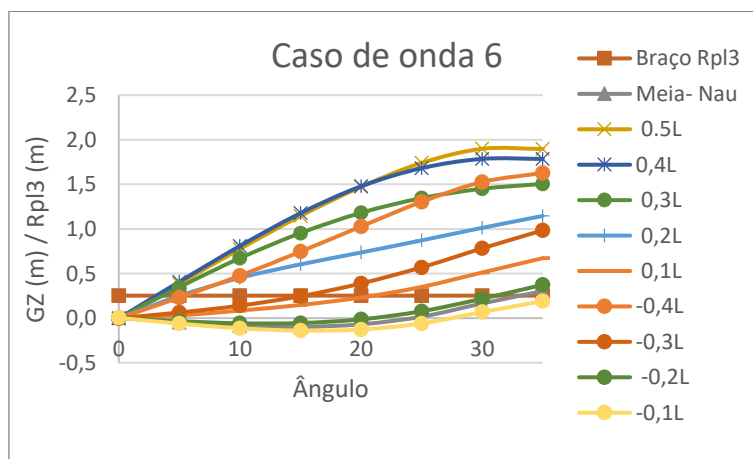


Figura 74- Curva GZ – Caso de onda 6

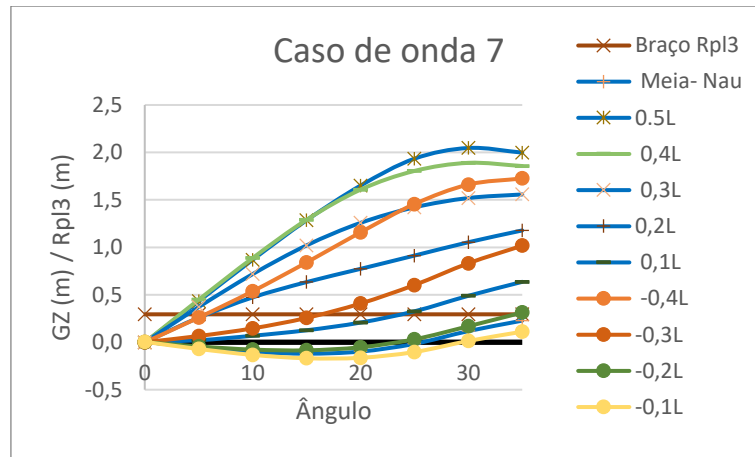


Figura 75 - Curva GZ – Caso de onda 7

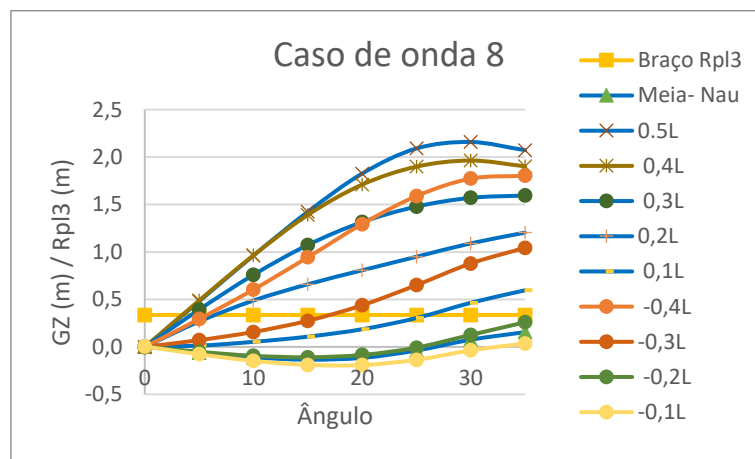


Figura 76 Curva GZ – Caso de onda 8

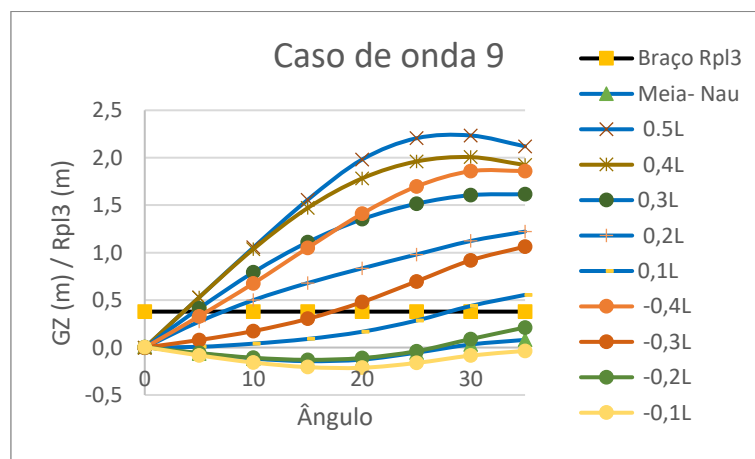


Figura 77 Curva GZ – Caso de onda 9

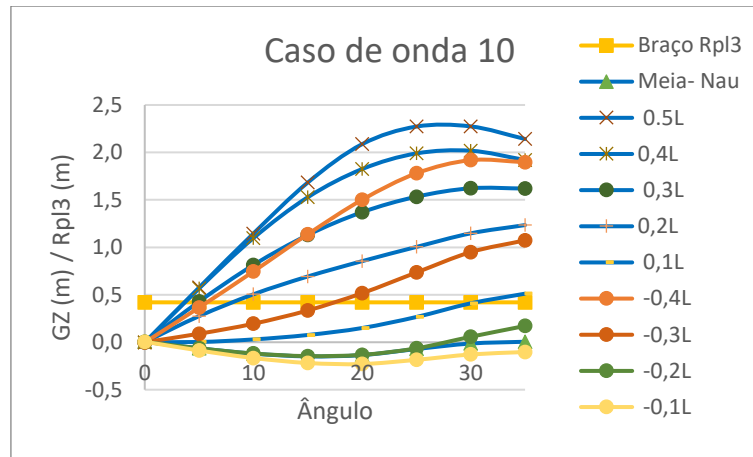


Figura 78 Curva GZ – Caso de onda 10

Tabela 63- Determinação dos valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda devido ao braço emborcador

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	C1i Phi_v < RPL1	C2i Phi_s > RPL2	Wi [/1]	C1i Wi	C2i Wi
3,5	0,5	0,041	35	0,084	0	0	0,000013	0,000000	0
4,5	0,5	0,079	35	0,160	0	0	0,001337	0,000000	0,000
4,5	1,5	0,236	35	0,481	0	0	0,000293	0,000000	0,000
4,5	2,5	0,393	35	0,802	0	0	0,000022	0,000000	0,000
4,5	3,5	0,551	35	1,123	0	0	0,000002	0,000000	0,000
5,5	0,5	0,150	35	0,305	0	0	0,008656	0,000000	0,000
5,5	1,5	0,449	35	0,915	0	0	0,009860	0,000000	0,000
5,5	2,5	0,748	35	1,525	0	0	0,001975	0,000000	0,000
5,5	3,5	1,047	35	2,134	0	0	0,000349	0,000000	0,000
5,5	4,5	1,346	35	2,744	0	0	0,000060	0,000000	0,000
5,5	5,5	1,646	35	3,354	0	0	0,000010	0,000000	0,000
5,5	6,5	1,945	35	4,525	0	0	0,000002	0,000000	0,000
6,5	0,5	0,286	35	0,583	0	0	0,011860	0,000000	0,000
6,5	1,5	0,859	35	1,750	0	0	0,049760	0,000000	0,000
6,5	2,5	1,431	35	2,917	0	0	0,021588	0,000000	0,000
6,5	3,5	2,004	35	4,847	0	0	0,006955	0,000000	0,000
6,5	4,5	2,576	35	7,967	0	0	0,001961	0,000000	0,000
6,5	5,5	3,149	35	11,088	0	0	0,000510	0,000000	0,000
6,5	6,5	3,721	35	14,167	0	0	0,000126	0,000000	0,000
6,5	7,5	4,294	35	17,138	0	0	0,000030	0,000000	0,000
6,5	8,5	4,866	35	20,109	0	0	0,000007	0,000000	0,000
6,5	9,5	5,439	35	22,892	0	0	0,000002	0,000000	0,000
7,5	0,5	0,418	35	0,853	0	0	0,006342	0,000000	0,000
7,5	1,5	1,255	35	2,558	0	0	0,077380	0,000000	0,000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	C1i Phi_v < RPL1	C2i Phi_s > RPL2	Wi [/1]	C1i Wi	C2i Wi
7,5	2,5	2,092	35	5,326	0	0	0,062300	0,000000	0,000
7,5	3,5	2,928	35	9,887	0	0	0,032265	0,000000	0,000
7,5	4,5	3,765	35	14,394	0	0	0,013543	0,000000	0,000
7,5	5,5	4,602	35	18,736	0	0	0,004984	0,000000	0,000
7,5	6,5	5,438	35	22,891	0	0	0,001670	0,000000	0,000
7,5	7,5	6,275	35	25,624	0	1	0,000521	0,000000	0,001
7,5	8,5	7,112	35	28,357	0	1	0,000154	0,000000	0,000
7,5	9,5	7,948	35	30,385	0	1	0,000043	0,000000	0,000
7,5	10,5	8,785	35	32,405	0	1	0,000012	0,000000	0,000
7,5	11,5	9,621	35	33,622	0	1	0,000003	0,000000	0,000
7,5	12,5	10,458	35	34,709	0	1	0,000001	0,000000	0,000
8,5	0,5	0,502	35	1,023	0	0	0,001863	0,000000	0,000
8,5	1,5	1,506	35	3,070	0	0	0,055697	0,000000	0,000
8,5	2,5	2,511	35	7,610	0	0	0,074495	0,000000	0,000
8,5	3,5	3,515	35	13,084	0	0	0,056750	0,000000	0,000
8,5	4,5	4,519	35	18,307	0	0	0,032885	0,000000	0,000
8,5	5,5	5,523	35	23,168	0	0	0,016029	0,000000	0,000
8,5	6,5	6,527	35	26,449	0	1	0,006903	0,000000	0,007
8,5	7,5	7,532	35	29,379	0	1	0,002701	0,000000	0,003
8,5	8,5	8,536	35	31,804	0	1	0,000979	0,000000	0,001
8,5	9,5	9,540	35	33,517	0	1	0,000332	0,000000	0,000
8,5	10,5	10,544	35	34,821	0	1	0,000107	0,000000	0,000
8,5	11,5	11,549	35	35,000	0	1	0,000033	0,000000	0,000
8,5	12,5	12,553	35	35,000	0	1	0,000010	0,000000	0,000
8,5	13,5	13,557	35	35,000	0	1	0,000003	0,000000	0,000
8,5	14,5	14,561	28,74	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000
9,5	0,5	0,538	35	1,096	0	0	0,000369	0,000000	0,000
9,5	1,5	1,614	35	3,289	0	0	0,023757	0,000000	0,000
9,5	2,5	2,689	35	8,584	0	0	0,048604	0,000000	0,000
9,5	3,5	3,765	35	14,394	0	0	0,050991	0,000000	0,000
9,5	4,5	4,841	35	19,977	0	0	0,038575	0,000000	0,000
9,5	5,5	5,916	35	24,453	0	0	0,023727	0,000000	0,000
9,5	6,5	6,992	35	27,967	0	1	0,012579	0,000000	0,013
9,5	7,5	8,068	35	30,674	0	1	0,005944	0,000000	0,006
9,5	8,5	9,144	35	33,001	0	1	0,002559	0,000000	0,003
9,5	9,5	10,219	35	34,399	0	1	0,001019	0,000000	0,001
9,5	10,5	11,295	35	35,000	0	1	0,000379	0,000000	0,000
9,5	11,5	12,371	35	35,000	0	1	0,000133	0,000000	0,000
9,5	12,5	13,446	35	35,000	0	1	0,000044	0,000000	0,000
9,5	13,5	14,522	29,51	35,000	1	1	0,000014	0,000014	0,000
9,5	14,5	15,598	8,36	35,000	1	1	0,000004	0,000004	0,000
9,5	15,5	16,673	0	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000
10,5	0,5	0,539	35	1,100	0	0	0,000056	0,000000	0,000
10,5	1,5	1,618	35	3,299	0	0	0,007035	0,000000	0,000
10,5	2,5	2,697	35	8,629	0	0	0,020660	0,000000	0,000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	C1i Phi_v < RPL1	C2i Phi_s > RPL2	Wi [/1]	C1i Wi	C2i Wi
10,5	3,5	3,776	35	14,454	0	0	0,028380	0,000000	0,000
10,5	4,5	4,855	35	20,053	0	0	0,026855	0,000000	0,000
10,5	5,5	5,934	35	24,512	0	0	0,020083	0,000000	0,000
10,5	6,5	7,013	35	28,036	0	1	0,012686	0,000000	0,013
10,5	7,5	8,092	35	30,733	0	1	0,007032	0,000000	0,007
10,5	8,5	9,171	35	33,038	0	1	0,003506	0,000000	0,004
10,5	9,5	10,250	35	34,439	0	1	0,001599	0,000000	0,002
10,5	10,5	11,329	35	35,000	0	1	0,000675	0,000000	0,001
10,5	11,5	12,408	35	35,000	0	1	0,000266	0,000000	0,000
10,5	12,5	13,487	35	35,000	0	1	0,000099	0,000000	0,000
10,5	13,5	14,566	28,64	35,000	1	1	0,000035	0,000035	0,000
10,5	14,5	15,645	7,42	35,000	1	1	0,000012	0,000012	0,000
10,5	15,5	16,724	0	35,000	1	1	0,000004	0,000004	0,000
10,5	16,5	17,803	0	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000
11,5	0,5	0,521	35	1,061	0	0	0,000007	0,000000	0,000
11,5	1,5	1,562	35	3,184	0	0	0,001607	0,000000	0,000
11,5	2,5	2,603	35	8,114	0	0	0,006445	0,000000	0,000
11,5	3,5	3,644	35	13,768	0	0	0,011141	0,000000	0,000
11,5	4,5	4,685	35	19,171	0	0	0,012752	0,000000	0,000
11,5	5,5	5,727	35	23,833	0	0	0,011260	0,000000	0,000
11,5	6,5	6,768	35	27,234	0	1	0,008259	0,000000	0,008
11,5	7,5	7,809	35	30,049	0	1	0,005249	0,000000	0,005
11,5	8,5	8,850	35	32,563	0	1	0,002969	0,000000	0,003
11,5	9,5	9,892	35	33,973	0	1	0,001522	0,000000	0,002
11,5	10,5	10,933	35	35,000	0	1	0,000717	0,000000	0,001
11,5	11,5	11,974	35	35,000	0	1	0,000314	0,000000	0,000
11,5	12,5	13,015	35	35,000	0	1	0,000128	0,000000	0,000
11,5	13,5	14,056	35	35,000	0	1	0,000050	0,000000	0,000
11,5	14,5	15,098	18,194	35,000	1	1	0,000018	0,000018	0,000
11,5	15,5	16,139	0	35,000	1	1	0,000006	0,000006	0,000
11,5	16,5	17,180	0	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000
12,5	0,5	0,491	35	1,001	0	0	0,000001	0,000000	0,000
12,5	1,5	1,473	35	3,002	0	0	0,000305	0,000000	0,000
12,5	2,5	2,455	35	7,305	0	0	0,001602	0,000000	0,000
12,5	3,5	3,437	35	12,658	0	0	0,003377	0,000000	0,000
12,5	4,5	4,418	35	17,786	0	0	0,004551	0,000000	0,000
12,5	5,5	5,400	35	22,767	0	0	0,004636	0,000000	0,000
12,5	6,5	6,382	35	25,974	0	1	0,003868	0,000000	0,004
12,5	7,5	7,364	35	28,975	0	1	0,002767	0,000000	0,003
12,5	8,5	8,346	35	31,345	0	1	0,001746	0,000000	0,002
12,5	9,5	9,328	35	33,241	0	1	0,000992	0,000000	0,001
12,5	10,5	10,310	35	34,516	0	1	0,000515	0,000000	0,001
12,5	11,5	11,292	35	35,000	0	1	0,000247	0,000000	0,000
12,5	12,5	12,273	35	35,000	0	1	0,000110	0,000000	0,000
12,5	13,5	13,255	35	35,000	0	1	0,000046	0,000000	0,000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	C1i Phi_v < RPL1	C2i Phi_s > RPL2	Wi [1]	C1i Wi	C2i Wi
12,5	14,5	14,237	35	35,000	0	1	0,000018	0,000000	0,000
12,5	15,5	15,219	15,805	35,000	1	1	0,000007	0,000007	0,000
12,5	16,5	16,201	0	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000
13,5	1,5	1,370	35	2,793	0	0	0,000051	0,000000	0,000
13,5	2,5	2,283	35	6,372	0	0	0,000337	0,000000	0,000
13,5	3,5	3,197	35	11,351	0	0	0,000843	0,000000	0,000
13,5	4,5	4,110	35	16,186	0	0	0,001309	0,000000	0,000
13,5	5,5	5,024	35	20,926	0	0	0,001509	0,000000	0,000
13,5	6,5	5,937	35	24,520	0	0	0,001408	0,000000	0,000
13,5	7,5	6,850	35	27,503	0	1	0,001117	0,000000	0,001
13,5	8,5	7,764	35	29,940	0	1	0,000776	0,000000	0,001
13,5	9,5	8,677	35	32,145	0	1	0,000483	0,000000	0,000
13,5	10,5	9,590	35	33,582	0	1	0,000273	0,000000	0,000
13,5	11,5	10,504	35	34,768	0	1	0,000142	0,000000	0,000
13,5	12,5	11,417	35	35,000	0	1	0,000068	0,000000	0,000
13,5	13,5	12,331	35	35,000	0	1	0,000031	0,000000	0,000
13,5	14,5	13,244	35	35,000	0	1	0,000013	0,000000	0,000
13,5	15,5	14,157	35	35,000	0	1	0,000005	0,000000	0,000
13,5	16,5	15,071	18,723	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000
14,5	1,5	1,265	35	2,578	0	0	0,000008	0,000000	0,000
14,5	2,5	2,108	35	5,413	0	0	0,000063	0,000000	0,000
14,5	3,5	2,951	35	10,008	0	0	0,000182	0,000000	0,000
14,5	4,5	3,794	35	14,543	0	0	0,000319	0,000000	0,000
14,5	5,5	4,637	35	18,917	0	0	0,000410	0,000000	0,000
14,5	6,5	5,480	35	23,026	0	0	0,000422	0,000000	0,000
14,5	7,5	6,323	35	25,779	0	1	0,000367	0,000000	0,000
14,5	8,5	7,166	35	28,496	0	1	0,000277	0,000000	0,000
14,5	9,5	8,009	35	30,531	0	1	0,000187	0,000000	0,000
14,5	10,5	8,852	35	32,566	0	1	0,000114	0,000000	0,000
14,5	11,5	9,695	35	33,717	0	1	0,000064	0,000000	0,000
14,5	12,5	10,538	35	34,812	0	1	0,000033	0,000000	0,000
14,5	13,5	11,381	35	35,000	0	1	0,000016	0,000000	0,000
14,5	14,5	12,224	35	35,000	0	1	0,000007	0,000000	0,000
14,5	15,5	13,067	35	35,000	0	1	0,000003	0,000000	0,000
14,5	16,5	13,910	35	35,000	0	1	0,000001	0,000000	0,000
15,5	1,5	1,162	35	2,369	0	0	0,000001	0,000000	0,000
15,5	2,5	1,937	35	4,483	0	0	0,000011	0,000000	0,000
15,5	3,5	2,712	35	8,707	0	0	0,000035	0,000000	0,000
15,5	4,5	3,487	35	12,931	0	0	0,000069	0,000000	0,000
15,5	5,5	4,261	35	16,971	0	0	0,000097	0,000000	0,000
15,5	6,5	5,036	35	20,992	0	0	0,000109	0,000000	0,000
15,5	7,5	5,811	35	24,108	0	0	0,000102	0,000000	0,000
15,5	8,5	6,586	35	26,640	0	1	0,000084	0,000000	0,000
15,5	9,5	7,361	35	28,967	0	1	0,000061	0,000000	0,000
15,5	10,5	8,135	35	30,837	0	1	0,000040	0,000000	0,000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Phi_v [deg]	Phi_s [deg]	C1i Phi_v < RPL1	C2i Phi_s > RPL2	Wi [/1]	C1i Wi	C2i Wi
15,5	11,5	8,910	35	32,698	0	1	0,000024	0,000000	0,000
15,5	12,5	9,685	35	33,705	0	1	0,000013	0,000000	0,000
15,5	13,5	10,460	35	34,711	0	1	0,000007	0,000000	0,000
15,5	14,5	11,235	35	35,000	0	1	0,000003	0,000000	0,000
15,5	15,5	12,010	35	35,000	0	1	0,000001	0,000000	0,000
15,5	16,5	12,784	35	35,000	0	1	0,000001	0,000000	0,000
16,5	2,5	1,777	35	3,622	0	0	0,000002	0,000000	0,000
16,5	3,5	2,488	35	7,486	0	0	0,000006	0,000000	0,000
16,5	4,5	3,199	35	11,361	0	0	0,000013	0,000000	0,000
16,5	5,5	3,909	35	15,144	0	0	0,000021	0,000000	0,000
16,5	6,5	4,620	35	18,833	0	0	0,000025	0,000000	0,000
16,5	7,5	5,331	35	22,521	0	0	0,000025	0,000000	0,000
16,5	8,5	6,042	35	24,862	0	0	0,000022	0,000000	0,000
16,5	9,5	6,753	35	27,184	0	1	0,000017	0,000000	0,000
16,5	10,5	7,463	35	29,215	0	1	0,000012	0,000000	0,000
16,5	11,5	8,174	35	30,931	0	1	0,000007	0,000000	0,000
16,5	12,5	8,885	35	32,647	0	1	0,000004	0,000000	0,000
16,5	13,5	9,596	35	33,589	0	1	0,000002	0,000000	0,000
16,5	14,5	10,307	35	34,512	0	1	0,000001	0,000000	0,000
16,5	15,5	11,018	35	35,000	0	1	0,000001	0,000000	0,000
17,5	3,5	2,282	35	6,361	0	0	0,000001	0,000000	0,000
17,5	4,5	2,933	35	9,915	0	0	0,000002	0,000000	0,000
17,5	5,5	3,585	35	13,462	0	0	0,000004	0,000000	0,000
17,5	6,5	4,237	35	16,845	0	0	0,000005	0,000000	0,000
17,5	7,5	4,889	35	20,227	0	0	0,000006	0,000000	0,000
17,5	8,5	5,541	35	23,226	0	0	0,000005	0,000000	0,000
17,5	9,5	6,193	35	25,355	0	1	0,000004	0,000000	0,000
17,5	10,5	6,845	35	27,485	0	1	0,000003	0,000000	0,000
17,5	11,5	7,496	35	29,294	0	1	0,000002	0,000000	0,000
17,5	12,5	8,148	35	30,868	0	1	0,000001	0,000000	0,000
17,5	13,5	8,800	35	32,442	0	1	0,000001	0,000000	0,000
18,5	5,5	3,290	35	11,859	0	0	0,000001	0,000000	0,000
18,5	6,5	3,888	35	15,034	0	0	0,000001	0,000000	0,000
18,5	7,5	4,486	35	18,139	0	0	0,000001	0,000000	0,000
18,5	8,5	5,085	35	21,243	0	0	0,000001	0,000000	0,000
18,5	9,5	5,683	35	23,690	0	0	0,000001	0,000000	0,000
18,5	10,5	6,281	35	25,644	0	1	0,000001	0,000000	0,000
18,5	11,5	6,879	35	27,598	0	1	0,000001	0,000000	0,000

