

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

GUILHERME BRANDO DE MEDEIROS

PRESSÕES E TENSÕES EM UM CASCO DE PLANEIO UTILIZANDO AS NORMAS:
ISO (2008), ABS (2018) E DNV (2012)

Joinville
2018

GUILHERME BRANDO DE MEDEIROS

PRESSÕES E TENSÕES EM UM CASCO DE PLANEIO UTILIZANDO AS NORMAS:
ISO (2008), ABS (2018) E DNV (2012)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi.

Joinville
2018

**PRESSÕES E TENSÕES EM UM CASCO DE PLANEIO UTILIZANDO AS
NORMAS: ISO (2008), ABS (2018) E DNV (2012)**

GUILHERME BRANDO DE MEDEIROS

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi.

Joinville, 05 de julho de 2018:

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Peres Calil
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi
Orientador

Prof. Msc. Eng. Vitor Takashi Endo
Membro

Prof. Eng. Esp. Luiz Eduardo Bueno Miniolli
Membro

RESUMO

A expansão do mercado de lanchas e iates nos últimos anos motiva os construtores e projetistas a buscarem formas de diminuir os custos com a fabricação das embarcações, porém garantido a robustez estrutural necessária. Em um cenário no qual, as diferentes sociedades classificadores ainda divergem em relação à diversos aspectos associados ao projeto estrutural de embarcações de alta velocidade, este trabalho busca realizar uma análise das pressões e tensões em um casco de planeio considerando-se o uso das normas DNV (2012), ABS (2018) e ISO (2008). Para isto utiliza-se o mesmo arranjo estrutural projetado por (AMARAL, 2016), a partir do qual foram calculadas as pressões estimadas pelas diferentes normas, a fim de definir os esforços atuantes no fundo do casco da embarcação. O passo seguinte foi definir as tensões resultantes no casco através de uma análise baseada no método dos elementos finitos para as diferentes pressões dinâmicas calculadas anteriormente. Por fim, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos, onde foi possível concluir que a aplicação da norma DNV (2012) foi aquela que resultou nas maiores tensões. Assim, pode-se concluir que a DNV (2012), para um mesmo arranjo estrutural, demandaria uma espessura maior de chapeamento, aparentando ser a norma mais conservadora entre aquelas analisadas. No entanto, destaca-se que tal resultado está intrinsecamente associado às diferentes definições sobre o estado de mar para o qual a lancha é projetada, fato que ainda carece de padronização interpretativa.

Palavras-chave: Embarcações de planeio. Lanchas. Método dos Elementos Finitos. Pressão de Slamming.

ABSTRACT

The expansion of the boat and yacht market in recent years has motivated builders and designers to look ways to reduce costs of boat's manufacture, ensuring the necessary structural robustness. In a scenario which the various classification societies still differ in relation to the various aspects associated with structural design of high speed vessels. This work aim to analyze the pressures and stresses in a planar hull considering the use of the standards DNV (2012), ABS (2018) and ISO (2008). For this, the same structural arrangement designed by (AMARAL, 2016) is used, the pressures was estimated by the different standards, in order to define the pressures on botton of the vessel's hull. The next step was to define the resulting stresses on the hull through an analysis based on the finite element method for the different pressures calculated previously. Finally, a comparison of the results obtained, where it was possible to conclude that the application of DNV (2012) was the one that resulted in the greatest tensions. Thus, it can be concluded that the DNV (2012), for the same structural arrangement, would require a greater thickness of plating, being the most conservative norm among those analyzed. However, it should be noted that this result is intrinsically associated with the different state of sea for which one the boat is designed, it lacks interpretative standardization.

Keywords: Planing Vessel. Motorboats. Finite Element Method. Slamming pressure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Lanchas em condições de navegação	13
Figura 2 – Embarcação em Planeio	15
Figura 3 – Modelos de diferentes tipos de Materiais	16
Figura 4 – Ângulo de deadride	16
Figura 5 – Equilíbrio hidrostático	17
Figura 6 – Estrutura de Embarcação de Alta Velocidade	18
Figura 7 – Estágios de propagação de uma trinca por fadiga	20
Figura 8 – Exemplo de discretização da estrutura de uma embarcação	22
Figura 9 – Fluxograma das atividades realizadas	23
Figura 10 – Baliza posição 0,1 L	27
Figura 11 – Balizas que geraram a superfície do casco	27
Figura 12 – Casco modelado pelo Rhinoceros	27
Figura 13 – Arranjo Estrutural	28
Figura 14 – Pressão de slamming	31
Figura 15 – Distribuição da pressão de slamming - 5 nós / Hs = 1,05 m	32
Figura 16 – Valores de pressão em função do comprimento da embarcação	35
Figura 17 – Distribuição de pressão de slamming -	38
Figura 18 – Casco importado para o Hyperworks	39
Figura 19 – Casco importado para o Hyperworks	39
Figura 20 – Propriedades da geometria a ser simulada	40
Figura 21 – Definição do material no programa	41
Figura 22 – Janela para inclusão da equação da distribuição da pressão	41
Figura 23 – Exemplo referente a distribuição da pressão no fundo do casco	42
Figura 24 – Elementos RBE3	43
Figura 25 – Restrição de simetria	43
Figura 26 – Distribuição da pressão segundo a DNV (2012)	44
Figura 27 – Distribuição da pressão segundo a DNV (2012)	45
Figura 28 – Influência da altura significativa de onda DNV (2012)	45
Figura 29 – Influência da velocidade DNV (2012)	46
Figura 30 – Distribuição da pressão	46
Figura 31 – Distribuição da pressão	47
Figura 32 – Distribuição da pressão	47
Figura 33 – Distribuição de pressão - ISO	48

Figura 34 – Distribuição de pressão - ABS	49
Figura 35 – Comparação entre as pressões	49
Figura 36 – Comparação entre as pressões	50
Figura 37 – Comparação entre as pressões	51
Figura 38 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 0,30$	52
Figura 39 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 1,05$ metros	52
Figura 40 – Gráfico da tensão principal máxima - $H_S = 0,30$ m e 1,05 m	53
Figura 41 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 0,30$	53
Figura 42 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 1,05$	54
Figura 43 – Gráfico da tensão principal máxima - $H_S = 0,30$ m e $H_S = 1,05$ m	54
Figura 44 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós	55
Figura 45 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós	55
Figura 46 – Gráfico da tensão principal máxima - ISO (2008)	56
Figura 47 – Gráfico das tensões máximas principais - $H_S = 0,30$ m e 1,05 m - ABS e DNV	57
Figura 48 – Fluxograma da Simulação CFD.	63
Figura 49 – Domínio computacional	65
Figura 50 – Gradiente de pressão à 20 nós	65
Figura 51 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]	66
Figura 52 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]	66
Figura 53 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]	67
Figura 54 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]	67
Figura 55 – Distribuição da pressão segundo a DNV (2012)	72
Figura 56 – Distribuição da pressão	72
Figura 57 – Distribuição da pressão	72
Figura 58 – Distribuição da pressão	73
Figura 59 – Distribuição da pressão	73
Figura 60 – Distribuição da pressão	73
Figura 61 – Distribuição da pressão	74
Figura 62 – Distribuição da pressão	74
Figura 63 – Distribuição da pressão	74
Figura 64 – Distribuição da pressão	75
Figura 65 – Distribuição da pressão	75
Figura 66 – Distribuição da pressão	75
Figura 67 – Distribuição da pressão - Velocidade - 25 nós	76

Figura 68 – Distribuição da pressão	76
Figura 69 – Distribuição da pressão	76
Figura 70 – Distribuição da pressão	77
Figura 71 – Distribuição da pressão	77
Figura 72 – Distribuição da pressão	77
Figura 73 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 0,30$	83
Figura 74 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 0,30$	83
Figura 75 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 0,30$	84
Figura 76 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 0,30$	84
Figura 77 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 1,05$ metros	84
Figura 78 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 1,05$ metros	85
Figura 79 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 1,05$ metros	85
Figura 80 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 1,05$ metros	85
Figura 85 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 1,05$	86
Figura 86 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 1,05$	86
Figura 87 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 1,05$	86
Figura 88 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 1,05$	87
Figura 89 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós	87
Figura 90 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós	87
Figura 91 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós	88
Figura 81 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 0,30$	89
Figura 82 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 0,30$	89
Figura 83 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 0,30$	89
Figura 84 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 0,30$	89
Figura 92 – Distribuição longitudinal da pressão de slamming	91
Figura 93 – Valores de k_L em função do comprimento da embarcação	91
Figura 94 – Fator de área de projeto - F_D	92
Figura 95 – Fator de distribuição da aceleração vertical - F_V	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do alumínio	20
Tabela 2 – Dimensões e características da embarcação	26
Tabela 3 – Variação geométrica ao longo do comprimento	26
Tabela 4 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]	30
Tabela 5 – Coeficientes para a equação 4 - 5 nós	31
Tabela 6 – Valores de k_{DC} de acordo com a categoria de projeto	32
Tabela 7 – Área dos painéis do fundo do casco	34
Tabela 8 – Pressão de slamming em função da posição longitudinal - [kN/m^2]	35
Tabela 9 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]	37
Tabela 10 – Altura significativa de onda de projeto [m]	37
Tabela 11 – Pressão de slamming em função da velocidade e posição [kN/m^2]	37
Tabela 12 – Coeficientes para a equação 4 -10 nós	68
Tabela 13 – Coeficientes para a equação 4 -15 nós	68
Tabela 14 – Coeficientes para a equação 4 -20 nós	68
Tabela 15 – Coeficientes para a equação 4 -25 nós	69
Tabela 16 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 17 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 18 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 19 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 20 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 21 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 22 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 23 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 24 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 25 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 26 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 27 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 28 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 29 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	70
Tabela 30 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 31 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71

Tabela 32 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 33 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 34 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 35 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 36 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 37 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 38 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 39 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 40 – Tabela Pressão de Slamming [kN/m^2] - DNV	71
Tabela 41 – Pressão de slamming pela norma ABS	78
Tabela 42 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria A	79
Tabela 43 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria B	80
Tabela 44 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria C	81
Tabela 45 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria D	82
Tabela 46 – Tensão máxima no casco	89
Tabela 47 – Tensão máxima no casco - ABS	90
Tabela 48 – Tensão máxima no casco	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.2	Estrutura do Relatório	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Lanchas	15
2.2	Solicitação estrutural	17
2.3	Estruturas	18
2.4	Definição do material	19
2.5	Fadiga	19
2.6	Métodos de Elementos Finitos - MEF	21
3	METODOLOGIA	23
4	DESENVOLVIMENTO	25
4.1	Seleção das normas de Sociedades Classificadoras	25
4.2	Modelo do Casco	25
4.2.1	Modelo CAD	26
4.2.2	Arranjo Estrutural	28
4.3	Determinação das Pressões	29
4.3.1	Cálculo através da norma DNV (2012)	29
4.3.1.1	Aceleração Vertical	29
4.3.1.2	Pressão de slamming no fundo	29
4.3.2	Cálculo usando a norma ISO (2008)	32
4.3.2.1	Fator de projeto da categoria	32
4.3.2.2	Fator de carregamento dinâmico	33
4.3.2.3	Fator de distribuição longitudinal	33
4.3.2.4	Fator de redução de pressão por área	34
4.3.2.5	Pressão de slamming	34
4.3.3	Cálculo usando a ABS (2018)	35
4.3.3.1	Aceleração vertical	36
4.3.3.2	Pressão de slamming	36
4.4	Simulação estrutural - Método de Elementos Finitos	38
4.4.1	Criação da malha	38
4.4.2	Definição das propriedades do elemento	40
4.4.3	Definição do material	40
4.4.4	Condições de Contorno	41

4.4.4.1	Pressão distribuída	41
4.4.4.2	Fixação dos graus de liberdade	42
5	RESULTADOS	44
5.1	Análise das pressões - DNV (2012)	44
5.2	Análise das pressões - ISO (2008)	47
5.3	Análise das pressões - ABS (2018)	48
5.4	Comparação entre os métodos	49
5.5	Análise estrutural utilizando o método dos elementos finitos	51
5.5.1	Tensões devido as pressões de slamming - DNV (2012)	51
5.5.2	Tensões devido as pressões de slamming - ABS (2018)	52
5.5.3	Tensões devido as pressões de slamming - ISO	55
5.6	Comparação das tensões máximas - DNV, ABS e ISO	57
6	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A	62
	APÊNDICE B	66
	APÊNDICE C	68
	APÊNDICE D	70
	APÊNDICE E	72
	APÊNDICE F	83
	ANEXO A	91

1 INTRODUÇÃO

O mercado brasileiro de lanchas e iates de luxo apresentam um ritmo de expansão de 10%, conforme estimativas da Associação Brasileira dos Construtores de Barcos (ACOBAR) para o ano de 2017 . Somente no Brasil existem cerca de 150 estaleiros em atividades nesse ramo.

Lanchas são caracterizadas como embarcações do tipo planante, ou seja, apresentam elevação da proa com o aumento da velocidade, o que acarreta diminuição da área de contato do casco com a superfície da água, levando à diminuição da resistência ao avanço (IERVOLINO, 2015).

A elevação da proa inicia um regime no qual parte do peso da embarcação é sustentada pela força dinâmica (sustentação) oriunda da interação do casco com a água. Tal regime é denominado na literatura como regime de planeio (SAVITSKY, 1964).

Assim, o baixo peso é um aspecto primordial para embarcações planantes, tendo em vista que o peso está diretamente relacionado com a velocidade necessária para a entrada em regime de planeio. A velocidade, por sua vez, dependerá da potência instalada na embarcação, o que, invariavelmente, afeta seu custo operacional (AMARAL, 2016).

Além do baixo peso, essas embarcações precisam ter alta resistência estrutural, pois ao alcançar a velocidade de planeio, a embarcação começa a sofrer elevadas pressões dinâmicas no casco, o que pode ocasionar falha na estrutura se a mesma não tiver sido projetada adequadamente (KOPETSKI, 2017). Na figura 1 é possível ter uma "sensação" desses esforços oriundos do impacto do casco com a água.

Figura 1 – Lanchas em condições de navegação



Fonte: Disponível em: <<https://www.yachtingmagazine.com/sites>>

Motivado por um cenário onde as normas de diferentes sociedades classificadoras ainda divergem sobre o projeto estrutural de embarcações de alta velocidade, este trabalho pretende realizar a análise da pressão dinâmica gerada no casco devido a interação deste com a água, bem como verificar o efeito dessa pressão na estrutura da embarcação. A verificação dos efeitos da pressão dinâmica no casco da lancha estudada será realizada utilizando-se o método dos elementos finitos, em procedimento estabelecido em (AMARAL, 2016)

Para a estimativa da pressão dinâmica serão aplicados os procedimentos propostos pelas normas da DNV (2012), ISO (2008) e ABS (2018), objetivando uma comparação dos resultados.

1.1 Objetivos

Diante da problemática apresentada na introdução, este trabalho estabelece como objetivo principal: apresentar um estudo comparativo sobre as proposições de diferentes sociedades classificadoras para a estimativa da distribuição da pressão dinâmica atuante no casco de uma lancha, bem como seus respectivos efeitos na estrutura de uma embarcação de 40 pés definida para o estudo de caso.

Visando alcançar o objetivo proposto são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Identificar as normas propostas por diferentes sociedades classificadoras que regulamentam o projeto de embarcações de alta velocidade e/ou planantes;
- b. Realizar a leitura de tais normas e a respectiva implementação do procedimento para a estimativa dos campos de pressão dinâmica ao longo do casco de uma lancha;

- c. Selecionar uma lancha para ser utilizada como estudo de caso;
- d. Determinar as pressões dinâmicas atuantes nos painéis do fundo da embarcação escolhida de acordo com os diferentes modelos preditivos implementados;
- e. Realizar a modelagem da estrutura da lancha selecionada em um programa robusto que permita realizar a análise estrutural aplicando o método dos elementos finitos;
- f. Analisar os resultados, considerando, inclusive, diferentes velocidades e condições de mar;

1.2 Estrutura do Relatório

Este relatório descreve os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento proposto, sendo dividido em 6 capítulos. No primeiro é apresentada a introdução ao tema desta pesquisa. No segundo são mostrados os principais autores e os fundamentos teóricos que darão subsídios ao desenvolvimento proposto. O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada na realização do trabalho, enquanto que no capítulo 4 descreve-se o desenvolvimento realizado.

Por fim, os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5, enquanto as conclusões são sintetizadas no capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

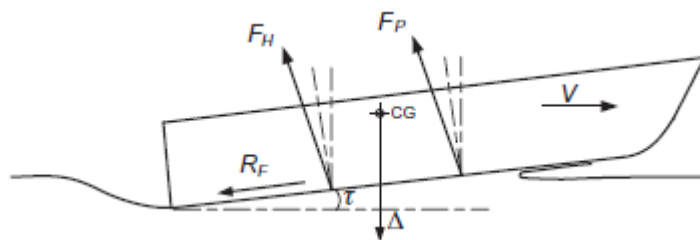
Nesta seção são apresentados os conceitos teóricos que substanciam o desenvolvimento proposto, entre os quais destacam-se os fundamentos sobre lanchas, estruturas leves, fadiga e métodos dos elementos finitos. Por fim, são apresentados os principais trabalhos similares que auxiliam no estabelecimento dos objetivos e da metodologia proposta.

2.1 Lanchas

Lanchas são embarcações a motor usadas para lazer, pesca, prática de esportes aquáticos ou até mesmo para operações de serviço, como fiscalização ou suporte de embarcações maiores.

A característica deste tipo de embarcação é o planeio. Para a Organização Marítima Internacional (IMO) embarcações de alta velocidade são definidas como aquelas capazes de atingir a velocidade, em nós, de 7,16 vezes seu deslocamento, em tonelada, elevado à 0,1667. Nessa condição ocorre o levantamento da popa da embarcação, conforme mostrado na figura 2.

Figura 2 – Embarcação em Planeio



Fonte: Molland, Turnock e Hudson (2011)

Conforme já discutido, o peso e a resistência estrutural são duas importantes características que devem ser consideradas no projeto de uma embarcação de alta velocidade. Nesse contexto, de acordo com Nasseh (2007) os principais materiais utilizados para a fabricação de lanchas, são: aço, alumínio, madeira, fibra ou mesmo uma combinação delas.

Na Figura 3 são mostrados exemplos de lanchas cujos cascos são construídos utilizando-se diferentes materiais. Na parte superior esquerda é mostrada uma lancha construída em alumínio, enquanto na parte inferior esquerda o casco é construído em madeira. Por fim, à direita apresenta-se uma embarcação com o casco construído em

fibra de vidro.

Figura 3 – Modelos de diferentes tipos de Materiais



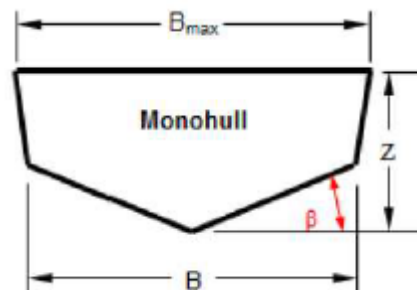
Fonte: Motozum (2017), KALMAR (2016) e SchaeferYacht (2017)

A escolha do material depende de diversos fatores que vão desde estética e tradição, passando por viabilidade econômica e/ou tecnológica. De toda sorte, tal escolha deve priorizar a relação resistência por peso, fundamental para o bom desempenho de uma embarcação de alta velocidade.