PSV

Roll paramétrico

Tabela 64- Ângulos máximos de roll e suas contribuições para C2- condição 1

Tz [s]	Hs [m]	K=1		K=0,866		K=0.5		K=0	
		Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]
3,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	5,5	5	0	6,06	0	5,15	0	5,14	0
5,5	6,5	5	0	5,53	0	6,61	0	5,55	0
6,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	5,5	5	0	5,82	0	5,11	0	5,10	0
6,5	6,5	5	0	5,82	0	6,14	0	5,43	0
6,5	7,5	5	0	5,00	0	12,05	0	5,91	0
6,5	8,5	5	0	5,00	0	26,17	7E-06	6,39	0
6,5	9,5	5	0	5,00	0	28,87	2E-06	7,11	0
7,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	5,5	5	0	5,13	0	5,02	0	5,02	0
7,5	6,5	5	0	6,17	0	5,16	0	5,15	0
7,5	7,5	5	0	5,59	0	6,51	0	5,52	0
7,5	8,5	5	0	5,00	0	13,41	0	5,95	0
7,5	9,5	5	0	5,00	0	26,12	0,000043	6,38	0
7,5	10,5	5	0	5,00	0	28,53	0,000012	7,02	0
7,5	11,5	5	0	5,00	0	29,01	0,000003	7,97	0
7,5	12,5	5	0	5,00	0	28,52	1E-06	9,38	0
8,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
8,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	6,5	5	0	5,27	0	5,04	0	5,03	0
8,5	7,5	5	0	6,17	0	5,16	0	5,15	0
8,5	8,5	5	0	5,73	0	6,29	0	5,46	0
8,5	9,5	5	0	5,00	0	9,78	0	5,84	0
8,5	10,5	5	0	5,00	0	21,67	0	6,20	0
8,5	11,5	5	0	5,00	0	27,25	0,000033	6,68	0
8,5	12,5	5	0	5,00	0	29,13	0,00001	7,26	0
8,5	13,5	5	0	5,00	0	28,97	0,000003	8,19	0
8,5	14,5	5	0	5,00	0	28,45	1E-06	9,51	0
9,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	7,5	5	0	5,22	0	5,03	0	5,03	0
9,5	8,5	5	0	5,99	0	5,14	0	5,13	0
9,5	9,5	5	0	6,04	0	5,79	0	5,33	0
9,5	10,5	5	0	5,26	0	7,04	0	5,66	0
9,5	11,5	5	0	5,00	0	14,26	0	5,98	0
9,5	12,5	5	0	5,00	0	24,48	0	6,28	0
9,5	13,5	5	0	5,00	0	27,45	0,000014	6,73	0
9,5	14,5	5	0	5,00	0	29,14	0,000004	7,22	0
9,5	15,5	5	0	5,00	0	29,00	1E-06	8,01	0
10,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	8,5	5	0	5,06	0	5,01	0	5,01	0
10,5	9,5	5	0	5,73	0	5,10	0	5,09	0
10,5	10,5	5	0	6,39	0	5,19	0	5,18	0
10,5	11,5	5	0	5,75	0	6,26	0	5,46	0
10,5	12,5	5	0	5,08	0	7,34	0	5,74	0
10,5	13,5	5	0	5,00	0	15,20	0	6,00	0
10,5	14,5	5	0	5,00	0	23,97	0	6,27	0
10,5	15,5	5	0	5,00	0	27,11	0,000004	6,64	0
10,5	16,5	5	0	5,00	0	28,65	1E-06	7,05	0