A discussão sobre linhas do casco, motorização, posição e disposição do convés fogem ao escopo deste trabalho, o qual é focado nos esforços estruturais aplicados ao casco da embarcação. No entanto, o leitor mais exigente encontrará farta literatura sobre o tema, a começar por Moraes (2017).

A figura 4 apresenta o principal ângulo que determina o formato da embarcação, o ângulo β , conhecido como ângulo de deadrise. Esse ângulo varia ao longo do comprimento da embarcação, apresentando valores menores na popa e aumentando na direção da proa.

Figura 4 – Ângulo de deadride



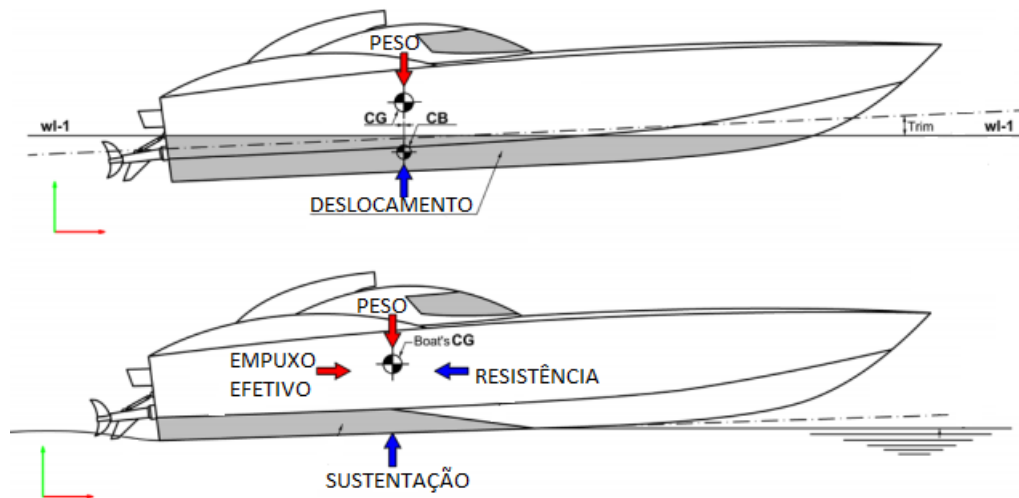
Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Valores menores de β tendem a resultar em uma menor resistência ao avanço, mas no entanto, dificultam a penetração do casco na superfície da água, gerando maiores acelerações (e desconforto) durante a navegação (SAVITSKY, 1964).

2.2 Solicitação estrutural

O equilíbrio estático da embarcação (hidrostática) consiste na situação na qual a força realizada pelo volume de água deslocado pelo casco é igual e contrária ao peso da embarcação (Figura 5). Este fenômeno também é conhecido como o Princípio de Arquimedes.

Figura 5 – Equilíbrio hidrostático



Fonte: <<http://orca3d.com/wp-content/uploads/2015>>

As cargas dinâmicas são aquelas provenientes da interação entre a embarcação e a água, devido a movimentação no campo de pressão hidrostático causado pelo movimento do fluido. Na figura 5 a força de sustentação "lift" possui uma parcela hidrostática e uma parcela hidrodinâmica gerada pelo efeito de sustentação decorrente da interação do casco com a água.

É importante ressaltar que as cargas dinâmicas são de duas naturezas, a sustentação e o impacto (slamming), que surge em virtude do movimento brusco de pitch causado pela passagem da onda ao longo do casco.

A sustentação, por sua vez, pode ser entendida como um fenômeno físico de ação e reação, ou seja, o casco ao se deslocar sobre a água desloca uma parcela do fluido para baixo, a água empurra o casco para cima, gerando a força de sustentação (IERVOLINO, 2015).

Entre as técnicas existentes para a estimativa das cargas atuantes em uma lancha, destacam-se os ensaios experimentais e as simulações CFD. No apêndice A é apresentado um breve resumo sobre essa técnica.

Devido a demanda de um alto poder computacional para realizar tais simulações, e a indisponibilidade de uma estação de trabalho que atendesse suficientemente as necessidades para realizar tais simulações em tempo hábil para

a finalização deste trabalho, optou-se por não incluir tal método nas comparações realizadas.

2.3 Estruturas

A principal função das estruturas é a transmissão dos esforços atuantes no corpo, permitindo o desempenho estético e funcional da estrutura.

No caso de embarcações, não existem "fundações" capazes de transmitir os esforços para o solo. Sendo assim, a estrutura deve se auto equilibrar, buscando uma configuração na qual os esforços internos não provoquem força ou momento resultante.

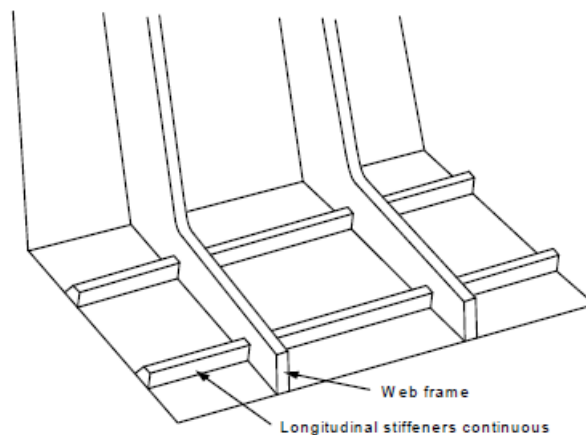
A busca pela configuração equilibrada tem como resultado físico a variação do calado e dos ângulos de trim e banda, os quais se ajustam para equilibrar as diferentes condições de carga e onda impostas a embarcação

Embora seja especialmente importante para embarcações planantes, a busca por estruturas eficientes é fundamental para a melhoria do desempenho de quaisquer estruturas leves, tais como navios, aviões e automóveis.

Diversos trabalhos mostram que chapas finas reforçadas por grelhas ortogonais constituem um dos arranjos mais eficientes na construção de estruturas leves. Tal arranjo é fartamente discutido por Barabanov (1966), Augusto (2004) e Lamb et al. (2004)

Nas embarcações a estrutura é composta pelos reforçadores longitudinais e transversais ao casco, além do chapeamento. Na figura 6 é mostrado o arranjo estrutural de uma embarcação de alta velocidade, onde se vê a ligação entre os reforçadores longitudinais e transversais, mostrando que, em geral, os reforçadores transversais são seccionados para permitir a passagem contínua dos reforçadores longitudinais.

Figura 6 – Estrutura de Embarcação de Alta Velocidade



Fonte: DNV (2012)

Nas análises de estruturas navais nem sempre é fácil determinar as componentes das forças atuantes, pois a maior parte do carregamento externo vem

da interação da embarcação com a água (correnteza e onda) e ventos, fenômenos naturais difíceis de prever, só podendo ser definidos em termos probabilísticos.

A partir dessas definições o engenheiro de estrutura dimensiona os elementos estruturais capazes de resistir às pressões estáticas e dinâmicas provenientes da operação da embarcação.

O processo de dimensionamento estrutural pode ser realizado por meio de uma abordagem racional, onde realizasse uma proposta de arranjo estrutural a qual é seguida de um processo de análise. Diante dos resultados da análise, modifica-se o arranjo até a convergência para uma solução viável, que não sofra falha nas diferentes condições de uso.

No entanto, em virtude da necessidade de realizar a classificação da embarcação, na maioria dos casos, o projeto estrutural é realizado seguindo recomendações explícitas contidas nas normas das sociedades classificadoras.

Por fim destaca-se que, especialmente no Brasil, muitas vezes o projeto estrutural de lanchas é feito com base na experiência prática de construtores e estaleiros, sem que processos racionais de projeto venham a ser empregado.

2.4 Definição do material

Embarcações de alta velocidade muitas vezes são fabricadas em alumínio, pois este material apresenta ótimas qualidades mecânicas aliadas ao baixo peso. Atualmente este tipo de material é utilizado na fabricação de embarcações voltadas para os segmentos de pesca esportiva, entre outros.

Como o objetivo desse trabalho é realizar uma comparação entre as distribuições de pressão estimadas pelas formulações propostas por diferentes sociedades classificadoras, bem como os efeitos dessas pressões ao longo do casco, a utilização de um material isotrópico (aqueles materiais os quais as propriedades mecânicas podem ser descritas sem referência a direção) permite a utilização de modelos mais simples e que exigem um menor custo computacional.

Além disso, modelos isotrópicos permitem uma análise direta dos campos de tensão e deformação, sem que a caracterização do material influencie nos resultados. Sendo assim, todas as simulações realizadas neste trabalho utilizaram o alumínio como material base, cujas propriedades são enumeradas na tabela 1.

2.5 Fadiga

Hibbeler (2010) define fadiga como a falha de um material submetido a ciclos repetitivos de tensão ou deformação, resultando em sua ruptura.

De acordo com Rosa (2002) este é o tipo mais comum de falha em componentes mecânicos, representando de 50% à 90% do total de falhas.

Tabela 1 – Propriedades do alumínio

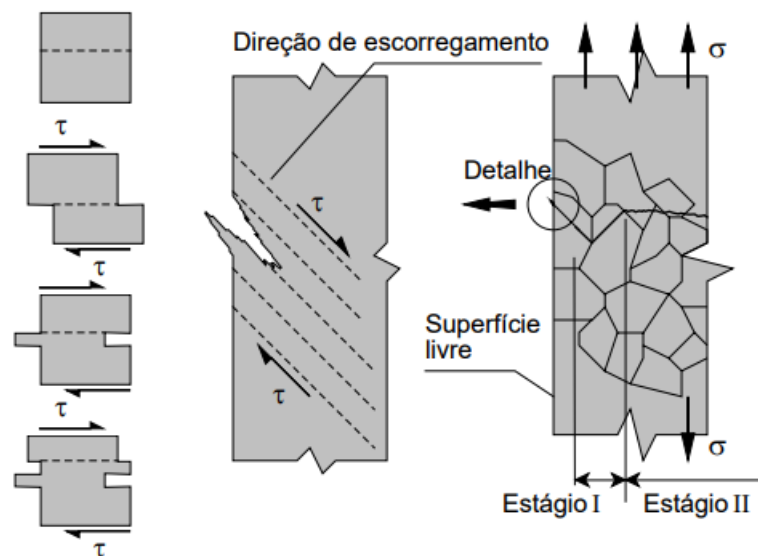
Massa específica [g/cm^3]	2,7
Condutibilidade térmica a 25° [$Cal/cm/°C$]	0,53
Ponto de fusão [$°C$]	660
Módulo de elasticidade [MPa]	69000
Tensão de escoamento [MPa]	255
Tensão última [MPa]	290
Poisson, ν	0,33

Fonte: Hibbeler (2010)

Geralmente as falhas por fadiga estão relacionadas com deformações plásticas causadas por, tensões de cisalhamento. No entanto, a existência de fadiga depende da ocorrência de ciclos alternados de tensão, os quais introduzem as deformações plásticas; acumulando dano à estrutura.

Em caso de materiais dúcteis, a nucleação de fissuras ocorre devido a formação de planos deslizantes, decorrentes da deformação plástica no grão. Este efeito ocorre já nos primeiros ciclos de carregamento, aumentando com o passar dos ciclos.

Figura 7 – Estágios de propagação de uma trinca por fadiga



Fonte: Rosa (2002)

Embarcações, em geral, são projetadas para corroer antes de fadigar, desde que boas práticas de projeto sejam adotadas, como por exemplo a não existência de cantos vivos em aberturas ao longo do casco.

No entanto, a construção de lanchas em materiais compostos não metálicos, aliada ao constante impacto do casco contra a água (ocorrido em embarcações de alta velocidade) podem, eventualmente, induzirem a fadiga estrutural.

2.6 Métodos de Elementos Finitos - MEF

De acordo com Logan (2011) o método de elementos finitos é uma técnica para resolver problemas de engenharia e modelos físicos com auxílio de métodos numéricos.

Tal técnica é recomendada em aplicações com: geometrias, carregamento ou mesmo propriedade dos materiais complicadas, para os quais o problema é de difícil (as vezes impossível) formulação.

O princípio de funcionamento desse método consiste em se discretizar o domínio contínuo em elementos menores de formulação conhecida, reconstituindo o resultado na geometria real por meio da compatibilização das formulações de cada um dos elementos.

Assim como em todo método numérico, a qualidade da resposta dependerá do grau de refino da discretização. Uma malha com poucos elementos poderá não representar adequadamente o comportamento da estrutura real, ao passo que uma malha com muitos elementos pode resultar em um tempo de processamento inviável para a maioria das análises.

Para Filho (2008) a escolha da malha a ser aplicada não é óbvia, pois depende do conhecimento das propriedades do elemento visando a para melhor representação do problema. Sendo assim, é importante realizar uma verificação da qualidade da resposta em função da malha utilizada na modelagem.

Por fim, é importante observar que existem diferentes níveis topológicos de análise. Uma mesma geometria pode ser representada com diferentes tipos de elementos, cada qual com diferentes graus de liberdade. Por exemplo, uma viga pode ser representada por elementos de viga (unidimensionais), elementos de casca (bidimensionais) ou elementos sólidos (tridimensionais).

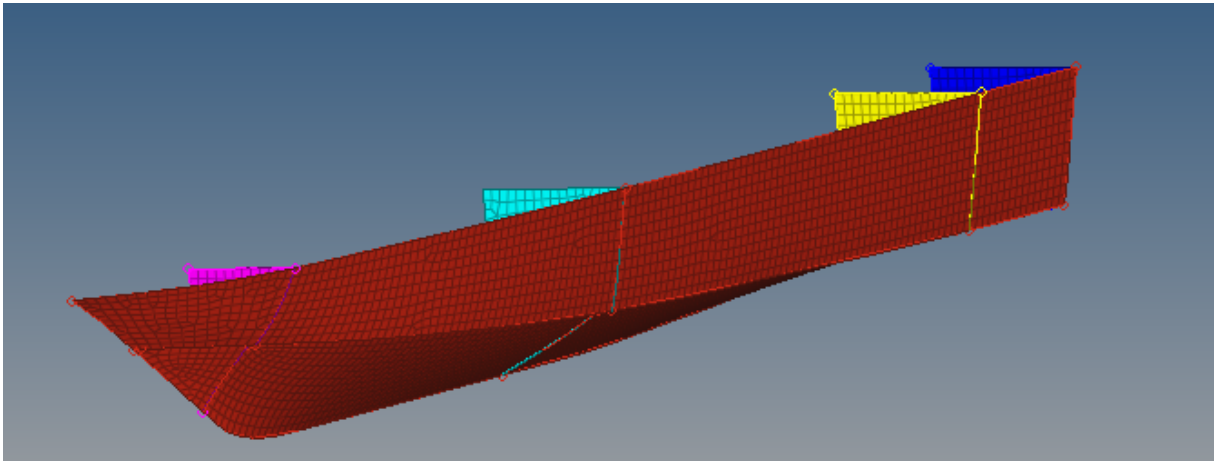
No exemplo da viga, o uso de elementos unidimensionais consegue representar com boa precisão o comportamento longitudinal da estrutura. No entanto se por qualquer motivo, desejar-se analisar a deformação da alma ou flange nas direções ortogonais ao eixo longitudinal da viga, deve-se recorrer a utilização de elementos sólidos na modelagem do problema.

O uso de elementos sólidos, embora consiga representar um número maior de fenômenos, aumenta consideravelmente o tempo de processamento, somente se justificando quando se deseja analisar comportamentos não representados pelos outros dois níveis topológicos.

Na figura 8 é mostrada um exemplo de discretização da estrutura de uma embarcação de alta velocidade utilizando-se elementos de casca.

Uma vez definidos a geometria, tipo de elemento e tamanho da malha a ser utilizada na modelagem, deve-se definir as condições de carregamento a serem

Figura 8 – Exemplo de discretização da estrutura de uma embarcação



Fonte: O Autor (2017)

analisadas. O primeiro grupo de condições de carregamento refere-se as cargas externas atuantes na estrutura, as quais representam as pressões e forças decorrentes da condição de operação analisada. Enquanto que o segundo grupo, representa os vínculos existentes na estrutura.

Conforme já mencionado, embarcações são consideradas vigas livre-livre, ou seja, operam desvinculadas com o solo. Nesse caso, a modelagem utilizando métodos numéricos torna-se complicada, uma vez que a discretização acaba por gerar um resíduo numérico que dificulta o equilíbrio das forças, induzindo o movimento de corpo rígido do modelo.

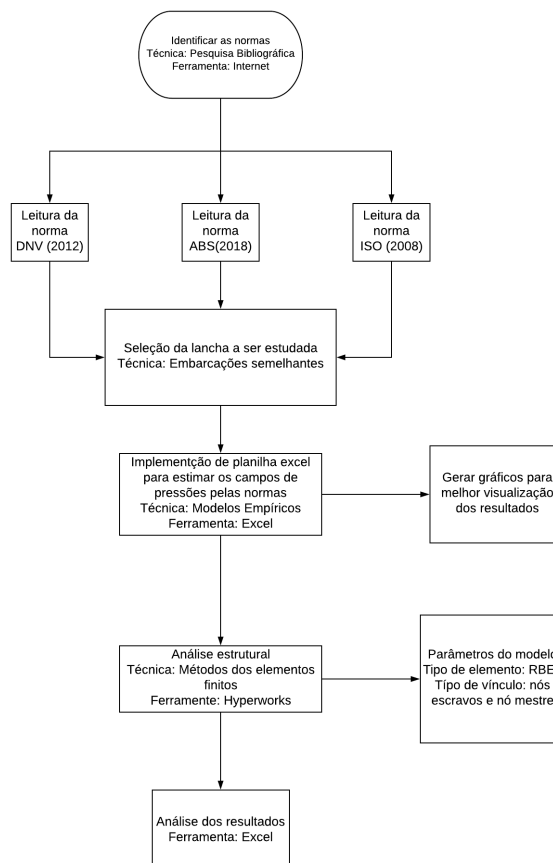
Diversas estratégias foram desenvolvidas ao longo dos anos para solucionar esse problema. No entanto, o detalhamento de tais soluções foge ao escopo desse trabalho, pois o assunto foi amplamente analisado por Amaral (2016) e Kopetski (2017).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho visa realizar uma análise estrutural de uma embarcação de alta velocidade através da comparação dos valores de pressão estática e dinâmica sofrida pelo casco da embarcação, obtidas empiricamente através das equações definidas pelas normas *Det Norske Veritas (DNV)*, *American Bureau of Shipping (ABS)* e *International Organization for Standardization (ISO)*.

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a obtenção dos objetivos propostos, e cujo elementos são sintetizados no fluxograma mostrado na figura 9.

Figura 9 – Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: O Autor (2018)

Conforme apresentado no fluxograma que descreve a metodologia, o primeiro passo consiste na determinação das normas a serem utilizadas na comparação proposta nos objetivos gerais deste trabalho. Para essa tarefa recorreu-se aos sites das principais sociedades classificadoras buscando identificar as eventuais normas

associadas ao projeto de embarcações de alta velocidade.

É importante ressaltar que, embora a ISO se classifique como uma entidade internacional que defini normas para uma grande quantidade de áreas técnicas, esta, a rigor, não é uma Sociedade Classificadora. No entanto, para efeito de concisão, manteve-se a “classificação genérica” de Sociedade Classificadora sem que exista prejuízo do entendimento conceitual do texto.

A seguir, definiu-se a geometria do casco a ser analisada, buscando-se uma embarcação que se encaixasse aos objetivos propostos e oferecesse as informações necessárias para a modelagem. Com base nesses critérios, optou-se pela geometria do casco definida por Amaral (2016) e cuja modelagem foi desenvolvida no programa Rhinoceros, a partir das características de cada baliza descrita pela autora.