Tz [s]	Hs [m]	Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]	Max Roll	C2i Wi [1]
11,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	10,5	5	0	5,43	0	5,06	0	5,05	0
11,5	11,5	5	0	6,00	0	5,14	0	5,13	0
11,5	12,5	5	0	6,23	0	5,47	0	5,25	0
11,5	13,5	5	0	5,65	0	6,41	0	5,50	0
11,5	14,5	5	0	5,08	0	7,34	0	5,74	0
11,5	15,5	5	0	5,00	0	13,99	0	5,97	0
11,5	16,5	5	0	5,00	0	21,55	0	6,19	0
12,5	0,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	11,5	5	0	5,12	0	5,02	0	5,02	0
12,5	12,5	5	0	5,62	0	5,09	0	5,08	0
12,5	13,5	5	0	6,12	0	5,15	0	5,14	0
12,5	14,5	5	0	6,19	0	5,54	0	5,27	0
12,5	15,5	5	0	5,69	0	6,35	0	5,48	0
12,5	16,5	5	0	5,19	0	7,16	0	5,69	0
13,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	11,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
13,5	12,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	13,5	5	0	5,26	0	5,04	0	5,03	0
13,5	14,5	5	0	5,70	0	5,10	0	5,09	0
13,5	15,5	5	0	6,13	0	5,16	0	5,14	0
13,5	16,5	5	0	6,24	0	5,46	0	5,25	0
14,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	11,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	12,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	13,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	14,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	15,5	5	0	5,31	0	5,04	0	5,04	0
14,5	16,5	5	0	5,70	0	5,10	0	5,09	0
15,5	1,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	11,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	12,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	13,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	14,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	15,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	16,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	2,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
16,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	11,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	12,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	13,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	14,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	15,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	3,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	4,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	11,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	12,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	13,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	5,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	6,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	7,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	8,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	9,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	10,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	11,5	5	0	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	K=-0,5		K=-0,866		K=-1	
			Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
3,5	0,5	0,162	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	0,5	0,311	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	1,5	0,932	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	2,5	1,554	5,00	0	5,00	0	5,00	0
4,5	3,5	2,176	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	0,5	0,363	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	1,5	1,088	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	2,5	1,813	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	3,5	2,538	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	4,5	3,263	5,00	0	5,00	0	5,00	0
5,5	5,5	3,988	5,37	0	5,00	0	5,00	0
5,5	6,5	4,713	11,42	0	5,00	0	5,00	0
6,5	0,5	0,349	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	1,5	1,047	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	2,5	1,745	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	3,5	2,443	5,00	0	5,00	0	5,00	0
6,5	4,5	3,141	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
6,5	5,5	3,839	5,29	0	5,00	0	5,00	0
6,5	6,5	4,538	9,44	0	5,00	0	5,00	0
6,5	7,5	5,236	14,64	0	5,06	0	5,00	0
6,5	8,5	5,934	13,26	0	5,28	0	5,00	0
6,5	9,5	6,632	9,88	0	5,56	0	5,00	0
7,5	0,5	0,312	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	1,5	0,935	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	2,5	1,558	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	3,5	2,181	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	4,5	2,804	5,00	0	5,00	0	5,00	0
7,5	5,5	3,428	5,04	0	5,00	0	5,00	0
7,5	6,5	4,051	5,41	0	5,00	0	5,00	0
7,5	7,5	4,674	10,99	0	5,00	0	5,00	0
7,5	8,5	5,297	14,54	0	5,08	0	5,00	0
7,5	9,5	5,921	13,33	0	5,27	0	5,00	0
7,5	10,5	6,544	10,30	0	5,53	0	5,00	0
7,5	11,5	7,167	9,02	0	5,83	0	5,03	0
7,5	12,5	7,790	8,66	0	6,20	0	5,10	0
8,5	0,5	0,270	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	1,5	0,810	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	2,5	1,351	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	3,5	1,891	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	4,5	2,431	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	5,5	2,972	5,00	0	5,00	0	5,00	0
8,5	6,5	3,512	5,09	0	5,00	0	5,00	0
8,5	7,5	4,052	5,41	0	5,00	0	5,00	0
8,5	8,5	4,592	10,06	0	5,00	0	5,00	0
8,5	9,5	5,133	14,82	0	5,03	0	5,00	0
8,5	10,5	5,673	13,92	0	5,19	0	5,00	0
8,5	11,5	6,213	11,91	0	5,39	0	5,00	0
8,5	12,5	6,754	9,48	0	5,62	0	5,00	0
8,5	13,5	7,294	8,87	0	5,89	0	5,03	0
8,5	14,5	7,834	8,67	0	6,24	0	5,11	0
9,5	0,5	0,232	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	1,5	0,696	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	2,5	1,160	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	3,5	1,624	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	4,5	2,088	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	5,5	2,552	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	6,5	3,016	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	7,5	3,480	5,08	0	5,00	0	5,00	0
9,5	8,5	3,944	5,35	0	5,00	0	5,00	0
9,5	9,5	4,408	7,97	0	5,00	0	5,00	0
9,5	10,5	4,872	13,23	0	5,00	0	5,00	0
9,5	11,5	5,336	14,48	0	5,09	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
9,5	12,5	5,800	10,16	0	5,54	0	5,00	0
9,5	13,5	6,264	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	14,5	6,728	5,00	0	5,00	0	5,00	0
9,5	15,5	7,192	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	0,5	0,199	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	1,5	0,598	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	2,5	0,996	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	3,5	1,395	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	4,5	1,793	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	5,5	2,191	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	6,5	2,590	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	7,5	2,988	5,15	0	5,00	0	5,00	0
10,5	8,5	3,387	5,35	0	5,00	0	5,00	0
10,5	9,5	3,785	6,67	0	5,00	0	5,00	0
10,5	10,5	4,184	10,56	0	5,00	0	5,00	0
10,5	11,5	4,582	14,46	0	5,00	0	5,00	0
10,5	12,5	4,980	14,50	0	5,09	0	5,00	0
10,5	13,5	5,379	13,93	0	5,19	0	5,00	0
10,5	14,5	5,777	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	15,5	6,176	5,00	0	5,00	0	5,00	0
10,5	16,5	6,574	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	0,5	0,172	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	1,5	0,515	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	2,5	0,859	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	3,5	1,202	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	4,5	1,546	10,16	0	5,54	0	5,00	0
11,5	5,5	1,889	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	6,5	2,233	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	7,5	2,576	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	8,5	2,920	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	9,5	3,263	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	10,5	3,606	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	11,5	3,950	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	12,5	4,293	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	13,5	4,637	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	14,5	4,980	5,00	0	5,00	0	5,00	0
11,5	15,5	5,324	5,15	0	5,00	0	5,00	0
11,5	16,5	5,667	5,35	0	5,00	0	5,00	0
12,5	0,5	0,149	6,67	0	5,00	0	5,00	0
12,5	1,5	0,447	10,56	0	5,00	0	5,00	0
12,5	2,5	0,745	14,46	0	5,00	0	5,00	0
12,5	3,5	1,042	14,50	0	5,09	0	5,00	0
12,5	4,5	1,340	13,93	0	5,19	0	5,00	0
12,5	5,5	1,638	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	6,5	1,936	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
12,5	7,5	2,234	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	8,5	2,531	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	9,5	2,829	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	10,5	3,127	5,00	0	5,00	0	5,00	0
12,5	11,5	3,425	5,04	0	5,00	0	5,00	0
12,5	12,5	3,723	5,22	0	5,00	0	5,00	0
12,5	13,5	4,021	5,39	0	5,00	0	5,00	0
12,5	14,5	4,318	6,95	0	5,00	0	5,00	0
12,5	15,5	4,616	10,33	0	5,00	0	5,00	0
12,5	16,5	4,914	13,70	0	5,00	0	5,00	0
13,5	1,5	0,390	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	2,5	0,650	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	3,5	0,910	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	4,5	1,170	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	5,5	1,429	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	6,5	1,689	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	7,5	1,949	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	8,5	2,209	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	9,5	2,469	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	10,5	2,729	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	11,5	2,989	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	12,5	3,249	5,00	0	5,00	0	5,00	0
13,5	13,5	3,509	5,09	0	5,00	0	5,00	0
13,5	14,5	3,769	5,24	0	5,00	0	5,00	0
13,5	15,5	4,029	5,40	0	5,00	0	5,00	0
13,5	16,5	4,288	6,61	0	5,00	0	5,00	0
14,5	1,5	0,342	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	2,5	0,571	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	3,5	0,799	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	4,5	1,027	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	5,5	1,256	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	6,5	1,484	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	7,5	1,712	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	8,5	1,941	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	9,5	2,169	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	10,5	2,397	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	11,5	2,626	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	12,5	2,854	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	13,5	3,082	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	14,5	3,311	5,00	0	5,00	0	5,00	0
14,5	15,5	3,539	5,11	0	5,00	0	5,00	0
14,5	16,5	3,767	5,24	0	5,00	0	5,00	0
15,5	1,5	0,303	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	2,5	0,505	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	3,5	0,706	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]	Max Roll	C2i Wi [/1]
15,5	4,5	0,908	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	5,5	1,110	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	6,5	1,312	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	7,5	1,514	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	8,5	1,716	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	9,5	1,918	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	10,5	2,119	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	11,5	2,321	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	12,5	2,523	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	13,5	2,725	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	14,5	2,927	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	15,5	3,129	5,00	0	5,00	0	5,00	0
15,5	16,5	3,331	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	2,5	0,449	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	3,5	0,628	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	4,5	0,808	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	5,5	0,987	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	6,5	1,167	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	7,5	1,347	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	8,5	1,526	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	9,5	1,706	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	10,5	1,885	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	11,5	2,065	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	12,5	2,244	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	13,5	2,424	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	14,5	2,603	5,00	0	5,00	0	5,00	0
16,5	15,5	2,783	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	3,5	0,562	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	4,5	0,723	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	5,5	0,883	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	6,5	1,044	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	7,5	1,204	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	8,5	1,365	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	9,5	1,526	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	10,5	1,686	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	11,5	1,847	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	12,5	2,007	5,00	0	5,00	0	5,00	0
17,5	13,5	2,168	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	5,5	0,794	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	6,5	0,939	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	7,5	1,083	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	8,5	1,227	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	9,5	1,372	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	10,5	1,516	5,00	0	5,00	0	5,00	0
18,5	11,5	1,661	5,00	0	5,00	0	5,00	0

Perda pura de estabilidade

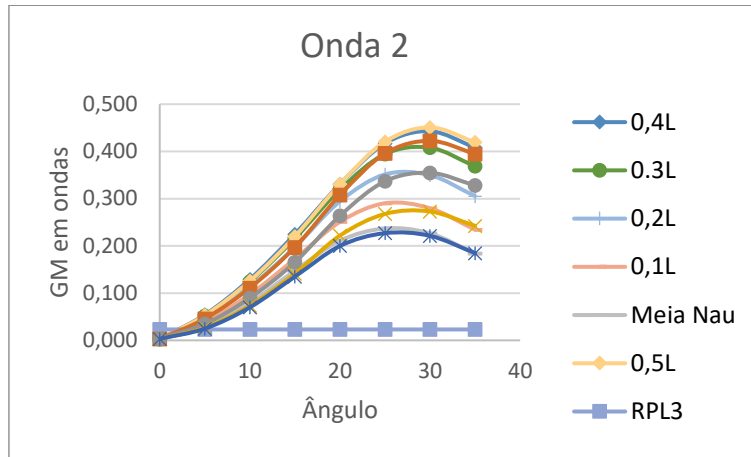


Figura 79 - Curva GZ – Caso de onda 2

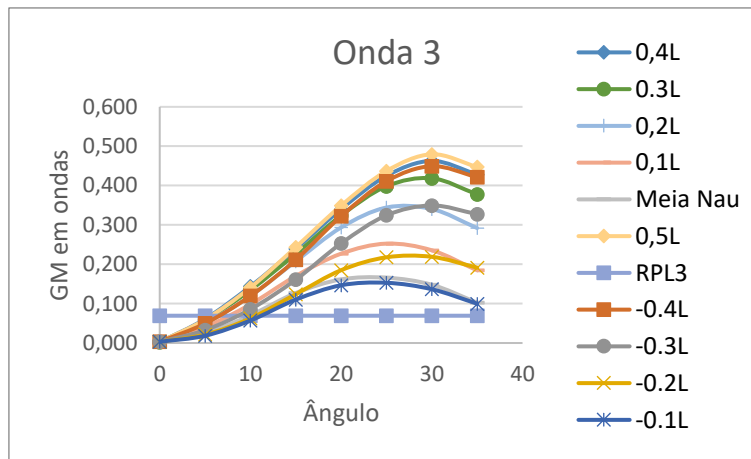


Figura 80- Curva GZ – Caso de onda 3

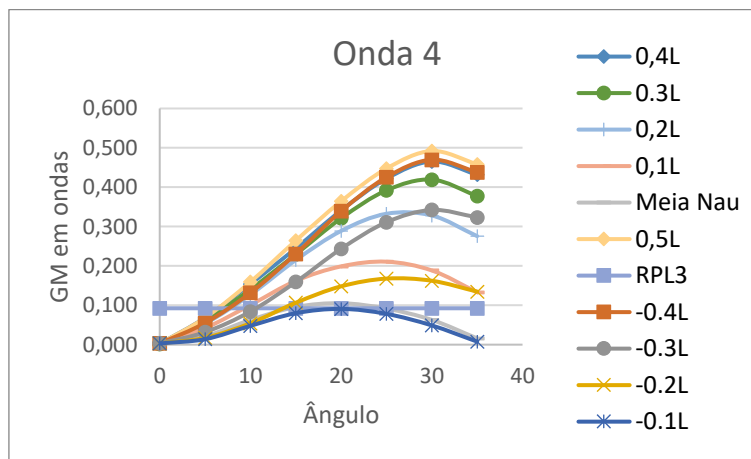


Figura 81 - Curva GZ – Caso de onda 4

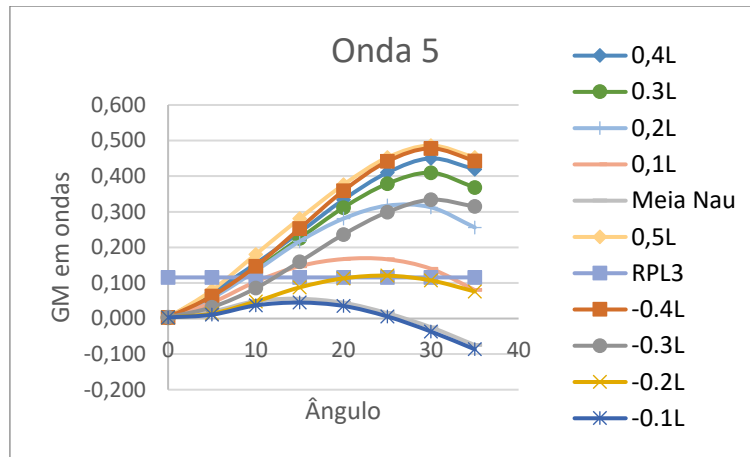


Figura 82- Curva GZ – Caso de onda 5

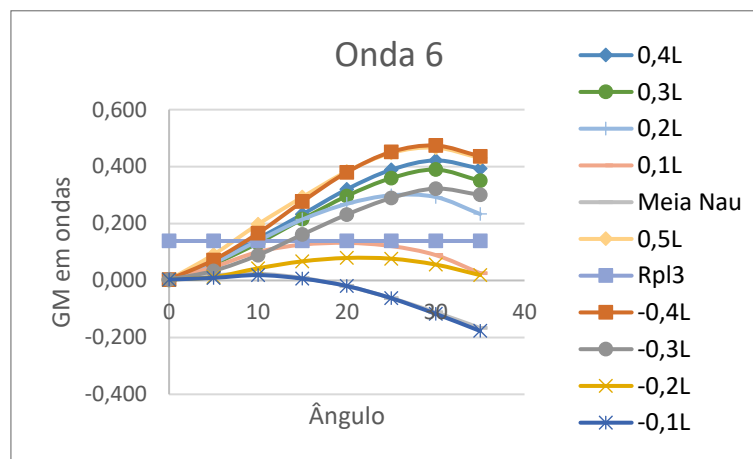


Figura 83- Curva GZ – Caso de onda 6

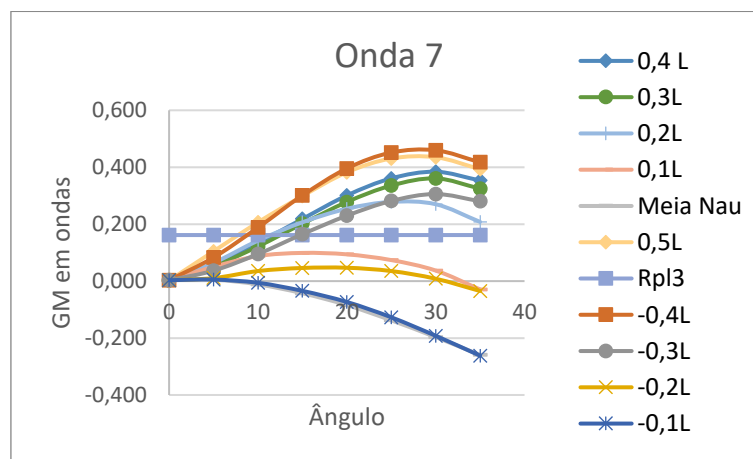


Figura 84- Curva GZ – Caso de onda 7

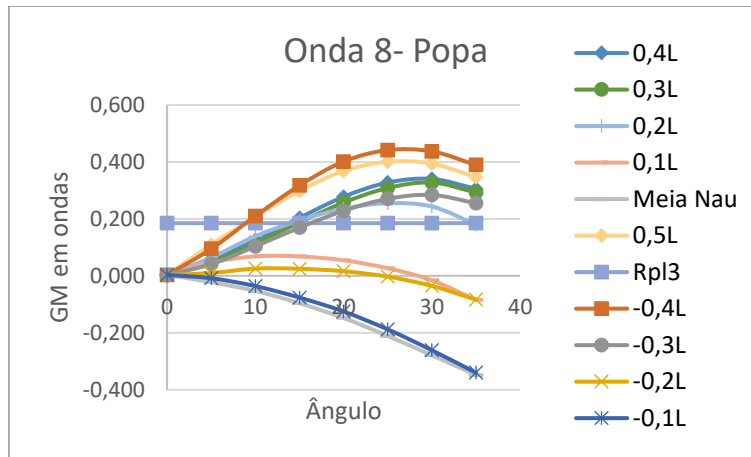


Figura 85- Curva GZ – Caso de onda 8

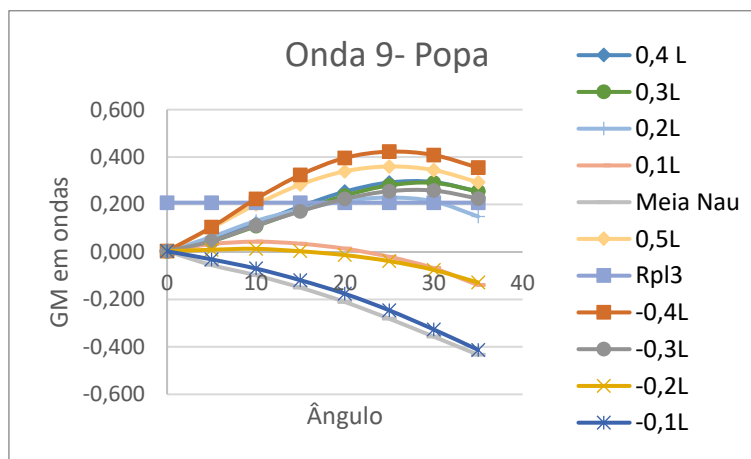


Figura 86- Curva GZ – Caso de onda 9

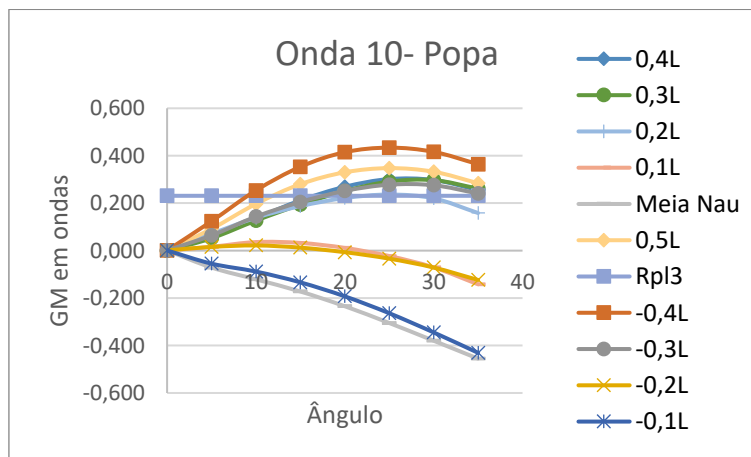


Figura 87- Curva GZ – Caso de onda 10

Tabela 65- Determinação dos valores do ângulo de perda de estabilidade e do ângulo de banda devido ao braço emborcador Rpl3