A estimativa dos campos de pressões atuantes ao longo do casco foi realizada através dos modelos empíricos propostos pelas diferentes normas estudadas, os quais foram implementados em uma planilha Excel.

Por fim, realizou-se a estimativa das tensões atuantes na estrutura a partir da aplicação do método dos elementos finitos utilizando-se o programa Hyperworks.

Os resultados finais são então comparados e discutidos, utilizando-se uma planilha Excel para realizar a tabulação e análise dos dados obtidos.

4 DESENVOLVIMENTO

Tendo como base a metodologia proposta e a fundamentação teórica apresentada anteriormente, este capítulo descreve o desenvolvimento do trabalho, bem como os resultados obtidos em cada etapa realizada.

Eventualmente poder-se-ia separar o conteúdo deste capítulo entre desenvolvimento e resultados. No entanto, o desenvolvimento realizado consiste exclusivamente da operacionalização da metodologia estabelecida no capítulo anterior e, visando manter uma aproximação entre o resultado e o desenvolvimento de cada etapa, optou-se por descrevê-los em um mesmo capítulo.

4.1 Seleção das normas de Sociedades Classificadoras

Analisando-se os sites das principais Sociedades Classificadoras, buscou-se normas especialmente escritas para o projeto estrutural de embarcações de alta velocidade.

Os critérios utilizados para a seleção foram: a disponibilidade do texto, bem como a representatividade da norma no mercado naval, em especial o mercado naval brasileiro. Sendo assim, optou-se pelas seguintes normas para serem utilizadas nesse trabalho: ISO (2018), DNV (2012) e ABS (2018).

Destaca-se que o uso da norma DNV (2012) em detrimento da norma DNV (2016), deve-se ao fato de que desejou-se manter a compatibilidade com o trabalho de Amaral (2016), visando viabilizar uma comparação objetiva entre os resultados.

4.2 Modelo do Casco

A geometria do casco a ser analisada neste trabalho teve como base o modelo desenvolvido por Amaral (2016), cujas dimensões e características são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Dimensões e características da embarcação

Características da Embarcação	Símbolo	Valor
Comprimento entre perpendiculares [m]	L_{PP}	12,40
Comprimento na linha d'água	L_{LWL}	11,75
Boca [m]	B	3,40
Calado de Projeto [m]	T	0,85
Deslocamento [t]	Δ	15,50
Coefficiente de Bloco	C_B	0,48
Ângulo de deadrise no LCG [graus]	β	19,30
Espessura das chapas [mm]	t	11

Fonte: Adaptado de Amaral (2016)

Tabela 3 – Variação geométrica ao longo do comprimento

Posição Longitudinal [%]	Ângulo de Deadrise [graus]	Altura do chine* [m]	Boca [m]
0,00L	11,54	0,39	3,40
0,10L	12,60	0,38	3,40
0,20L	13,67	0,37	3,40
0,30L	14,73	0,35	3,40
0,40L	15,85	0,32	3,40
0,50L	18,47	0,28	3,40
0,60L	22,92	0,21	3,40
0,70L	28,80	0,13	3,00
0,80L	30,00	0,02	2,50
0,90L	30,00	-0,10	2,50
1,00L	30,00	-0,27	2,40

*Altura do chine à linha d'água (fora da água negativo)

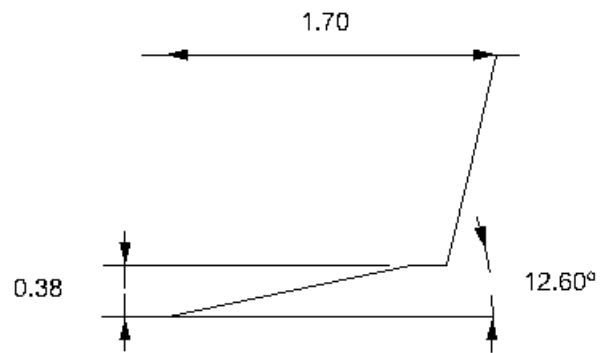
Fonte: Adaptado de Amaral (2016)

4.2.1 Modelo CAD

A modelagem em um sistema CAD permite representar a geometria do casco tridimensionalmente, com a finalidade de realizar os cálculos numéricos associados a análise de desempenho da embarcação.

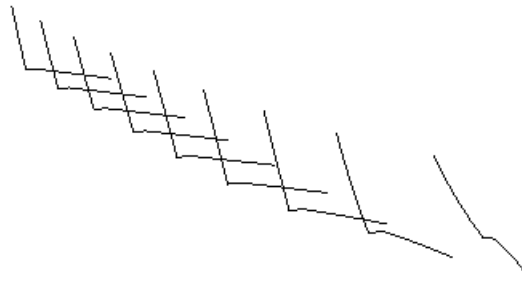
Para realizar a modelagem da embarcação selecionada para este trabalho, utilizou-se o programa Rhinoceros. Inicialmente foram modeladas as balizas cujas características foram apresentadas na Tabela 3, conforme o esquema mostrado na Figura 10. Uma vez definidas as balizas, o casco foi gerado a partir da determinação da superfície suave que melhor interpolava o conjunto de balizas modeladas (figura 11). A Figura 12 apresenta o resultado final da modelagem do casco.

Figura 10 – Baliza posição 0,1 L



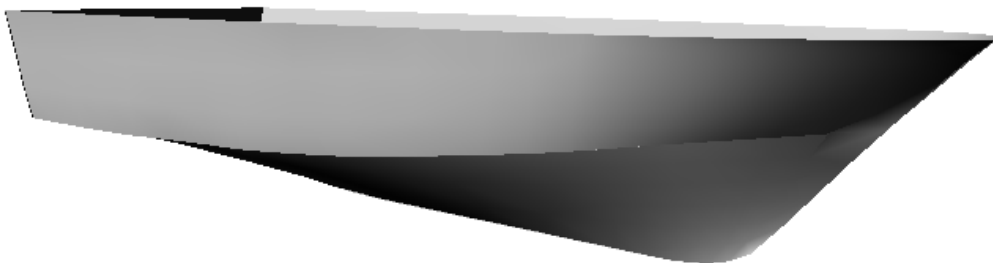
Fonte: O Autor (2018)

Figura 11 – Balizas que geraram a superfície do casco



Fonte: O Autor (2018)

Figura 12 – Casco modelado pelo Rhinoceros



Fonte: O Autor (2018)

Um bom modelo, com superfície contínua, é de fundamental importância para as simulações de elementos finitos e CFD, tendo em vista que a malha será gerada a partir da geometria que será exportada pelo programa CAD, no formato IGES ou STEP.

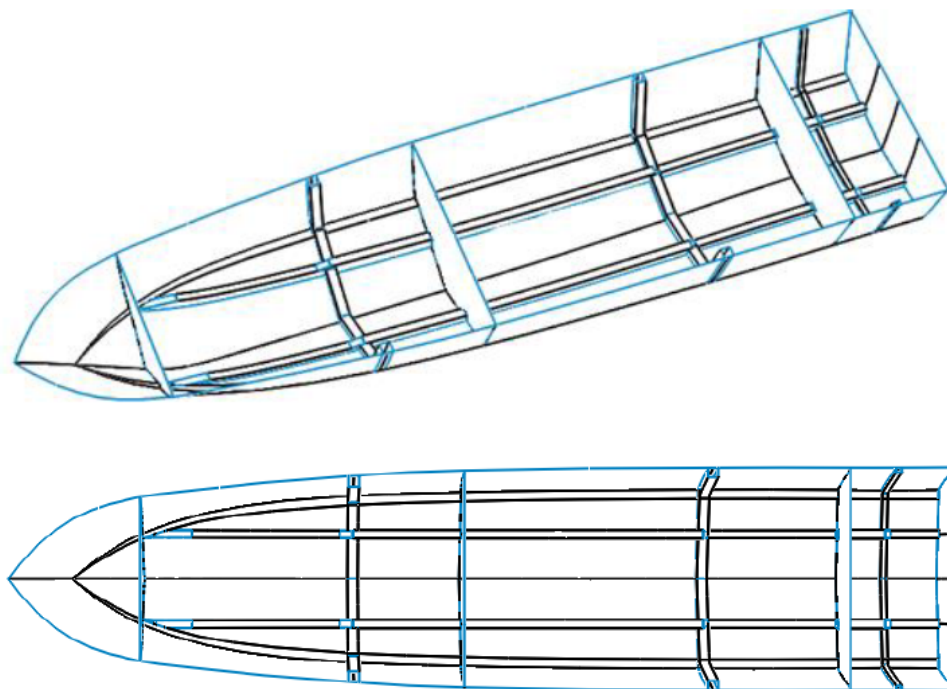
Usualmente dever-se-ia realizar uma verificação da precisão da representação do modelo CAD desenvolvido em relação aos dados de projeto propostos por Amaral (2016). No entanto, o objetivo deste trabalho não envolve nenhum tipo de comparação de resultados hidrostáticos, logo a precisão da geometria modelada não precisa ser assegurada.

4.2.2 Arranjo Estrutural

O arranjo estrutural utilizado neste trabalho seguirá aquele desenvolvido por Amaral (2016), em concordância com a norma DNV (2012), em particular com a seção Design Loads (Pt. 3, Ch. 1). A norma define que devem existir pelo menos três anteparas transversais ao longo do comprimento do casco, a anteparada de colisão à vante, e mais duas anteparas que delimitam a praça de máquinas localizadas em 1,5 m, 7,1 m e 11,78 m.

Assim, o arranjo estrutural da embarcação utilizado na modelagem contém 3 cavernas e duas longarinas. As longarinas são posicionadas à 1 metro de cada bordo, enquanto as 3 cavernas transversais são posicionadas à 0,9m, 7,5m e 8,40 m, medidos em relação ao espelho de popa da embarcação. Na Figura 13 é mostrado o arranjo estrutural da embarcação analisada.