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	ϕ_v [deg]	ϕ_s [deg]	C1i $\phi_v <$ RPL1	C2i $\phi_s >$ RPL2	Wi [1]	C1i Wi	C2i Wi
3,5	0,5	0,241	35,00	0,7063	0	0	0,000013	0,000000	0,000000
4,500	0,500	0,464	35,00	1,359	0	0	0,001337	0,000000	0,000000
4,500	1,500	1,391	35,00	4,523	0	0	0,000293	0,000000	0,000000
4,500	2,500	2,318	35,00	7,552	0	0	0,000022	0,000000	0,000000
4,500	3,500	3,245	35,00	11,045	0	0	0,000002	0,000000	0,000000
5,500	0,500	0,541	35,00	1,585	0	0	0,008656	0,000000	0,000000
5,500	1,500	1,622	35,00	5,388	0	0	0,009860	0,000000	0,000000
5,500	2,500	2,704	35,00	8,902	0	0	0,001975	0,000000	0,000000
5,500	3,500	3,785	32,76	23,639	0	0	0,000349	0,000000	0,000000
5,500	4,500	4,866	23,80	35,000	1	1	0,000060	0,000060	0,000060
5,500	5,500	5,948	11,45	35,000	1	1	0,000010	0,000010	0,000010
5,5	6,500	7,029	0,00	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000002
6,5	0,500	0,521	35,00	1,526	0	0	0,011860	0,000000	0,000000
6,5	1,500	1,562	35,00	5,162	0	0	0,049760	0,000000	0,000000
6,5	2,500	2,603	35,00	8,504	0	0	0,021588	0,000000	0,000000
6,5	3,500	3,644	33,49	19,685	0	0	0,006955	0,000000	0,000000
6,5	4,500	4,685	25,63	35,000	1	1	0,001961	0,001961	0,001961
6,5	5,500	5,727	14,27	35,000	1	1	0,000510	0,000510	0,000510
6,5	6,500	6,768	0,00	35,000	1	1	0,000126	0,000126	0,000126
6,5	7,500	7,809	0,00	35,000	1	1	0,000030	0,000030	0,000030
6,5	8,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000007	0,000007	0,000007
6,5	9,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000002
7,5	0,500	0,465	35,00	1,362	0	0	0,006342	0,000000	0,000000
7,5	1,500	1,394	35,00	4,536	0	0	0,077380	0,000000	0,000000
7,5	2,500	2,324	35,00	7,570	0	0	0,062300	0,000000	0,000000
7,5	3,500	3,253	35,00	11,077	0	0	0,032265	0,000000	0,000000
7,5	4,500	4,183	30,70	34,816	0	1	0,013543	0,000000	0,013543
7,5	5,500	5,112	21,20	35,000	1	1	0,004984	0,004984	0,004984
7,5	6,500	6,042	10,02	35,000	1	1	0,001670	0,001670	0,001670
7,5	7,500	6,972	0,00	35,000	1	1	0,000521	0,000521	0,000521
7,5	8,500	7,901	0,00	35,000	1	1	0,000154	0,000154	0,000154
7,5	9,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000043	0,000043	0,000043
7,5	10,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000012	0,000012	0,000012
7,5	11,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000003	0,000003	0,000003
7,5	12,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
8,5	0,500	0,403	35,00	1,181	0	0	0,001863	0,000000	0,000000
8,5	1,500	1,209	35,00	3,843	0	0	0,055697	0,000000	0,000000
8,5	2,500	2,015	35,00	6,625	0	0	0,074495	0,000000	0,000000
8,5	3,500	2,820	35,00	9,364	0	0	0,056750	0,000000	0,000000
8,5	4,500	3,626	33,58	19,181	0	0	0,032885	0,000000	0,000000
8,5	5,500	4,432	28,20	35,000	1	1	0,016029	0,016029	0,016029

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	ϕ_v [deg]	ϕ_s [deg]	C1i $\phi_v <$ RPL1	C2i $\phi_s >$ RPL2	Wi [1]	C1i Wi	C2i Wi
8,5	6,500	5,238	19,79	35,000	1	1	0,006903	0,006903	0,006903
8,5	7,500	6,044	10,00	35,000	1	1	0,002701	0,002701	0,002701
8,5	8,500	6,850	0,00	35,000	1	1	0,000979	0,000979	0,000979
8,5	9,500	7,656	0,00	35,000	1	1	0,000332	0,000332	0,000332
8,5	10,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000107	0,000107	0,000107
8,5	11,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000033	0,000033	0,000033
8,5	12,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000010	0,000010	0,000010
8,5	13,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000003	0,000003	0,000003
8,5	14,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
9,5	0,500	0,346	35,00	1,014	0	0	0,000369	0,000000	0,000000
9,5	1,500	1,038	35,00	3,205	0	0	0,023757	0,000000	0,000000
9,5	2,500	1,730	35,00	5,755	0	0	0,048604	0,000000	0,000000
9,5	3,500	2,422	35,00	7,871	0	0	0,050991	0,000000	0,000000
9,5	4,500	3,114	35,00	10,528	0	0	0,038575	0,000000	0,000000
9,5	5,500	3,807	32,65	24,245	0	0	0,023727	0,000000	0,000000
9,5	6,500	4,499	27,53	35,000	1	1	0,012579	0,012579	0,012579
9,5	7,500	5,191	20,32	35,000	1	1	0,005944	0,005944	0,005944
9,5	8,500	5,883	12,44	35,000	1	1	0,002559	0,002559	0,002559
9,5	9,500	6,575	1,94	35,000	1	1	0,001019	0,001019	0,001019
9,5	10,500	7,267	0,00	35,000	1	1	0,000379	0,000379	0,000379
9,5	11,500	7,959	0,00	35,000	1	1	0,000133	0,000133	0,000133
9,5	12,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000044	0,000044	0,000044
9,5	13,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000014	0,000014	0,000014
9,5	14,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000004	0,000004	0,000004
9,5	15,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
10,5	0,500	0,297	35,00	0,871	0	0	0,000056	0,000000	0,000000
10,5	1,500	0,891	35,00	2,656	0	0	0,007035	0,000000	0,000000
10,5	2,500	1,486	35,00	4,878	0	0	0,020660	0,000000	0,000000
10,5	3,500	2,080	35,00	6,824	0	0	0,028380	0,000000	0,000000
10,5	4,500	2,674	35,00	8,786	0	0	0,026855	0,000000	0,000000
10,5	5,500	3,269	35,00	11,137	0	0	0,020083	0,000000	0,000000
10,5	6,500	3,863	32,36	25,824	0	1	0,012686	0,000000	0,012686
10,5	7,500	4,457	27,95	35,000	1	1	0,007032	0,007032	0,007032
10,5	8,500	5,051	21,89	35,000	1	1	0,003506	0,003506	0,003506
10,5	9,500	5,646	15,18	35,000	1	1	0,001599	0,001599	0,001599
10,5	10,500	6,240	7,02	35,000	1	1	0,000675	0,000675	0,000675
10,5	11,500	6,834	0,00	35,000	1	1	0,000266	0,000266	0,000266
10,5	12,500	7,428	0,00	35,000	1	1	0,000099	0,000099	0,000099
10,5	13,500	8,023	0,00	35,000	1	1	0,000035	0,000035	0,000035
10,5	14,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000012	0,000012	0,000012
10,5	15,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000004	0,000004	0,000004
10,5	16,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
11,5	0,500	0,256	35,00	0,751	0	0	0,000007	0,000000	0,000000
11,5	1,500	0,768	35,00	2,253	0	0	0,001607	0,000000	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	ϕ_v [deg]	ϕ_s [deg]	C1i $\phi_v <$ RPL1	C2i $\phi_s >$ RPL2	Wi [1]	C1i Wi	C2i Wi
11,5	2,500	1,281	35,00	4,112	0	0	0,006445	0,000000	0,000000
11,5	3,500	1,793	35,00	5,947	0	0	0,011141	0,000000	0,000000
11,5	4,500	2,305	35,00	7,514	0	0	0,012752	0,000000	0,000000
11,5	5,500	2,818	35,00	9,353	0	0	0,011260	0,000000	0,000000
11,5	6,500	3,330	35,00	11,380	0	0	0,008259	0,000000	0,000000
11,5	7,500	3,842	32,46	25,247	0	1	0,005249	0,000000	0,005249
11,5	8,500	4,355	28,99	35,000	1	1	0,002969	0,002969	0,002969
11,5	9,500	4,867	23,79	35,000	1	1	0,001522	0,001522	0,001522
11,5	10,500	5,379	18,19	35,000	1	1	0,000717	0,000717	0,000717
11,5	11,500	5,891	12,31	35,000	1	1	0,000314	0,000314	0,000314
11,5	12,500	6,404	4,54	35,000	1	1	0,000128	0,000128	0,000128
11,5	13,500	6,916	0,00	35,000	1	1	0,000050	0,000050	0,000050
11,5	14,500	7,428	0,00	35,000	1	1	0,000018	0,000018	0,000018
11,5	15,500	7,941	0,00	35,000	1	1	0,000006	0,000006	0,000006
11,5	16,500	8,379	0,00	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000002
12,5	0,500	0,222	35,00	0,651	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
12,5	1,500	0,666	35,00	1,953	0	0	0,000305	0,000000	0,000000
12,5	2,500	1,110	35,00	3,475	0	0	0,001602	0,000000	0,000000
12,5	3,500	1,555	35,00	5,136	0	0	0,003377	0,000000	0,000000
12,5	4,500	1,999	35,00	6,576	0	0	0,004551	0,000000	0,000000
12,5	5,500	2,443	35,00	7,935	0	0	0,004636	0,000000	0,000000
12,5	6,500	2,887	35,00	9,629	0	0	0,003868	0,000000	0,000000
12,5	7,500	3,331	35,00	11,386	0	0	0,002767	0,000000	0,000000
12,5	8,500	3,776	32,81	23,377	0	0	0,001746	0,000000	0,000000
12,5	9,500	4,220	30,36	35,000	0	1	0,000992	0,000000	0,000992
12,5	10,500	4,664	25,85	35,000	1	1	0,000515	0,000515	0,000515
12,5	11,500	5,108	21,25	35,000	1	1	0,000247	0,000247	0,000247
12,5	12,500	5,552	16,24	35,000	1	1	0,000110	0,000110	0,000110
12,5	13,500	5,997	10,71	35,000	1	1	0,000046	0,000046	0,000046
12,5	14,500	6,441	3,98	35,000	1	1	0,000018	0,000018	0,000018
12,5	15,500	6,885	0,00	35,000	1	1	0,000007	0,000007	0,000007
12,5	16,500	7,329	0,00	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000002
13,5	1,500	0,581	35,00	1,705	0	0	0,000051	0,000000	0,000000
13,5	2,500	0,969	35,00	2,947	0	0	0,000337	0,000000	0,000000
13,5	3,500	1,357	35,00	4,396	0	0	0,000843	0,000000	0,000000
13,5	4,500	1,744	35,00	5,798	0	0	0,001309	0,000000	0,000000
13,5	5,500	2,132	35,00	6,984	0	0	0,001509	0,000000	0,000000
13,5	6,500	2,520	35,00	8,175	0	0	0,001408	0,000000	0,000000
13,5	7,500	2,907	35,00	9,708	0	0	0,001117	0,000000	0,000000
13,5	8,500	3,295	35,00	11,242	0	0	0,000776	0,000000	0,000000
13,5	9,500	3,683	33,29	20,766	0	0	0,000483	0,000000	0,000000
13,5	10,500	4,070	31,28	31,654	0	1	0,000273	0,000000	0,000273
13,5	11,500	4,458	27,94	35,000	1	1	0,000142	0,000142	0,000142
13,5	12,500	4,846	24,01	35,000	1	1	0,000068	0,000068	0,000068

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	ϕ_v [deg]	ϕ_s [deg]	C1i $\phi_v <$ RPL1	C2i $\phi_s >$ RPL2	Wi [1]	C1i Wi	C2i Wi
13,5	13,500	5,233	19,84	35,000	1	1	0,000031	0,000031	0,000031
13,5	14,500	5,621	15,46	35,000	1	1	0,000013	0,000013	0,000013
13,5	15,500	6,009	10,53	35,000	1	1	0,000005	0,000005	0,000005
13,5	16,500	6,396	4,65	35,000	1	1	0,000002	0,000002	0,000002
14,5	1,500	0,511	35,00	1,497	0	0	0,000008	0,000000	0,000000
14,5	2,500	0,851	35,00	2,507	0	0	0,000063	0,000000	0,000000
14,5	3,500	1,192	35,00	3,780	0	0	0,000182	0,000000	0,000000
14,5	4,500	1,532	35,00	5,052	0	0	0,000319	0,000000	0,000000
14,5	5,500	1,873	35,00	6,191	0	0	0,000410	0,000000	0,000000
14,5	6,500	2,213	35,00	7,233	0	0	0,000422	0,000000	0,000000
14,5	7,500	2,554	35,00	8,310	0	0	0,000367	0,000000	0,000000
14,5	8,500	2,895	35,00	9,658	0	0	0,000277	0,000000	0,000000
14,5	9,500	3,235	35,00	11,005	0	0	0,000187	0,000000	0,000000
14,5	10,500	3,576	33,84	17,759	0	0	0,000114	0,000000	0,000000
14,5	11,500	3,916	32,08	27,323	0	1	0,000064	0,000000	0,000064
14,5	12,500	4,257	29,98	35,000	1	1	0,000033	0,000033	0,000033
14,5	13,500	4,597	26,53	35,000	1	1	0,000016	0,000016	0,000016
14,5	14,500	4,938	23,07	35,000	1	1	0,000007	0,000007	0,000007
14,5	15,500	5,278	19,33	35,000	1	1	0,000003	0,000003	0,000003
14,5	16,500	5,619	15,49	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
15,5	1,500	0,452	35,00	1,324	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
15,5	2,500	0,753	35,00	2,206	0	0	0,000011	0,000000	0,000000
15,5	3,500	1,054	35,00	3,263	0	0	0,000035	0,000000	0,000000
15,5	4,500	1,355	35,00	4,388	0	0	0,000069	0,000000	0,000000
15,5	5,500	1,656	35,00	5,514	0	0	0,000097	0,000000	0,000000
15,5	6,500	1,957	35,00	6,448	0	0	0,000109	0,000000	0,000000
15,5	7,500	2,258	35,00	7,369	0	0	0,000102	0,000000	0,000000
15,5	8,500	2,559	35,00	8,330	0	0	0,000084	0,000000	0,000000
15,5	9,500	2,860	35,00	9,521	0	0	0,000061	0,000000	0,000000
15,5	10,500	3,161	35,00	10,712	0	0	0,000040	0,000000	0,000000
15,5	11,500	3,462	34,43	14,573	0	0	0,000024	0,000000	0,000000
15,5	12,500	3,763	32,87	23,029	0	0	0,000013	0,000000	0,000000
15,5	13,500	4,064	31,31	31,485	0	1	0,000007	0,000000	0,000007
15,5	14,500	4,365	28,88	35,000	1	1	0,000003	0,000003	0,000003
15,5	15,500	4,666	25,83	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
15,5	16,500	4,968	22,77	35,000	1	1	0,000001	0,000001	0,000001
16,5	2,500	0,669	35,00	1,962	0	0	0,000002	0,000000	0,000000
16,5	3,500	0,937	35,00	2,828	0	0	0,000006	0,000000	0,000000
16,5	4,500	1,205	35,00	3,829	0	0	0,000013	0,000000	0,000000
16,5	5,500	1,473	35,00	4,830	0	0	0,000021	0,000000	0,000000
16,5	6,500	1,741	35,00	5,786	0	0	0,000025	0,000000	0,000000
16,5	7,500	2,008	35,00	6,605	0	0	0,000025	0,000000	0,000000
16,5	8,500	2,276	35,00	7,424	0	0	0,000022	0,000000	0,000000
16,5	9,500	2,544	35,00	8,270	0	0	0,000017	0,000000	0,000000