Figura 13 – Arranjo Estrutural



Fonte: (AMARAL, 2016)

4.3 Determinação das Pressões

Nesta secção são mostrados os resultados referentes a aplicação das diferentes normas descritas na metodologia visando estimar a distribuição da pressão ao longo do casco da embarcação, cuja modelagem foi descrita na secção anterior.

4.3.1 Cálculo através da norma DNV (2012)

A norma DNV (2012) na secção *Design Loads* (Pt 3, Ch.1) apresenta a formulação para se realizar o cálculo da pressão de slamming ao longo do casco, a qual será apresentada a seguir.

4.3.1.1 Aceleração Vertical

A norma DNV (2012) permite o cálculo da aceleração vertical em função da velocidade de operação e a altura significativa de onda, para $V/\sqrt{L_{pp}} \geq 3$ através da equação 1 :

$$a_{cg} = \frac{k_h g_0}{1650} \left(\frac{H_s}{B_{WL2}} + 0.084 \right) (50 - \beta_{cg}) \left(\frac{V}{L_{pp}} \right)^2 \frac{L_{pp} B_{WL2}^2}{\Delta} \quad (1)$$

onde:

- V = velocidade máxima em operação [nós]
- L_{pp} = comprimento entre perpendiculares [m]
- k_h = fator típico do casco (1 para monocasco)
- g_0 = aceleração da gravidade [m/s^2]
- H_s = altura significativa de onda [m]
- Δ = deslocamento [ton]
- B_{WL2} = boca na linha d'água à meia nau

Nos casos em que $V/\sqrt{L_{pp}} < 3$ utiliza-se a equação 2:

$$a_{cg} = 6 \frac{H_s}{L_{PP}} \left(0.85 + 0.35 \frac{V}{L_{pp}} \right) g_0 \quad (2)$$

Por fim, é importante observar que, para a norma DNV, o cálculo da aceleração vertical de projeto requer que o projetista estabeleça a velocidade e a altura de onda significativa, para as quais será realizado o projeto estrutural da embarcação.

4.3.1.2 Pressão de slamming no fundo

O valor de pressão de slamming é obtido através da equação 3:

$$P_{sl} = 1.3 k_l \left(\frac{\Delta}{nA} \right) T_0^{0.7} \left(\frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} \right) a_{cg} \quad (3)$$

onde:

- k_l = fator de distribuição longitudinal, o qual pode ser visto no anexo A
- n = número de casco
- A = área de projeto [m^2]
- T_0 = calado à meia nau [m]
- β_x = ângulo de deadrise na seção analisada
- β_{cg} = ângulo de deadrise no LCG

Assim, utilizando as equações fornecidas pela DNV (2012) pode-se criar uma planilha Excel para realizar os cálculos das pressões de slamming distribuídas longitudinalmente no casco.

Com intuito de gerar uma grande variedade de informações para análise optou-se por realizar uma análise paramétrica, variando as alturas significativas de onda de 0,15 à 1,2 metros, com um passo de 0,15 metros. Para cada altura de onda analisada, considerou-se uma variação da velocidade entre 5 e 25 nós, com um passo de 5 nós.

A seguir foram geradas tabelas contendo os resultados de cada um das análises, considerando a variação do três parâmetros estudados: posição ao longo do casco, velocidade e altura significativa de onda. Um exemplo da tabela de resultados para a velocidade de 5 nós é mostrado abaixo. As tabelas restantes podem ser vistas no Apêndice B.

Tabela 4 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]

		Posição							
5 nós	Hs	0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
	0,15	1,90	2,20	2,84	2,24	3,59	2,31	2,02	2,19
	0,30	3,79	4,39	5,67	4,47	7,19	4,61	4,03	4,38
	0,45	5,69	6,59	8,51	6,71	10,78	6,92	6,05	6,58
	0,60	7,58	8,79	11,35	8,95	14,38	9,22	8,07	8,77
	0,75	9,48	10,99	14,18	11,18	17,97	11,53	10,08	10,96
	0,90	11,37	13,18	17,02	13,42	21,57	13,83	12,10	13,15
	1,05	13,27	15,38	19,85	15,65	25,16	16,14	14,12	15,35
	1,20	15,16	17,58	22,69	17,89	28,76	18,44	16,13	17,54
	1,35	17,06	19,77	25,53	20,13	32,35	20,75	18,15	19,73
1,50	18,95	21,97	28,36	22,36	35,95	23,06	20,17	21,92	

Fonte: O Autor (2018)

Para facilitar a visualização dos resultado foram gerados gráficos, como mostrado na figura 14. Esses gráficos foram gerados a partir de polinômio de grau 6, equação 4, determinado através da interpolação dos dados tabelados no apêndice B.

$$P_{sl} = p_1x^6 + p_2x^5 + p_3x^4 + p_4x^3 + p_5x^2 + p_6x + p_7 \quad (4)$$

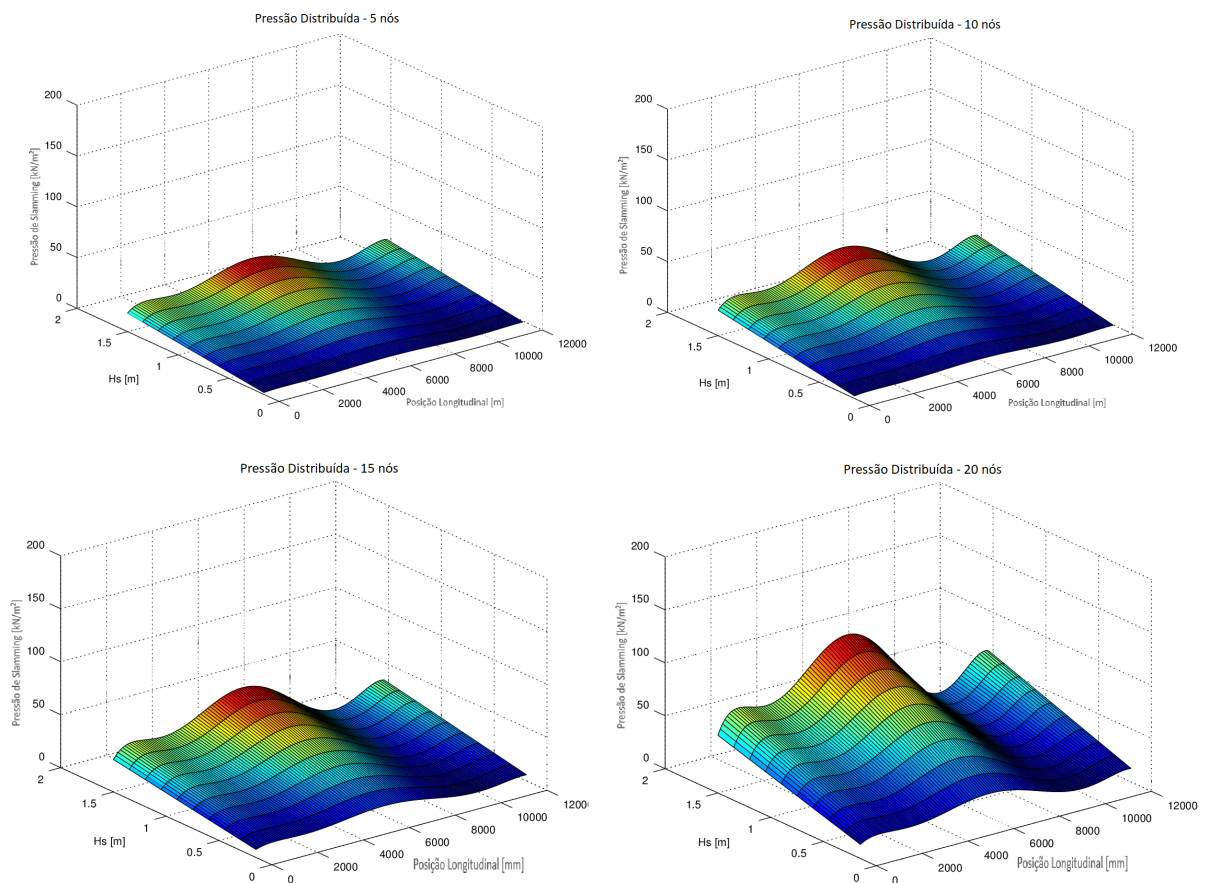
Na Tabela 5 são enumerado os coeficientes da equação 4 referentes a velocidade de 5 nós, considerando diferentes alturas significativas de onda. Os demais coeficientes pode ser vistos no Apêndice C.