Tz [s]	Hs [m]	Heff [m]	ϕ_v [deg]	ϕ_s [deg]	C1i $\phi_v <$ RPL1	C2i $\phi_s >$ RPL2	Wi [1]	C1i Wi	C2i Wi
16,5	10,500	2,812	35,00	9,330	0	0	0,000012	0,000000	0,000000
16,5	11,500	3,079	35,00	10,389	0	0	0,000007	0,000000	0,000000
16,5	12,500	3,347	35,00	11,449	0	0	0,000004	0,000000	0,000000
16,5	13,500	3,615	33,64	18,864	0	0	0,000002	0,000000	0,000000
16,5	14,500	3,883	32,25	26,385	0	1	0,000001	0,000000	0,000001
16,5	15,500	4,151	30,87	33,907	0	1	0,000001	0,000000	0,000001
17,5	3,500	0,838	35,00	2,458	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
17,5	4,500	1,078	35,00	3,353	0	0	0,000002	0,000000	0,000000
17,5	5,500	1,317	35,00	4,249	0	0	0,000004	0,000000	0,000000
17,5	6,500	1,557	35,00	5,144	0	0	0,000005	0,000000	0,000000
17,5	7,500	1,796	35,00	5,957	0	0	0,000006	0,000000	0,000000
17,5	8,500	2,036	35,00	6,690	0	0	0,000005	0,000000	0,000000
17,5	9,500	2,276	35,00	7,422	0	0	0,000004	0,000000	0,000000
17,5	10,500	2,515	35,00	8,156	0	0	0,000003	0,000000	0,000000
17,5	11,500	2,755	35,00	9,104	0	0	0,000002	0,000000	0,000000
17,5	12,500	2,994	35,00	10,051	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
17,5	13,500	3,234	35,00	10,999	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	5,500	1,185	35,00	3,752	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	6,500	1,400	35,00	4,558	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	7,500	1,615	35,00	5,363	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	8,500	1,831	35,00	6,062	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	9,500	2,046	35,00	6,721	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	10,500	2,262	35,00	7,380	0	0	0,000001	0,000000	0,000000
18,5	11,500	2,477	35,00	8,038	0	0	0,000001	0,000000	0,000000

J. Critérios de Estabilidade da Segunda Geração: Descrição Matemática

Guinada brusca

Primeiro nível

O primeiro nível de verificação desse modo de falha é baseado no número de Froude e no comprimento do navio, conforme apresentado a seguir:

$$V_s \geq \frac{1,8 \sqrt{L}}{\cos(180^\circ - \alpha)} \quad (155)$$

Sendo:

$$V_s = \text{velocidade do navio em nós}$$

$$\alpha = \text{angulo de encontro da onda em graus}$$

Assumindo mar de proa, tem-se que $\alpha = 180^\circ$ e convertendo a equação para ser referente ao número de Froude:

$$F_n \geq \frac{1,8 \cdot 0,5144}{\sqrt{g}} = 0,296 \approx 0,3 \quad (156)$$

Dessa forma, os navios com V_s superior a $F_n = 0,3$ devem ser analisados mais profundamente quanto a esse fenômeno. Este é considerado como o limite inferior do surf-riding sobre qualquer condição inicial para navios convencionais em ondas severas. A análise de Melnikov compara exemplos de limites calculado para alguns navios, como apresentado na Figura 88. Esse resultado indica também que o pior comprimento de onda para ocorrer esse fenômeno é aquele comparável com o comprimento do navio. Isso significa que navios com grandes comprimentos necessitam de ondas compridas para ocorrer surf-riding, esse fato torna um fator limitante para a ocorrência de surf-riding, já que existe limites de comprimento de ondas. Dessa forma, o primeiro nível do critério de vulnerabilidade para ocorrência de surf-riding requer que o navio NÃO seja maior que 200 metros.

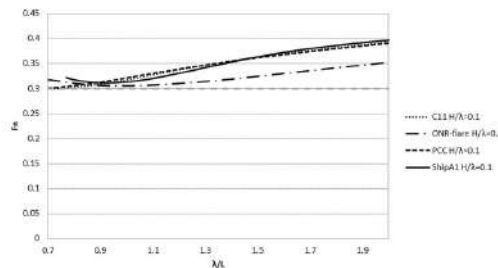


Figura 88- limites de surf-riding. Fonte: (IMO, 2016)

Segundo nível

O navio é considerado não vulnerável a sofrer falha de estabilidade de *Surf-riding/Broaching* se o valor de C calculado conforme abaixo for menor que R_{SR} .

$$C = \sum_{HS} \sum_{TZ} \left(W2(H_S, T_Z) \frac{\sum_{i=1}^{N_\lambda} \sum_{j=1}^{N_a} W_{ij} C2_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_\lambda} \sum_{j=1}^{N_a} W_{ij}} \right) \quad (157)$$

Sendo:

$$R_{SR} = 0,005 \quad (158)$$

$W2(H_S, T_Z)$ é o fator de peso do estado do mar a curto prazo (short-term sea state) obtido como valor fornecido pela Tabela 61, dividido pelo número de observações dados na tabela.

A fórmula de cálculo de W_{ij} é a função de densidade de probabilidade conjunta da inclinação da onda local (*local wave steepness*) e comprimento de onda local sob o estado de onda estacionário com um espectro de onda do tipo Pierson Moskowitz. O valor de W_{ij} deve ser calculado usando a equação abaixo:

$$W_{ij} = \frac{4\sqrt{g}}{\pi v} \frac{L^{5/2} T_{01}}{(H_S)^3} s_j^2 r_i^{3/2} \left(\frac{\sqrt{1+v^2}}{1+\sqrt{1+v^2}} \right) \Delta r \Delta s \exp \left[-2 \left(\frac{L r_i s_j}{H_S} \right)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \sqrt{\frac{g T_{01}^2}{2\pi r_i L}} \right)^2 \right\} \right] \quad (159)$$

Sendo:

$$v = 0,4256; \quad (160)$$

$$T_{01} = 1,086 T_Z \quad (161)$$

$$s_j = (H/\lambda)_j, \text{ variando de } 0,03 \text{ até } 0,15 \text{ como passo de } \Delta s = 0,0012 \quad (162)$$

$$r_i = (\lambda/L)_i, \text{ variando de } 1,0 \text{ até } 3,0 \text{ como passo de } \Delta r = 0,025 \quad (163)$$

O valor de $C2_{ij}$ é calculado para cada onda conforme a seguir:

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } Fn > Fn_{cr}(r_j, s_1) \\ 0, & \text{se } Fn \leq Fn_{cr}(r_j, s_1) \end{cases} \quad (164)$$

Sendo Fn_{cr} o número de Froude crítico correspondente ao limite de ocorrência de surf-riding.

$$Fn_{cr} = \frac{V_{cr}}{\sqrt{L \cdot g}} \quad (165)$$

Sendo V_{cr} a velocidade crítica (m/s) determinada através da solução da equação abaixo com o número de revoluções do propulsor crítico, n_{cr} .

$$T_e(V_{cr}; n_{cr}) - R(V_{cr}) = 0 \quad (166)$$

Sendo $R(V_{cr})$ a resistência do navio em águas calmas com o navio com velocidade igual a V_{cr} e $T_e(V_{cr}; n_{cr})$ o empuxo entregue pelo propulsor em águas calmas.

Para um navio com um hélice como propulsão principal, o empuxo do propulsor, $T_e(V; n)$, em águas calmas pode ser aproximado usando um polinômio de segunda ordem:

$$T_e(V; n) = (1 - t_p)\rho n^2 D_p^4 \{k_0 + k_1 J + k_2 J^2\} \quad (N) \quad (167)$$

Com V sendo a velocidade do navio em águas calmas em metros por segundo, o n o número de revoluções do propulsor, o t_p é o coeficiente de redução de empuxo aproximado, o w_p é o coeficiente de esteira aproximado, o D_p é o diâmetro do propulsor em metros, k_0, k_1, k_2 são os coeficientes de aproximação para o coeficiente aproximado de empuxo do hélice em águas calmas, o J é o coeficiente de avanço dado pela equação abaixo e o ρ é a massa específica da água salgada igual a 1025 quilogramas por metro cubico.

$$J = \frac{V(1 - w_p)}{nD_p} \quad (168)$$

No caso de um navio com mais de um hélice, o empuxo total pode ser calculado somando o efeito das hélices individuais calculadas como indicado acima.

Para um navio que utiliza propulsores que não sejam hélices, o empuxo do propulsor pode ser avaliado por um método adequado ao tipo de propulsor utilizado de acordo com a satisfação da Administração.

A resistência ao avanço do navio em águas calmas, $R(V)$, pode ser estimada por meio de testes de modelos geometricamente dimensionados e lei de escala padrão ou usando um método numérico aprovado pela Administração.

A curva de resistência ao avanço do navio em águas calmas, $R(V)$, é construída com base nos dados de resistência disponíveis usando uma aproximação polinomial que pode, mas não precisa, incluir termos até a 5ª potência:

$$R(V) \approx \sum_{i=0}^5 r_i V^i = r_0 + r_1 V^1 + r_2 V^2 + r_3 V^3 + r_4 V^4 + r_5 V^5 \quad (169)$$

Sendo $r_0, r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$ coeficientes de aproximação para a resistência em águas calmas.

O ajuste polinomial deve ser apropriado para garantir que a resistência está aumentando continuamente em função da velocidade na faixa apropriada. O ajuste polinomial para aproximar a curva de resistência requer cautela. Os pontos de dados disponíveis podem não se estender à velocidade de fase (celeridade) da onda mais rápida

considerada. Se for esse o caso, deve-se verificar a seguinte condição para todos os valores de velocidade do navio, u , até a velocidade de fase da onda mais rápida em consideração, V_{max} :

$$r_0 + r_1 + 2r_2V + 3r_3V^2 + 4r_4V^3 + 5r_5V^5 > 0 \quad (170)$$

Onde:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{3gL}{2\pi}} \quad (171)$$

O número crítico de rotação do propulsor correspondente ao limite para ocorrer surf-riding, n_{cr} (rps), pode ser calculado através da solução numérica da equação abaixo:

$$2\pi \frac{T_e(c_i, n_{cr}) - R(c_i)}{f_{ij}} + 8a_0n_{cr} + 8a_1 - 4\pi a_2 + \frac{64}{3}a_3 - 12\pi a_4 + \frac{1024}{15}a_5 = 0 \quad (172)$$

Onde:

$$T_e(c_i, n_{cr}) = \tau_0n_{cr}^2 + \tau_1c_in_{cr} + \tau_2c_i^2 = empuxo \quad (173)$$

$$a_0 = -\frac{\tau_1}{\sqrt{f_{ij}k_i(M + M_x)}} \quad (174)$$

$$a_1 = \frac{r_1 + 2r_2c_i + 3r_3c_i^2 + 4r_4c_i^3 + 5r_5c_i^4 - 2\tau_2c_i}{\sqrt{f_{ij}k_i(M + M_x)}} \quad (175)$$

$$a_2 = \frac{r_2 + 3r_3c_i + 6r_4c_i^2 + 10r_5c_i^3 - \tau_2}{k_i(M + M_x)} \quad (176)$$

$$a_3 = \frac{r_3 + 4r_4c_w + 10r_5c_w^2}{\sqrt{k_i^3(M + M_x)^3}} \sqrt{f_{ij}} \quad (177)$$

$$a_4 = \frac{r_4 + 5r_5c_i}{k_i^2(M + M_x)} f_{ij} \quad (178)$$

$$a_5 = \frac{r_5}{\sqrt{k_i^5(M + M_x)^5}} \sqrt{f_{ij}^3} \quad (179)$$

$$c_i = \sqrt{\frac{g}{k_i}} = \text{celeridade da onda} \quad (180)$$

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} = \text{número de ondas} \quad (181)$$

$$f_{ij} = \rho g k_i \frac{H_{ij}}{2} \sqrt{Fc_i^2 + FS_i^2} \quad (182)$$

$$Fc_i = \sum_{m=1}^N \Delta x_m S(x_m) \text{sen } kx_m e^{(-0,5k_i dx_m)} \quad (183)$$

$$FS_i = \sum_{m=1}^N \Delta x_m S(x_m) \text{cos } kx_m e^{(-0,5k_i dx_m)} \quad (184)$$

Sendo M a massa (kg) do navio, M_x a massa adicional do navio em surge (kg), que pode ser considerado 0,1M caso o valor não seja conhecido, x_m é a distância longitudinal (m) do centro de massa do navio até a m-th baliza em água calma, positiva para a proa, N o número de balizas (*stations*) e $S(x_m)$ é a área da porção submersa do navio da baliza m-th em águas calmas (m^2).

Vale ressaltar que os coeficientes a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 dependem do comprimento e altura de onda para cada caso de onda analisados.

Para um navio com um hélice como propulsor principal, os coeficientes de empuxo aproximados τ , são calculados conforme a seguir:

$$\tau_0 = \kappa_0 (1 - t_p) \rho D_p^4 \quad (185)$$

$$\tau_1 = \kappa_1 (1 - t_p) (1 - w_p) \rho D_p^3 \quad (186)$$

$$\tau_2 = \kappa_2 (1 - t_p) (1 - w_p)^2 \rho D_p^2 \quad (187)$$

Sendo:

$$K_T(J) = \kappa_0 + \kappa_1 J + \kappa_2 J^2 \quad (188)$$

A formulação dada acima baseia-se na análise de Melnikov, através da qual se pode identificar uma fronteira entre movimentos periódicos e não-periódicos de surge de navios. Aqui o movimento periódico indica o caso de um navio que é ultrapassado pelas ondas, e o movimento não periódico indica surf-riding, sob o qual um navio “corre” com uma onda.

O empuxo do hélice deve ser estimado utilizando-se testes de modelo geometricamente dimensionados e leis de escala ou usando um método numérico que seja o aceitável para a autoridade de homologação. A faixa do coeficiente de avanço do hélice deve cobrir toda a gama positiva do coeficiente de empuxo do hélice. Para um hélice, o empuxo do hélice pode ser aproximado usando uma aproximação polinomial de segunda ordem:

$$K_T(J) \approx \sum_{i=0}^2 \kappa_i J^i = \kappa_0 + \kappa_1 J + \kappa_2 J^2 \quad (189)$$

Sendo J , κ_0 , κ_1 , κ_2 conforme já definido no texto acima.

No caso de um navio com múltiplas hélices com o mesmo diâmetro e número de rotações, o empuxo global pode ser calculado somando o efeito das hélices individuais.

O coeficiente de redução de empuxo, t_p , deve ser avaliado usando modelos de testes geometricamente dimensionados e lei de escala padrão. Na ausência de dados de ensaio de modelos específicos do navio, podem ser feitas as seguintes aproximações:

Para navios mono hélice:

$$t_p = 0,1$$

Para hélice dupla:

$$t_p = 0,325C_B - 0,1185 \frac{D_p}{\sqrt{Bd}}$$

Essas aproximações para o coeficiente de redução de empuxo ainda estão em aberto, ou seja, o grupo do subcomitê de design e construção de navios da IMO, não chegou em um acordo em relação a essa formulação no último encontro, conforme pode ser visto no relatório de correspondência do grupo (IMO SDC 4/5/1/Add.2, 2016).

O coeficiente de esteira, w_p , deve ser avaliado utilizando-se testes de modelo geometricamente dimensionados e lei de escala padrão. Na ausência de dados de ensaio de modelos específicos de navio, a seguinte aproximação está sendo estudada pelo grupo de correspondência: $w_p = 0,1$. Podem ser utilizados métodos alternativos com o acordo da autoridade de homologação.

Estabilidade do navio na condição inoperante

Primeiro Nível

Para o primeiro nível do critério de vulnerabilidade de estabilidade do navio na condição inoperante, o critério ambiental contido na parte A seção 2.3 do IS Code 2008 da IMO (2008) deve ser usado, porém substituindo o fator s especificado na tabela 4.5.1 na MSC.1/Circ.1200, conforme a Figura 89.

Table 4.5.1: Wave steepness as a function of the full scale natural roll period

Table 2.3.4-4 – Values of factor s

T	s
≤ 6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
≥ 20	0.035

2008 IS Code – Part A

Deverá ser substituído por



Ship roll period T_R [s]	Wave steepness $s = H/\lambda$
<6	0.100
6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
20	0.032
22	0.028
24	0.025
26	0.023
28	0.021
30	0.020
>30	0.020

MSC.1/Circ.1200 – Chapter 4

Figura 89- Substituição da tabela do fator de inclinação s

Segundo Nível

Várias suposições são necessárias para realizar a avaliação de vulnerabilidade de nível 2. As principais suposições são:

1. Assume-se que o navio se encontra em condição de navio inoperante (dead Ship Condition) em ondas irregulares e rajadas de vento durante um determinado tempo de exposição;
2. Assume-se que a onda e o vento se propagam na mesma direção e que a profundidade da água é infinita;
3. Presume-se que o navio permanece em uma faixa de vento e onda;
4. O estado de vento é caracterizado por uma velocidade de vento média e um espectro de rajada;
5. O estado do mar é caracterizado por um espectro de elevação de onda e as ondas são assumidas como sendo crista longa (*long crested*); e
6. O movimento de roll do casco é modelado como um sistema de um grau de liberdade (1-DOF).

Um navio é considerado **não** vulnerável a modo de falha de estabilidade do navio em condição de navio inoperante se:

$$C \leq R_{DS0} \quad (190)$$

Com:

$$R_{DS0} = [0,06] \text{ ou } [0,04]; \quad (191)$$

C é calculado conforme especificado a seguir:

$$C = \sum_{i=1}^N W_i C_{S,i} \quad (192)$$

O índice $C_{S,i}$ é uma medição da probabilidade do navio exceder o ângulo de banda especificado pelo menos uma vez no tempo de exposição considerado como sendo de 3600 segundos (1 hora), levando em consideração o ângulo relativo efetivo entre o casco e as ondas.

Na determinação das características de movimento de roll a curto prazo, assume-se que o navio tem uma banda inicial devido à ação de uma pressão de vento constante e que ele possui um movimento de roll devido à ação de ondas de través (*beam waves*) e à rajada de vento.

Supõe-se que o ângulo de banda constante seja aproximado pelo ângulo de banda devido ao efeito do vento constante. Supõe-se que o movimento de roll do casco ocorra em torno deste ângulo, e o movimento relativo em relação a este ângulo é assumido como sendo descrito pela seguinte equação linear:

$$\ddot{x} + 2\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) \cdot \dot{x} + \omega_{0,e}^2(\phi_s) \cdot x = \omega_0^2 \cdot m(t) \quad (193)$$

$$\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) = \mu + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \beta \cdot \sigma_{\dot{x}} + \frac{3}{2} \delta \sigma_{\dot{x}}^2 \quad (194)$$

$$m(t) = \frac{M(t)}{W\overline{GM}} \quad (195)$$

Sendo: $x = \phi - \phi_s$ (*rad*) o ângulo de roll em relação ao ângulo de banda estático ϕ_s devido à ação da pressão de vento constante; $\sigma_{\dot{x}}$ (*rad/s*) o desvio padrão da velocidade de roll; $\mu_e(\sigma_{\dot{x}})$ (*1/s*) o coeficiente linear de amortecimento de roll equivalente dependente de $\sigma_{\dot{x}}$; μ (*1/s*) o coeficiente linear de amortecimento de roll; β (*rad/s*) o coeficiente quadrático de amortecimento de roll; ω_0 (*rad/s*) a frequência natural transversal de roll (up-right); $\omega_{0,e}(\phi_s)$ (*rad/s*) a frequência natural de roll equivalente, que leva em consideração as não linearidades do braço de endireitamento perto de ϕ_s ; $M(t)$ (*N.m*) o momento de roll dependente do tempo devido à ação de ondas e rajadas de vento, calculado conforme apresentado mais adiante; W (*N*) a força de deslocamento do navio; e \overline{GM} (*m*) a altura metacêntrica transversal.

Para se obter o índice de falhas de curto prazo C_S aplica-se o seguinte procedimento:

1. Cálculo do momento de inclinação do vento constante considerando o efeito de força de deriva e determinação do ângulo de banda estático (permanente)

ϕ_s , ângulo de perda de estabilidade para sotavento $\phi_{VW,+}$ e para barlavento $\phi_{VW,-}$ sob a ação de vento constante considerando o momento de endireitamento do navio;

2. Cálculo da derivada do braço de endireitamento GZ em ϕ_s ("Altura metacêntrica local" \overline{GM}_{res}) e correção da frequência natural de roll;
3. Cálculo do espectro do momento total de roll devido à ação das ondas e rajada de vento;
4. Solução da equação do movimento de roll linearizada no domínio da frequência utilizando o método espectral padrão que representa o amortecimento não linear com o objetivo de obter o espectro de movimento de roll;
5. Determinação do desvio padrão de roll e da frequência de cruzamento de zero positivo utilizando o espectro de roll determinado;
6. Cálculo dos ângulos críticos para o cálculo do índice de falha da estabilidade do navio em condição de navio inoperante usando a abordagem da "área equivalente"; e
7. Cálculo do índice final de falha de estabilidade do navio em condição de navio inoperante para o tempo de exposição especificado.

A explicação de como cada passo é calculado é dado a seguir:

1º Passo) Cálculo do momento de inclinação constante devido à ação do vento constante e da deriva e ângulos relevantes associados

O braço de emborcamento devido ao vento, $\bar{l}_{wind,tot}$ (m), é um valor constante para todos os ângulos de banda e é calculado conforme a formulação a seguir:

$$\bar{l}_{wind,tot} = \frac{\bar{M}_{wind,tot}}{W} \quad (m) \quad (196)$$

Sendo W o deslocamento do navio e $\bar{M}_{wind,tot}$ (N.m) o momento de inclinação constante devido ao vento, dado por:

$$\bar{M}_{wind,tot} = \frac{1}{2} \rho_{air} U_w^2 C_m A_L Z \quad (Nm) \quad (197)$$

$$\rho_{air} = 1,222 \text{ kg/m}^3 \quad (198)$$

$$U_w = \left(\frac{H_s}{0,06717} \right)^{2/3} \quad (m/s) \quad (199)$$

Sendo que ρ_{air} é a massa específica do ar, U_w é a velocidade do vento, C_m é o coeficiente do momento de inclinação, que na ausência de informação deve ser

considerado igual a 1,22 ou determinando por outro método, a contento da Administração, A_L é a área lateral projetada da porção do navio e deck de carga acima da linha d'água, Z é a distância vertical do centro de A_L até o centro da área lateral abaixo da linha d'água ou aproximadamente até o ponto de metade do calado médio d e H_s é a Altura de onda significativa da condição ambiental de curto prazo.

O ângulo de banda estática (ou permanente) ϕ_s é o ângulo de equilíbrio sobre a ação de vento constante calculado como a primeira interseção entre a curva de restauração GZ e a curva de emborcamento devido a ação do vento $\bar{l}_{wind,tot}$, conforme definido acima e conforme pode ser visto na Figura 90.

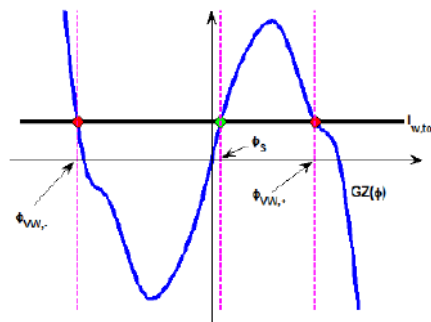


Figura 90- Representação esquemática do ângulo de equilíbrio estável/ instável
Fonte: (IMO,2016)

Quando o ângulo de banda estática (ou permanente) ϕ_s não pode ser encontrado, não são necessários mais cálculos e o índice CS será igual a 1.

Os ângulos $\phi_{vw,+}$ e $\phi_{vw,-}$ são os ângulo de perda de estabilidade, para sotavento ($\phi_{vw,+}$) e para barlavento ($\phi_{vw,-}$) respectivamente, sobre a ação do vento $\bar{l}_{wind,tot}$, conforme definido acima e conforme pode ser visto na Figura 90.

2º Passo) Cálculo da derivada de \overline{GZ} em ϕ_s (altura metacêntrica local \overline{GM}_{res}) e correção da frequência natural de roll

A altura metacêntrica residual \overline{GM}_{res} (m) é a derivada da curva do braço de endireitamento em ϕ_s , conforme apresentado na Figura 91. Já que o momento de inclinação devido ao vento constante é assumido como constante, tem-se:

$$\overline{GM}_{res}(\phi_s) = \frac{d(\overline{GZ} - \bar{l}_{wind,tot})}{d\phi} = \frac{d(\overline{GZ})}{d\phi} \quad (200)$$

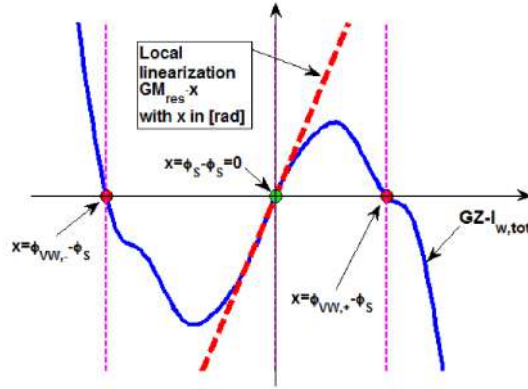


Figura 91- Braço de endireitamento residual próximo do ângulo de banda estático sob a ação de vento constante. Fonte: (IMO:2016)

A frequência natural de roll modificada $\omega_{0,e}(rad/s)$ perto do ângulo de equilíbrio ϕ_s é determinado conforme:

$$\omega_{0,e}(\phi_s) = \omega_0 \sqrt{\frac{\overline{GM}_{res}(\phi_s)}{GM}} \quad (201)$$

3º Passo) Cálculo do espectro do momento total de roll devido à ação de ondas e rajadas de vento

O espectro $S_{\alpha\alpha}(rad^2/(rad/s))$ da inclinação da onda é calculado conforme a seguir:

$$S_{\alpha\alpha} = \frac{\omega^4}{g^2} S_{ZZ}(\omega) \quad (202)$$

Onde $\omega(rad/s)$ é a frequência de oscilação da onda e $g = 9,81(m/s^2)$ é a aceleração da gravidade.

O espectro $S_{\alpha\alpha,c}(rad^2/(rad/s))$ da inclinação da onda efetiva é calculado conforme a seguir:

$$S_{\alpha\alpha,c}(\omega) = r^2(\omega) S_{\alpha\alpha}(\omega) \quad (203)$$

Onde $r(\omega)$ é uma função da inclinação da onda efetiva com função da frequência oscilatória da onda.

O espectro $S_{M_{Waves}}(rad^2/(rad/s))$ do momento devido à ação de ondas, como função da frequência oscilatória da onda $\omega(rad/s)$ é calculado conforme a seguir:

$$\begin{aligned} S_{M_{Waves}}(\omega) &= (W \cdot \overline{GM}_{res}(\phi_s))^2 \cdot S_{\alpha\alpha,c}(\omega) \\ &= (r(\omega)W \cdot \overline{GM}_{res}(\phi_s))^2 \cdot S_{\alpha\alpha,c}(\omega) \end{aligned} \quad (204)$$

O espectro $S_{M_{Wind,tot}}$ ($rad^2/(rad/s)$) do momento devido à ação a rajada de vento, como função da frequência oscilatória da onda ω (rad/s) é calculado conforme a seguir:

$$S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega) = [\rho_{air} U_w C_m A_L Z]^2 \cdot \chi^2(\omega) S_v(\omega) \quad (205)$$

A função de admissão aerodinâmica padrão deve ser calculada como:

$$\chi(\omega) = 1 \quad (206)$$

O espectro S_M ($rad^2/(rad/s)$) do momento total devido à ação de ondas e da rajada de vento, como função da frequência oscilatória da onda ω (rad/s) é calculado conforme a seguir:

$$S_M(\omega) = S_{M_{Waves}}(\omega) + S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega) \quad (207)$$

4º Passo) Determinação do espectro da oscilação de roll e das derivadas

O desvio padrão da velocidade de roll $\sigma_{\dot{x}}$ (rad/s) é obtido pela solução numérica da equação a seguir com respeito a $\sigma_{\dot{x}}$:

$$F(\sigma_{\dot{x}}) = 0 \quad (208)$$

Com:

$$F(\sigma_{\dot{x}}) = \sigma_{\dot{x}}^2 - \int_0^{\infty} \frac{\omega^2 \cdot \omega_0^4}{(\omega_{0,e}^2(\phi_s) - \omega^2)^2 + (2\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) \cdot \omega)^2} \cdot \frac{S_M(\omega)}{(W \cdot \overline{GM})^2} d\omega \quad (209)$$

$$\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) = \mu + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \beta \cdot \sigma_{\dot{x}} + \frac{3}{2} \delta \sigma_{\dot{x}}^2 \quad (210)$$

Utilizado o desvio padrão determinado acima $\sigma_{\dot{x}}$ (rad/s), o espectro S_x ($rad^2/(rad/s)$) do movimento de roll com relação ao ângulo ϕ_s é determinado através da seguinte formulação:

$$S_x(\omega) = H^2(\omega) S_m(\omega) \quad (211)$$

Com:

$$H^2(\omega) = \frac{\omega_0^4}{(\omega_{0,e}^2(\phi_s) - \omega^2)^2 + (2\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) \cdot \omega)^2} \quad (212)$$

$$S_m = \frac{S_M(\omega)}{(W \cdot \overline{GM})^2} \quad (213)$$

$$\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) = \mu + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \beta \cdot \sigma_{\dot{x}} + \frac{3}{2} \delta \sigma_{\dot{x}}^2 \quad (214)$$

Utilizando o espectro $S_x (rad^2/(rad/s))$ conforme determinado acima, o desvio padrão de roll, σ_ϕ , a frequência entre zeros ascendentes de roll, $\omega_{z,\phi}$, e o período, $T_{z,\phi}$, podem ser calculados conforme a seguir:

$$\sigma_\phi = \sqrt{m_0} \quad (215)$$

$$\omega_{z,\phi} = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (216)$$

$$T_{z,\phi} = \frac{2\pi}{\omega_{z,\phi}} \quad (217)$$

Sendo:

$$m_0 = \int_0^\infty S_x(\omega) d\omega \quad (218)$$

$$m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_x(\omega) d\omega \quad (219)$$

5º Passo) Determinação do índice de falha de estabilidade da condição de navio inoperante de curto prazo C_S

O cálculo índice de falha de estabilidade da condição de navio inoperante de curto prazo C_S é feito levando em consideração um tempo de exposição de 3600 segundo (1 hora).

O índice de falha de estabilidade da condição de navio inoperante de curto prazo C_S representa uma medição de probabilidade de o navio exceder um ângulo específico para barlavento (*windward*) ou para sotavento (*leeward*) pelo menos uma vez no tempo de exposição considerado. O índice C_S varia de 0 até 1.

Quando, segundo o passo 1, o ângulo estático ϕ_S , não pode ser encontrado, não é necessário nenhum outro cálculo, já que se assume que o navio perdeu a estabilidade na condição de curto prazo considerada, e o índice C_S é considerado igual a 1.

O ângulo de falha para sotavento $\phi_{fall,+}$ é considerado conforme abaixo:

$$\phi_{fall,+} = \min\{\phi_{VW,+}, \phi_{crit,+}\} \quad (220)$$

Onde o ângulo $\phi_{crit,+}$ é o ângulo crítico para sotavento (positivo), definido como o mínimo entre o ângulo de alagamento $\phi_{f,+}$ para sotavento e 50 graus.

$$\phi_{crit,+} = \min\{\phi_{f,+}, 50 \text{ graus}\}$$

O ângulo de falha para barlavento $\phi_{fall,-}$ é considerado conforme abaixo:

$$\phi_{fall,-} = \max\{\phi_{VW,-}, \phi_{crit,-}\} \quad (221)$$

Onde o ângulo $\phi_{crit,-}$ é o ângulo crítico para barlavento (tipicamente negativo), definido como o máximo entre o ângulo de alagamento $\phi_{f,-}$ para barlavento (<0) e -50 graus.