Tabela 5 – Coeficientes para a equação 4 - 5 nós

H_S	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0,15	-2,799E-04	1,004E-02	-1,320E-01	7,702E-01	-1,952E+00	1,992E+00	1,827E+00
0,3	-5,598E-04	2,009E-02	-2,640E-01	1,540E+00	-3,904E+00	3,983E+00	3,654E+00
0,45	-8,397E-04	3,013E-02	-3,960E-01	2,311E+00	-5,855E+00	5,975E+00	5,481E+00
0,6	-1,120E-03	4,018E-02	-5,280E-01	3,081E+00	-7,807E+00	7,966E+00	7,308E+00
0,75	-1,400E-03	5,022E-02	-6,600E-01	3,851E+00	-9,759E+00	9,958E+00	9,135E+00
0,9	-1,679E-03	6,026E-02	-7,920E-01	4,621E+00	-1,171E+01	1,195E+01	1,096E+01
1,05	-1,959E-03	7,031E-02	-9,239E-01	5,391E+00	-1,366E+01	1,394E+01	1,279E+01
1,2	-2,239E-03	8,035E-02	-1,056E+00	6,162E+00	-1,561E+01	1,593E+01	1,462E+01
1,35	-2,519E-03	9,040E-02	-1,188E+00	6,932E+00	-1,757E+01	1,792E+01	1,644E+01
1,5	-2,799E-03	1,004E-01	-1,320E+00	7,702E+00	-1,952E+01	1,992E+01	1,827E+01

Fonte: O Autor (2018)

Figura 14 – Pressão de slamming

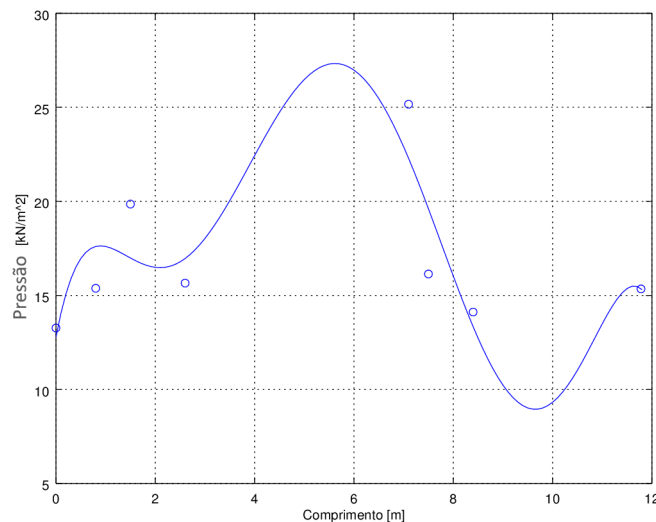


Fonte: O Autor (2018)

Aplicando-se os coeficientes mostrados no Apêndice B na equação 4, pode-se determinar a distribuição das pressões ao longo do casco para qualquer valor de velocidade e altura significativa de ondas. Um exemplo é mostrado na Figura 15, onde pode ser vista a curva que descreve a distribuição da pressão ao longo do casco da

lança quando esta possui velocidade de 5 nós e navega em uma mar com altura significativa de onda de 1,05 metros.

Figura 15 – Distribuição da pressão de slamming - 5 nós / Hs = 1,05 m



Fonte: O Autor (2018)

4.3.2 Cálculo usando a norma ISO (2008)

A parte 5 da norma ISO 12215-5 em seu capítulo 7 apresenta as equações para cálculos das pressões no fundo do casco. Para definir a pressão são necessários: o fator de projeto da categoria (k_{DC}), o fator de carregamento dinâmico (n_{cg}), o fator de distribuição longitudinal (k_L) e o fator de redução de pressão por área (k_{AR}).

4.3.2.1 Fator de projeto da categoria

A tabela 6 estabelece os valores a serem considerados para o fator k_{DC} em função da categoria a qual pertence a embarcação.

Tabela 6 – Valores de k_{DC} de acordo com a categoria de projeto

Design category	A	B	C	D
Value of k_{DC}	1	0,8	0,6	0,4

Fonte: ISO (2008)

As categorias são definidas pela norma ISO (2008) como:

- Categoria A: Oceânica, ou seja, categoria com padrões mais exigentes que abrange embarcações com mais de 40 pés, projetadas para serem auto-suficientes para viagens prolongadas. Considerada como categoria adequada para mares de até 7 metros de altura significativa de onda.
- Categoria B: Offshore, estas embarcações são projetadas para ir ao mar com a capacidade de lidar com ventos de 8 a 40 nós e mares de 3,96 metros.

- Categoria C: Inshore, operam em águas costeiras, grandes baías ou lagos, com ventos de até 27 nós e altura significativa de onda de 2,44 metros.
- Categoria D: Interiores, são embarcações que navegam em águas costeiras interiores ou abrigadas, são tipicamente barcos de uso diurno, operando em portos protegidos pequenos lagos e rios com ventos até 16 nós e altura significativa de onda de 1,22 metros.

Para este estudo considerou-se um projeto de categoria B, representando uma embarcação com capacidade de navegar em mares com ondas significativas de até 3,96 metros.

4.3.2.2 Fator de carregamento dinâmico

O fator de carregamento dinâmico tem o papel de estabelecer uma medida da amplitude da aceleração atuante no centro de gravidade da embarcação, sendo definido pela equação 5.

$$n_{cg} = 0.32 \left(\frac{L_{pp}}{10B} \right) \times (50 - \beta) \times \frac{V^2 B^2}{m_{LDC}} \quad (5)$$

Onde:

- L_{PP} = comprimento entre perpendiculares [m]
- B = boca da embarcação [m]
- β = ângulo de deadrise [graus]
- V = velocidade de operação [nós]
- m_{LDC} = deslocamento da embarcação [kg]

4.3.2.3 Fator de distribuição longitudinal

Este fator defini a influência da posição longitudinal analisada na a distribuição da pressão no fundo do casco, sendo determinado pelas equações 6 e 7.

$$k_L = \frac{1 - 0.167 \times n_{CG}}{0.6} \frac{x}{L_{PP}} + 0.167 \times n_{CG} \quad \text{quando } \frac{x}{L_{PP}} \leq 0.6 \quad (6)$$

e,

$$k_L = 1 \quad \text{quando } \frac{x}{L_{PP}} > 0.6 \quad (7)$$

No anexo A é apresentado a representação gráfica das equações utilizadas no cálculo do fator de distribuição longitudinal (k_L), considerando alguns valores de n_{CG} .

Tabela 7 – Área dos painéis do fundo do casco

Posição	Área do Painel [m^2]	Espessura do painel [mm]
0,00	0,68	11,00
0,80	0,60	11,00
1,50	0,34	11,00
2,60	4,42	11,00
7,10	0,34	11,00
7,50	0,90	11,00
8,40	2,31	11,00
11,78	0,39	11,00

Fonte: O Autor (2018)

4.3.2.4 Fator de redução de pressão por área

O fator de redução de pressão por área k_{AR} defini a variação de pressão em função do tamanho do painel do fundo do casco da embarcação, podendo ser definido pela equação 8.

$$k_{AR} = \frac{k_R \times 0.1 \times m_{LDC}^{0.15}}{A_D^{0.3}} \quad (8)$$

Onde:

- $k_R = 1$, para os painéis do fundo em operação de planeio
- m_{LDC} = deslocamento [kg]
- A_D = área de projeto do painel [m^2]

Diferentemente das embarcações com casco deslocante, as embarcações de alta velocidade estão sujeitas a cargas dinâmicas associadas a colisão do casco contra a superfície da água. Assim, quanto mais rígido for o painel, mais energia do impacto é transferida para a estrutura, pois painéis menos rígidos, absorvem parte dessa energia por meio da deformação elástica.

4.3.2.5 Pressão de slamming

Por fim, a pressão dinâmica no fundo do casco é dada pela equação 9:

$$P_{BMD} = P_{BMD \text{ BASE}} \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \quad (9)$$

Onde:

- $P_{BMD \text{ BASE}} = 2.4m_{LDC}^{0.33} + 20$ [kN/m^2]

Visando viabilizar o cálculo da pressão de slamming, utilizando a norma ISO (2008), na tabela 7 são apresentados os valores de área dos painéis do fundo pertencentes a estrutura da lancha selecionada (Figura 13) e que foram utilizados nas análises realizadas.

A partir dos valores de área das chapas dos painéis mostrados na Tabela 7, e utilizando as equações definidas nesta seção, é possível realizar o cálculo da pressão de slamming no fundo da embarcação estudada para diferentes velocidades. Como exemplo de aplicação, na tabela 8 é apresentada a distribuição da pressão de slamming calculada ao longo do comprimento para uma velocidade de 5 nós e a condição de operação na categoria B.

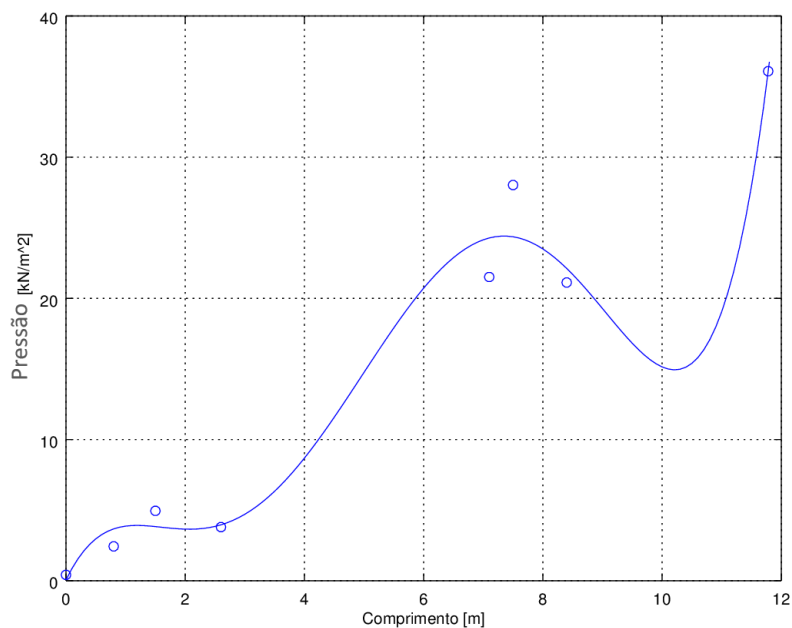
Tabela 8 – Pressão de slamming em função da posição longitudinal - [kN/m^2]

	Posição							
	0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
P_BMD	0,42	2,44	4,95	3,80	21,51	28,03	21,12	36,09

Fonte: O Autor (2018)

Novamente utiliza-se a técnica da seção anterior para gerar um polinômio interpolador de grau 6 (equação 4), que permita interpolar os valores discretos de pressão mostrados na Tabela 8. Por fim, na Figura 16 são mostrados os dados discretos enumerados na Tabela 8 e a curva construída a partir do polinômio interpolador.

Figura 16 – Valores de pressão em função do comprimento da embarcação



Fonte: O Autor (2018)

4.3.3 Cálculo usando a ABS (2018)

Nesta seção é apresentado o procedimento para estimativa da pressão ao longo do casco de uma embarcação de alta velocidade proposto pela norma ABS (2018) referente ao projeto de embarcações de alta velocidade.