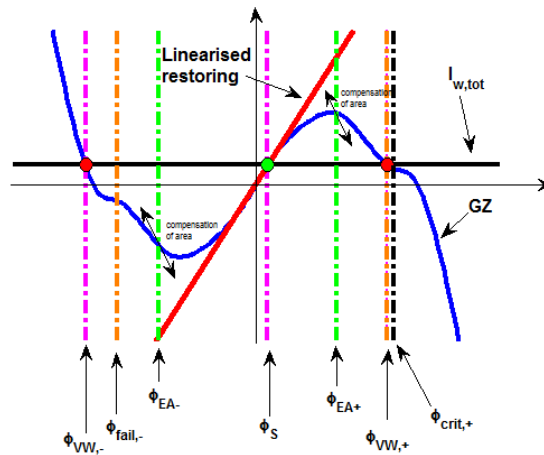
$$\phi_{crit,-} = \max\{\phi_{f,-}, -50 \text{ graus}\}$$

A fim de ter em conta a forma real da curva do braço de endireitamento, são definidos dois ângulos de limite virtuais para sotavento e barlavento, de tal modo que a área sob a curva do braço de endireitamento residual real e sob a curva do braço de endireitamento residual linearizada são as mesmas, conforme a Figura 92. Esses ângulos de limite virtual de "área equivalente" devem ser calculados da seguinte forma:

$$\text{Barlavento: } \phi_{EA-} = \phi_S - \sqrt{\frac{-2}{\overline{GM}_{res}(\phi_S)} \cdot \int_{\phi_{fall,-}}^{\phi_S} \overline{GM}_{res}(\xi) d\xi} \quad (222)$$

$$\text{Sotavento: } \phi_{EA+} = \phi_S + \sqrt{\frac{2}{\overline{GM}_{res}(\phi_S)} \cdot \int_{\phi_S}^{\phi_{fall,+}} \overline{GM}_{res}(\xi) d\xi} \quad (223)$$

$$\overline{GM}_{res}(\phi) = \overline{GZ}(\phi) - \bar{l}_{wind,tot} \quad (224)$$



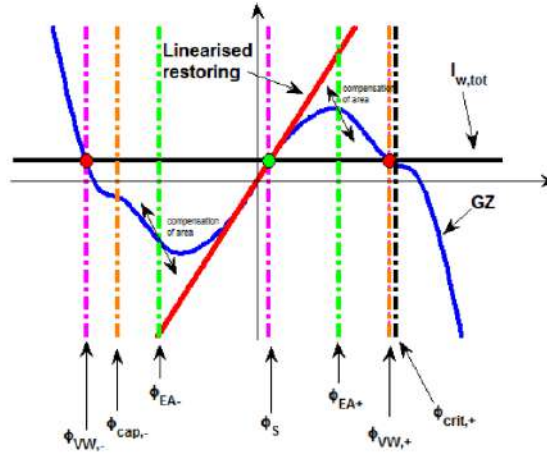


Figura 92 - Ângulos relevantes para o cálculo do índice de falha de estabilidade usando a abordagem de “área equivalente”. Fonte (IMO, 2016)

O índice de falha de estabilidade da condição de navio inoperante de curto prazo C_S , para o tempo de curto prazo considerado, é finalmente calculado como:

$$C_S = 1 - e^{(-\lambda_{EA} T_{exp})}$$

Sendo:

$$\lambda_{EA} = \frac{1}{T_{z,C_S}} \left[e^{\left(\frac{-1}{2RI_{EA+}^2} \right)} + e^{\left(\frac{-1}{2RI_{EA-}^2} \right)} \right] \quad (1/s); \quad (225)$$

$$RI_{EA+} = \frac{\sigma_{C_S}}{\Delta\phi_{res,EA+}} \quad (226)$$

$$RI_{EA-} = \frac{\sigma_{C_S}}{\Delta\phi_{res,EA-}} \quad (227)$$

$$\Delta\phi_{res,EA+} = \phi_{EA+} - \phi_S \quad (rad); \quad (228)$$

$$\Delta\phi_{res,EA-} = \phi_S - \phi_{EA-} \quad (rad); \quad (229)$$

Onde o período aparente médio entre zeros ascendentes do movimento de roll efetivo relativo, T_{z,C_S} , e o desvio padrão correspondente, σ_{C_S} , são determinados usando o espectro do movimento de roll efetivo sobre a ação do vento e da onda, de acordo com a formulação a seguir:

$$\sigma_{C_S} = (m_0)^{1/2} \quad (230)$$

$$T_{z,C_S} = 2\pi(m_0/m_2)^{1/2} \quad (231)$$

Sendo:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (232)$$

$$m_2 = \int_0^{\infty} \omega^2 S(\omega) d\omega \quad (233)$$

$$S(\omega) = H_{rel}^2(\omega) \cdot S_{\alpha\alpha,c}(\omega) + H^2(\omega) \frac{S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega)}{(W \cdot \overline{GM})^2} \quad (234)$$

$$H_{rel}^2(\omega) = \frac{\omega^4 + (2 \cdot \mu_E \cdot \omega)^2}{(\omega_{0,e}^2(\phi_s) - \omega^2)^2 + (2 \cdot \mu_E \cdot \omega)^2} \quad (235)$$

$$H^2(\omega) = \frac{\omega_0^4}{(\omega_{0,e}^2(\phi_s) - \omega^2)^2 + (2 \cdot \mu_E \cdot \omega)^2} \quad (236)$$

A estimativa do amortecimento de roll é feita de acordo com o especificado no Apêndice C.

7º Passo: Estimativa da inclinação (declividade) efetiva das ondas

A fim de realizar uma previsão das características do movimento do roll de acordo com o primeiro passo, a função efetiva da inclinação da onda (*efetive wave slope*) precisa ser especificada para o navio considerado, na condição de carregamento considerada.

Na ausência de informações suficientes, deve-se utilizar a metodologia padrão relatada abaixo. Contudo, podem também ser utilizados métodos que, para satisfação da Administração, sejam considerados pelo menos equivalentemente fiáveis. Tais métodos de previsão alternativos podem ser baseados em cálculos ou testes experimentais, para satisfação da Administração.

A metodologia padrão para a estimativa da inclinação de onda efetiva é aplicável apenas aos navios mono casco padrão. Para um navio que, na opinião da Administração, não se enquadre nesta categoria, devem ser aplicados métodos alternativos aprovados pela Administração.

A metodologia padrão para a estimativa da função de declividade da onda é baseada nas seguintes hipóteses:

1. A parte submersa de cada seção transversal do navio é substituída por uma “seção submersa equivalente” tendo, geralmente, a mesma boca na linha d’água e mesma área submersa da seção original, porém:
 - a. A seção de boca igual a zero na linha d’água, assim como as regiões de bulbo são negligenciadas; e
 - b. O calado da “seção submersa equivalente” é limitado ao calado do navio;

2. O coeficiente da declividade da onda efetiva para cada frequência de onda é determinado utilizando a “seção submersa equivalente” considerando somente a pressão de onda linear não perturbada; e
3. Para cada seção, uma fórmula é aplicada, que é exato para retângulos.

Para cada posição longitudinal x ao longo do casco, o calado $T_{eq}(x)$ (m), a boca $B_{eq}(x)$ (m) e a área seccional submersa $A_{eq}(x)$ (m^2) do “casco equivalente” são calculados conforme a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se: } A(x) > 0 \text{ e } B(x) > 0: \\ \text{De outra forma:} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Se } \frac{A(x)}{B(x)} \leq T(x) \text{ então} \\ \text{Se } \frac{A(x)}{B(x)} > T(x) \text{ então} \\ \begin{cases} A_{eq}(x) = 0 \\ B_{eq}(x) = 0 \\ T_{eq}(x) = 0 \end{cases} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} A_{eq}(x) = A(x) \\ B_{eq}(x) = A(x) \\ T_{eq}(x) = \frac{A(x)}{B(x)} \\ T_{eq}(x) = T(x) \\ B_{eq}(x) = B(x) \\ A_{eq}(x) = B_{eq}(x) \cdot T_{eq}(x) \end{array} \right. \quad (237)$$

Onde $A(x)$ (m^2), $B(x)$ (m) e $T(x)$ (m) são, respectivamente, a área seccional submersa, a boca seccional submersa na linha d'água e o calado seccional do navio.

O volume submerso ∇_{eq} (m^3), o raio metacêntrico $BM_{T,eq}$ (m), a posição vertical do centro de flutuação KB_{eq} (m) e a posição vertical do centro de gravidade KG_{eq} (m) do “casco equivalente” são calculados conforme a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla_{eq} = \int_L A_{eq}(x) dx \\ BM_{T,eq} = \frac{1}{\nabla_{eq}} \int_L \frac{1}{12} B_{eq}^3(x) dx \\ KB_{eq} = T + \frac{1}{\nabla_{eq}} \int_L \frac{-T_{eq}(x)}{2} A_{eq}(x) dx \\ KG_{eq} = KB_{eq} + BM_{T,eq} - \overline{GM} \end{array} \right. \quad (238)$$

Onde \overline{GM} (m) é a altura metacêntrica transversal e T (m) é o calado na meia nau (no ponto da quilha). As posições verticais KB_{eq} (m) e KG_{eq} (m) são definidas relação a linha de quilha do navio.

O coeficiente da declividade efetiva da onda $r(\omega)$ como função da frequência de oscilação ω (rad/s) é calculado conforme a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l}
r(\omega) = \left| \frac{\int_L C(x) dx}{\nabla_{eq} GM} \right| \quad (239) \\
\text{Onde:} \\
0 \text{ se } A_{eq}(x) = 0 \text{ e } B_{eq}(x) = 0 \\
C(x) = \left\{ \begin{array}{l}
A_{eq}(x) \cdot [K_1(x) + K_2(x) + F_1(x) \cdot OG_{eq}] \text{ de outra forma} \\
e \\
k_w = \frac{\omega^2}{g} \\
OG_{eq} = KG_{eq} - T \\
K_1(x) = \frac{\text{sen}\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right) \cdot (1 + k_w \cdot T_{eq}(x)) \cdot e^{-k_w \cdot T_{eq}(x)} - 1}{\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right) \cdot k_w^2 \cdot T_{eq}} \\
K_2(x) = -\frac{e^{-k_w \cdot T_{eq}(x)}}{k_w^2 \cdot T_{eq}(x)} \left[\cos\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right) - \frac{\text{sen}\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)}{\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)} \right] \\
F_1(x) = -\frac{e^{-k_w \cdot T_{eq}(x)} \cdot \text{sen}\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)}{k_w \cdot T_{eq}(x) \cdot \left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)}
\end{array} \right.
\end{array} \right.$$

Aceleração Excessiva

Esse modo de falha é aplicado para navios que cumpram com os seguintes requisitos, para cada condição de carregamento:

1. Distância da linha d'água para a localização mais alta, ao longo do comprimento do navio, onde possa ter presença de passageiros ou tripulação, maior que 70% da boca do navio; e
2. Altura metacêntrica maior que 8% da boca do navio

Primeiro nível

O navio é considerado não vulnerável ao modo de falha de estabilidade por Aceleração Excessiva, para cada condição de carregamento e para cada localização ao longo do comprimento do navio, onde tripulação ou passageiro possam estar presentes, se:

$$\phi k_L \left(g + \frac{4\pi^2 h}{T_\phi^2} \right) < R_{EAI} \quad (240)$$

Sendo R_{EAI} o parâmetro de referência para avaliar a ocorrência de aceleração excessiva, ϕ a amplitude característica de roll e k_L o fator que leva em consideração a ação simultânea dos movimentos de roll, yaw e pitch, definidos conforme a seguir:

$$R_{EAI} = [5,3] \text{ ou } [8,9] \text{ ou } [8,69 \text{ ou menor}](m/s^2) \quad (241)$$

$$\phi = 4,43 \frac{r s}{\delta_\phi^{0,5}} \quad (242)$$

$$k_L = \begin{cases} 1,25 - 0,625 x/L & \text{se } x < 0,2L; \\ 1,0 & \text{se } 0,2L < x < 0,65L; \\ 0,527 + 0,727 x/L & \text{se } x > 0,65L; \end{cases} \quad (243)$$

O parâmetro x é a distância longitudinal do local onde passageiros ou tripulantes podem estar presentes até a perpendicular de ré; o h é a altura acima do eixo de roll do local onde passageiros ou tripulantes podem estar; e o T_ϕ é o período natural de roll, definido no Apêndice E. O parâmetro r é definido conforme a seguir:

$$r = \frac{K_1 + K_2 + (OG)(F)}{\frac{B^2}{12C_B d} - \frac{C_B d}{2} - OG}; \quad (244)$$

$$K_1 = g\beta T^2 (\tau + \tau\tilde{T} - 1/\tilde{T})/4\pi^2;$$

$$K_2 = g\tau T^2 (\beta - \cos \tilde{B})/4\pi^2;$$

$$OG = KG - d;$$

$$F = \beta(\tau - 1/\tilde{T});$$

$$\beta = \text{sen}(\tilde{B})/\tilde{B};$$

$$\tau = e^{(-\tilde{T})}/\tilde{T};$$

$$\tilde{B} = 2\pi^2 B/(gT^2)$$

$$\tilde{T} = 2\pi^2 C_B d/(gT^2)$$

Sendo s a declividade da onda.

Para a definição do h , o eixo de roll pode ser considerado localizado no ponto médio entre a linha d'água e a posição vertical do centro de gravidade.

O cálculo do decremento logarítmico do roll não dimensional é fornecido no SDC 4/5/1 anexos 5 (IMO SDC 4/5/1/Add.4, 2016), conforme a seguir:

$$\delta_\phi = 0,5\pi R_{PR} \quad (245)$$

$$R_{PR} = \begin{cases} 1,87, & \text{se o navio tiver bolina, e, se não,} \\ 0,17 + 0,425 \left(\frac{100 A_K}{LB} \right), & \text{se } C_m \geq 0,96; \\ 0,17 + (10,625C_m - 9,775) \left(\frac{100 A_K}{LB} \right), & \text{se } 0,94 < C_m < 0,96; \\ 0,17 + 0,2125 \left(\frac{100 A_K}{LB} \right), & \text{se } C_m \leq 0,94 \end{cases} \quad (246)$$

O valor de $\left(\frac{100 A_K}{LB} \right)$ não pode exceder a 4

Sendo C_m o coeficiente de seção mestra para a condição de carregamento em consideração; A_K a área projetada total de todas as bolinas.

Segundo nível

O navio é considerado não vulnerável ao modo de falha de estabilidade por Aceleração Excessiva, para cada condição de carregamento e para cada localização ao longo do comprimento do navio, onde tripulação ou passageiro possam estar presentes, se R_{EA2} é maior que C .

$$C < R_{EA2} \quad (247)$$

Sendo:

$$R_{EA2} = [1,1 \cdot 10^{-4}][0,001][0,0281 \text{ ou acima}][0,43 \text{ ou acima}] \quad (248)$$

C é o índice de probabilidade de longo prazo que mede a vulnerabilidade do navio ao modo de falha de aceleração excessiva para a condição de carregamento e local em consideração baseados na probabilidade de ocorrência de curto prazo de condições ambientais, como calculado a seguir:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N W_i C_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (249)$$

W_i é o fator de peso para a condição de onda de curto prazo e C_i é o índice de falha por aceleração excessiva a curto prazo para a condição de carregamento e posição em consideração e para a condição ambiental de curto prazo sob consideração e N é o número de condições de ondas consideradas.

O índice de falha por aceleração excessiva a curto prazo para a condição de carregamento e posição em consideração e para a condição ambiental de curto prazo sob consideração é a medição da probabilidade de o navio exceder a uma aceleração lateral

especificado pelo menos uma vez no tempo de exposição considerado, calculado de acordo com a formulação a seguir:

$$C_i = e^{\{-R_2^2/(2\sigma_i^2)\}} \quad (250)$$

Sendo $R_2 = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ e σ_i^2 é a variância da aceleração lateral quando a velocidade do navio é zero e em mar de través (beam seaway).

Para o cálculo da amplitude de roll é adotado um modelo simplificado de um grau de liberdade:

$$I_{xx}\ddot{\theta} + B_\theta\dot{\theta} + C_\theta\theta = M_{FK} \quad (251)$$

Sendo $\theta(\text{rad})$, $\dot{\theta}(\text{rad/s})$, $\ddot{\theta}(\text{rad/s}^2)$ o ângulo de roll, velocidade de roll e aceleração de roll, respectivamente. I_{xx} é o momento de inércia de roll, incluindo o momento de inércia adicional de roll, B_θ é o coeficiente de amortecimento de roll, M_{FK} é o momento de excitação de Froude-Krylov e C_θ é o coeficiente da força de restauração igual a:

$$C_\theta = mgGM \quad (252)$$

O ângulo de roll pode ser descrito por:

$$\theta = \theta_a e^{i\omega_e t} \quad (253)$$

Onde θ_a (rad) é a amplitude de roll e ω_e (rad/s) é a frequência de encontro.

Desprezando o efeito de difração, a amplitude do momento de excitação pode ser escrita como:

$$M_{FK} = (a + bi)e^{i\omega_e t} \quad (254)$$

Os parâmetros a e b são a parte real e a parte imaginária do momento de excitação de roll, calculados usando as hipóteses de Froude-Krylov e desprezando o momento de difração através da integração direta da pressão incluindo a pressão hidrostática e a pressão devido à velocidade das partículas (efeito Smith) em ondas de través (*beam wave*) sobre a superfície média do casco molhado do navio.

A investigação de acidentes como os do CMV Chicago Express indica que a velocidade de avanço era muito baixa (2 a 4 nós) no momento dos acidentes. As razões são, primeiro, aumento da resistência devido ao vento, ondas e grandes ângulos de deriva e, segundo eficiência de propulsão reduzida em ondas. Por conseguinte, não parece demasiado conservador desprezar o efeito da velocidade de avanço tanto na frequência de encontro como no amortecimento do roll, logo:

$$Fn = 0 \quad (255)$$

$$\omega_e = \omega$$

Logo a amplitude de roll $\vartheta_a(\omega)$ em ondas regulares de travess pode ser calculada como:

$$\vartheta_a(\omega) = (\vartheta_r^2 + \vartheta_i^2)^{0,5} \quad (256)$$

$$\vartheta_r = \frac{a(C_\vartheta - I_{xx}\omega_e^2) + bB_\vartheta\omega_e}{(C_\vartheta - I_{xx}\omega_e^2)^2 + (B_\vartheta\omega_e)^2} \quad (257)$$

$$\vartheta_i = \frac{b(C_\vartheta - I_{xx}\omega_e^2) - aB_\vartheta\omega_e}{(C_\vartheta - I_{xx}\omega_e^2)^2 + (B_\vartheta\omega_e)^2} \quad (258)$$

Sendo m a massa do navio, I_{xx} o momento de inércia, B_ϑ o coeficiente linear equivalente de amortecimento de roll (Nms) e T_r o período natural de roll.

Levando em consideração a aceleração vertical e o movimento de yaw, assim como a posição longitudinal da localização em consideração, a aceleração lateral, $a_y^*(\omega)$ (m/s^2), é definida como sendo função da frequência de encontro como a seguir:

$$a_y^*(\omega) = K_L(g \text{ sen}\vartheta_a + h\omega^2\vartheta_a) \quad (259)$$

Onde K_L é o fator adimensional que leva em consideração a aceleração vertical e o movimento de yaw e depende da posição longitudinal da localização considerada. O h (m) é a altura do passadiço (*bridge deck*) acima do eixo de roll e ϑ_a (rad) é a amplitude de roll em ondas regulares de través de frequência ω ($\frac{rad}{s}$).

O valor da raiz quadrática média da aceleração lateral é:

$$\sigma = \sqrt{m_0} \quad (260)$$

Sendo:

$$m_0 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} |a_y(\omega)|^2 D(\beta - \pi/2) S_{ZZ}(\omega) d\omega d\beta \quad (261)$$

Sendo $D(\beta - \pi/2)$ a função de propagação não dimensional da energia do mar (*non-dimensional seaway energy spreading function*), β é a direção da onda e $S_{ZZ}(\omega)$ (m^2s/rad) o espectro da frequência do mar. A função de propagação não dimensional da energia do mar é calculada conforme a seguir:

$$D(\beta - \pi/2) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2(\beta - \pi/2) & \text{se } |\beta - \pi/2| < \pi/2 \\ 0 & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (262)$$

Para simplificar o cálculo, os operadores de amplitude de resposta não-dimensional de aceleração lateral são calculados em ondas de crista longa (*long-crested*

waves); para considerar a influência de ondas de crista curta multiplica-se por um fator de redução de 0,75. O σ^2 é calculado conforme a seguir:

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} |a_y(\omega)|^2 D(\beta - \pi/2) S_{ZZ}(\omega) d\omega d\beta \\ &\approx 0,75 \int_{\omega_1}^{\omega_2} |a_y(\omega)|^2 S_{ZZ}(\omega) d\omega\end{aligned}\quad (263)$$

Sendo:

$$\omega_2 = \min((25/T_r); 2,0) \text{ (rad/s)} \quad (264)$$

$$\omega_1 = \max((0,5/T_r); 0,2) \text{ (rad/s)}$$

Para o cálculo da resposta de roll em cada mar, é necessário um coeficiente linear equivalente de roll linear equivalente B_θ . Para a definição do amortecimento linear equivalente de roll em ondas irregulares, pode ser utilizado um método de linearização estocástica equivalente; neste caso, o coeficiente equivalente de amortecimento do roll linear em cada mar irregular corresponde à amplitude do roll de:

$$\vartheta_a = 0,3T_r\sigma_{\dot{\theta}} \quad (265)$$

Em um teste de decaimento de roll, onde $\sigma_{\dot{\theta}}$ é a raiz quadrada da variância da velocidade angular do roll no mar considerado. Como o amortecimento linear equivalente depende dos movimentos do roll, terá de ser usado um procedimento iterativo para cada mar. Alternativamente, o coeficiente de amortecimento do roll linear equivalente pode ser definido na amplitude do roll de 15 graus.

Os parâmetros a e b podem ser calculados conforme a seguir:

$$\begin{aligned}a &= \rho g \iint_{S_H} e^{k_0 z} \cos(k_0 y) n_4 dS \\ b &= -\rho g \iint_{S_H} e^{k_0 z} \sin(k_0 y) n_4 dS\end{aligned}\quad (266)$$

Onde g é a aceleração a gravidade, ρ é a massa específica da água do mar, k_0 é o número de ondas, x, y e z são as coordenadas da superfície média do casco molhado do navio; S_H é a superfície média do casco molhado e n_4 é o vetor normal e roll. O número de ondas é calculado por:

$$k_0 = \frac{\omega^2}{g} \quad (267)$$

Para cascos de navio lateralmente simétricos, as fórmulas acima podem ser simplificadas como se segue:

$$a = 0$$

(268)

$$b = mgGMr \left(\frac{\omega^2}{g} \right)$$

Referência Bibliográfica

- ABS " Guide for the Assessment of Parametric Roll Resonance in the Design of Container Carriers ". *American Bureau of Shipping*, 701-710, Houston, TX, 70, 2004.
- BELENKY, V., DE KAT, J. O. , UMEDA, N., "Towards Performance-Based Criteria for Intact Stability ". *Marine Tech*, 45(2):101-123, 2008.
- BRUNSWIG, J., PEREIRA, R., " Validation of Parametric Roll Motion Predictions for a Modern Containership Design ". *International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, 157–168, Rio de Janeiro, Brazil, 25 -29 SETEMBRO 2006.
- BSU. *Fatal accident on board the CMV Chicago Express during Typhoon “Hagupit” on 24 September 2008 off the coast of Hong Kong*. German Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation, 2009. Disponível em:
http://www.bsu-bund.de/DE/Home/home_node.html Acesso em: 01 AGOSTO. 2017.
- BULIAN, G., " Validation of Parametric Roll Motion Predictions for a Modern Containership Design ". *International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, 157–168, Rio de Janeiro, Brazil, 25 -29 SETEMBRO 2006.
- BULIAN, G., " On an improved Grim effective wave". *Ocean Engineering*, 1811-1825, Trieste, Italia, 2008. Disponível em:
www.elsevier.com/locate/oceaneng Acesso em: 01 AGOSTO. 2017.
- COELHO, L. C. G., DE FIGUEREDO, L. H., GATTASS, M. " Intersecting and trimming parametric meshes on finite-element shells ", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 47 v #4 777-800. 2000.
- COELHO, L. C. G., JORDANI, C. G., OLIVEIRA, M. C., et al., " Equilibrium, ballast control and free-surface effect computations using the SSTAB system". *International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, 157–168, Madri , Espanha, 2008.
- FRANCESCUTTO, A., " *Intact Ship Stability. The Way Ahead.* ". *Marine Tech.*, 41:31-, 2004.
- GRIM, O., " *Beitrag zu dem problem der Sicherheit des Schiffes im seegang*". *Schiff und Hafen*, 490-497, 1961.
- GUDMUNDSSON, A., " Safety practices related to small fishing vessel stability." *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, No. 517, pp.54 , Roma, Italia, 2009.

HAYASHI, C., " *Nonlinear Oscillations in Physical Systems* ". Princeton University Press, Princeton,NJ, pp. xii+392, 2009.

IMO " International Code on Intact Stabilit" ., v+160, Londres, UK, 2009.

IMO MSC.1/Circ.1200. " *Interim Guidelines for Alternative Assessment of the Weather Criterion* ", London, UK,. 2006.

IMO MSC.1/Circ.1227. " *Explanatory Notes to the Interim Guidelines for Alternative Assessment of the Weather Criterion* ", London, UK,. 2007.

IMO Resolution A.562 " The international code on intact stability "., Londres, UK, 1985.

IS CODE -IMO Resolution MSC.267(85) Annex 2. "The international code on intact stability", London, UK,. 2008.

IMO SDC 2/WP.4 " Report of the working group (Part 1)"., Londres, UK, 2015.

IMO SDC 3/WP.5 " Report of the working group (Part 1)"., Londres, UK, 2016.

IMO SDC3. " Pure Loss of Stability and Parametric Roll failure modes: Results, Comments and Examples of Calculation - Submitted by France."., UK, 2016.

IMO SDC 4/5/1/Add.1." FINALIZATION OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA- Report of the correspondence group (part 2)"., Londres, UK, 2016.

IMO SDC 4/5/1/Add.2." FINALIZATION OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA- Report of the correspondence group (part 3)"., Londres, UK, 2016.

IMO SDC 4/5/1/Add.4." FINALIZATION OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA- Report of the correspondence group (part 5)"., Londres, UK, 2016.

IMO SLF 48/21."Report to Maritime Safety Committee"., Londres, UK, 2005.

IMO SLF 48/4/12." On the Development of Performance-Based Criteria for Ship Stability in Longitudinal Waves, Submitted by Italy"., Londres, UK, 2005.

IMO SLF 50/4/4." Framework for the Development of New Generation Criteria for Intact Stability, submitted by Japan, the Netherlands and the United States "., Londres, UK, 2007.

IMO SLF 51/4/1 Anexo 2." Report of the Intercessional Correspondence Group on Intact Stability, Submitted by Germany "., Londres, UK, 2008.

IMO SLF 51/INF.4." Development of Performance-Based Intact Stability Criteria, Submitted by the United States "., Londres, UK, 2008.

IMO SLF 53/19." Report to Maritime Safety Committee "., Londres, UK, 2011.

- IMO SLF 53/3/3." Activities of the Dynamic Stability Task Group of the Society of Naval Architects and marine Engineers, Submitted by the Royal Institution of Naval Architects (RINA) "., Londres, UK, 2010.
- IMO SLF 53/INF.10 Annex 5." Information Collected by the Correspondence Group on Intact Stability, Submitted by Japan "., Londres, UK, 2010.
- IMO SLF 54/17. " REPORT TO THE MARITIME SAFETY COMMITTEE "., Londres, UK, 2012.
- IMO SLF 55/17. " REPORT TO THE MARITIME SAFETY COMMITTEE "., Londres, UK, 2013.
- IUMI. " Institute of London Underwriters, Hull casualty statistics "., Londres, UK, 01 jan. 2016. Disponível em:
https://iumi.com/images/documents/2016-04-Statistics/IUMI_2015-2016-Casualty_and_World_Fleet_Statistics-Spring_2016.pdf Acesso em: 22 agos. 2017. Ilawa, Poland
- KEMPF, G., " *Die Stabilitätsbeanspruchung der Schiff durch Wellen und Schwingungen* ". *Werft-Reederei-Hafen*, 200-2002, 1938.
- KOBYLINSKI, L. K., " *Foundation for Safety of Navigation and Environment Protection*". *Proc. Int'l Workshop on Dynamic Stability Consideration in Ship Design*, 157–168, Ilawa, Polônia, 2009.
- KOBYLINSKI, L. K., LENCH, K., " *Stability and Safety of Ships. Volume I: Regulation and Operation* ". *ELSEVIER OCEAN ENGINEERING BOOK SERIES*, UK, 2003.
 Disponível em:
http://opac.vimaru.edu.vn/edata/EBook/Stability_and_safety_of_ship.pdf Acesso em: 01 AGOSTO. 2017.
- LIN. W. M., YUE, D. K. P., " *Numerical Solutions for Large Amplitude Ship Motions in the Time-Domain*". *Proc. 18th Symp. of Naval Hydro.*, 41–66, Ann Arbor, MI, 1990.
- TOMPURI M. (V) Napa Ltd, RUPONEN, P. (V) Napa Ltd, FORSS, M. (V) Napa Ltd, *et al.*, " *Application of the Second Generation Intact Stability Criteria in Initial Ship Design* ". *SNAME*. Disponível em:
<http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=419be2ba-9f92-4cf8-881d-beca29a29e1a> Acesso em: 01 AGOSTO. 2017.

- NEVES, M. A., RODRIGUEZ, C. A., " *On Unstable Ship Motions Resulting from Strong Non-Linear Coupling*". *Ocean Engineering*, vol 33, no. 14, pp. 1853-1883, OUTUBRO 2006.
- OH, I. G., NAYFEH, A. H., MOOK, D. T. " *A theoretical and experimental investigation of indirectly excited roll motion in ships*". *Phil. Trans. Royal Soc*, 358(1771):1853–1881, Londres, UK, 2000.
- PAULLING, J. R., " *The transverse Stability of a Ship in a Longitudinal Seaway*". *Journal of Ship Research*, vol. 4, no.4 pp. 37-49., Mar. 1961.
- PAULLING, J. R., ROSENBERG, R. M., " *On Unstable Ship Motions Resulting From Non-Linear Coupling* ". *Journal of Ship Research*, vol. 3, no.1, pp. 36-46., Jun. 1959.
- RAHOLA, J., 1939, *The Judging of Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability Especially Considering the Vessel Navigating Finnish Waters*. PhD Thesis, Technical University of Finland, Helsinki.
- SANCHEZ, N. E., NAYFEH, A. H., " *Nonlinear rolling motions of ships in longitudinal waves* ". *Int'l Shipbuilding Prog.*, 37(411):247–272, 1990
- SHIGUNOV, V., " *Validation of Parametric Roll Motion Predictions for a Modern Containership Design* ". *International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, 473–492, St. Petersburg, Russia, 22 -24 JUNHO 2009.
- SHIGUNOV, V., PEREIRA, R., " *Direct Assessment Procedure and Operational Guidance for Avoidance of Cargo Loss and Damage on Container Ships in Heavy Weather*". , *International Workshop on Dynamic Stability Considerations in Ship Design (DSCSD)*, 11, Ilawa, Polonia , SETEMBRO 2009.
- SHIGUNOV, V., RATHJE, H., EL MOCTAR, O. R., *et al.*" *On the Consideration of Lateral Accelerations in Ship Design Rules. Proc.*". *12th Int'l Ship Stability Workshop*, 27-36, Washington, DC , 2011.
- SPYROUI, K. J., " *Design Criteria for Parametric Rolling*". *Oceanic Engin. Int'l*, 9(1):11–27., 2005.
- THEMELIS, N., SPYROUI " *Probabilistic Assessment of Ship Stability. Trans.*". *SNAME*, 117:181–206, 2007.

PETERS (M), W., BELENLY (M), V., BASSLER (M), C., *et al.* "THE SECOND GENERATION OF INTACT STABILITY CRITERIA: AN OVERVIEW OF DEVELOPMENT". SNAME, 2011.