4.3.3.1 Aceleração vertical

Para os estágios iniciais de projeto, a ABS (2018) define como uma boa estimativa para a aceleração vertical a equação 10:

$$n_{cg} = N_2 \left[\frac{12H_s}{B} + 1.0 \right] \tau [50 - \beta_{cg}] \frac{V^2(B)^2}{\Delta} g \quad (10)$$

onde:

- g = aceleração da gravidade
- $N_2 = 0,0078$
- H_s = altura significativa de onda
- B = boca na altura da linha d'água
- τ = trim
- V = velocidade de operação
- Δ = deslocamento
- β_{cg} = ângulo de deadrise no cg

4.3.3.2 Pressão de slamming

A norma ABS (2018) define que, para embarcações menores que 61 metros o cálculo da pressão de slamming para painéis localizados abaixo da linha do chine do casco deve ser realizado utilizando-se a equação 11.

$$P_{bxx} = \frac{N_1 \Delta}{L_{pp} B} [1 + n_{cg}] F_D F_V \quad (11)$$

onde:

- $N_1 = 0,1$
- F_D = fator de área do projeto, o qual é visto no anexo A.
- F_V = fator de aceleração vertical, o qual é visto no anexo A.

Para a determinação do fator de área de projeto é utilizada a relação de A_D/A_R , onde A_D representa a área de projeto dos painéis que constituem o fundo da embarcação (medido em cm^2) e A_R refere-se a um valor de referência calculado pela equação 12 (medido em cm^2):

$$A_R = 6.95 \frac{\Delta}{d} \quad (12)$$

A importância da área do painel no cálculo da pressão dinâmica de uma lancha deve-se ao efeito resultante do impacto do casco com a água, e já foi discutida na seção anterior.

Definidos os parâmetros estabelecidos pela norma ABS (2018), foi possível gerar uma planilha com as informações referentes a pressão de slamming distribuída no fundo da embarcação estudada, considerando-se diferentes velocidades e alturas

significativas de onda. A tabela 9 apresenta um exemplo dos resultados obtidos através dos cálculos da ABS (2018).

Tabela 9 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]

	Hs	Posição							
		0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
5 nós	0,15	16,09	28,44	32,10	32,67	27,41	25,93	22,08	11,18
	0,3	16,20	28,64	32,33	32,89	27,60	26,11	22,23	11,26
	0,45	16,32	28,83	32,55	33,12	27,79	26,29	22,38	11,33
	0,6	16,43	29,03	32,77	33,35	27,98	26,47	22,54	11,41
	0,75	16,54	29,23	33,00	33,58	28,17	26,65	22,69	11,49
	0,9	16,65	29,43	33,22	33,80	28,36	26,83	22,84	11,57
	1,05	16,76	29,62	33,44	34,03	28,55	27,01	23,00	11,64
	1,2	16,87	29,82	33,67	34,26	28,74	27,19	23,15	11,72
	1,35	16,99	30,02	33,89	34,48	28,93	27,37	23,30	11,80
	1,5	17,10	30,22	34,11	34,71	29,12	27,55	23,46	11,88

Fonte: O Autor (2018)

Observa-se na figura 9 que existe pouca variação da pressão em função da altura significativa de onda. Assim, para as análises futuras, será considerada apenas a altura significativa de onda sugerida pela ABS (2018), conforme tabela 10.

Tabela 10 – Altura significativa de onda de projeto [m]

	Operational Condition	
	$h_{1/3}$	V
Naval Craft	4 m (13 ft)	$V_m^{(2)}$
Coastal Naval Craft	2.5 m (8.5 ft)	$V_m^{(2)}$
Riverine Naval Craft	0.5 m (1.75 ft)	$V_m^{(2)}$

Fonte: ABS (2018)

Para a condição de operação de uma embarcação costeira será assumido um valor fixo de altura significativa de onda de 2,5 metros, resultando nas informações da tabela 11, as quais consideram uma velocidade de 5 nós.

Tabela 11 – Pressão de slamming em função da velocidade e posição [kN/m^2]

Hs	Posição							
	0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
2,5	17,84	31,54	35,60	36,22	30,39	28,75	24,48	12,39

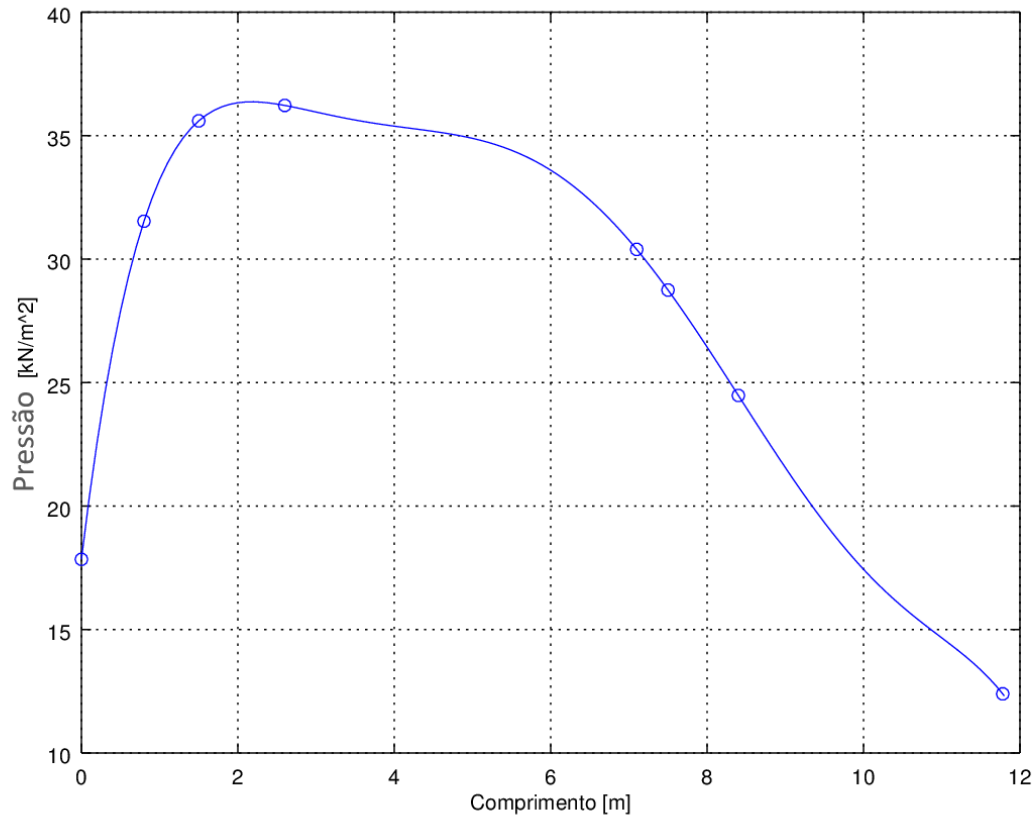
Fonte: O Autor (2018)

De posse dos valores discretos calculados aplicando-se o procedimento estabelecido pela norma ABS (2018), realizou-se o mesmo procedimento de interpolação descrito nos capítulos anteriores, utilizando-se um polinômio interpolador de grau 6 (equação 4).

A partir dos dados da figura 11 e do polinômio interpolador, foi gerado o gráfico mostrado na figura 17 que apresenta a distribuição de pressão ao longo do casco da

embarcação estudada, considerando uma altura significativa de onda de 2,5 metros e uma velocidade de operação de 5 nós.

Figura 17 – Distribuição de pressão de slamming -



Fonte: O Autor (2018)

4.4 Simulação estrutural - Método de Elementos Finitos

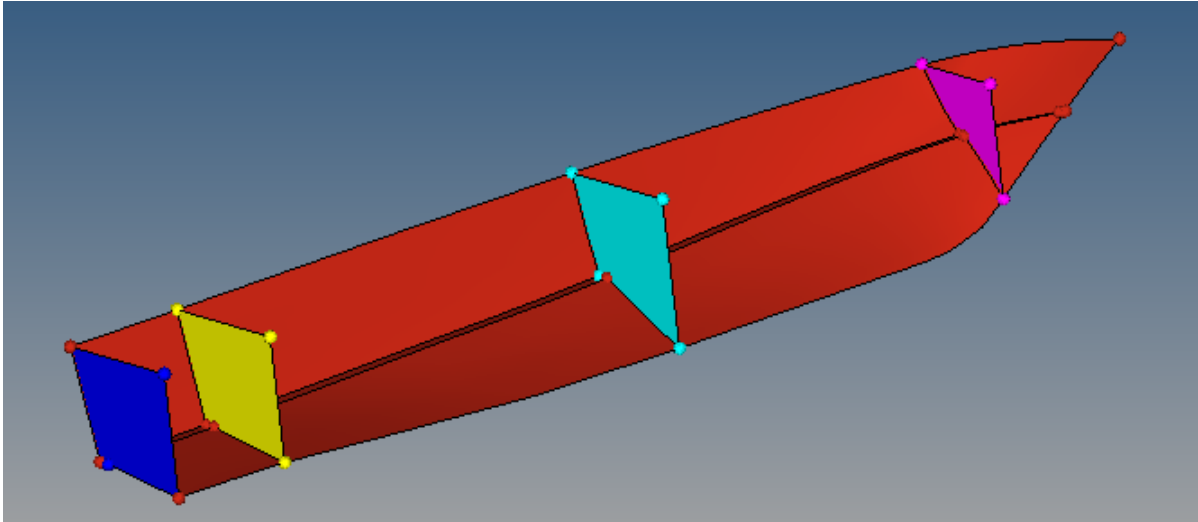
Conforme a metodologia proposta, a primeira etapa da simulação estrutural consiste na importação da geometria modelada no programa Rhinoceros (no formato IGES) para o programa de análise estrutural Hyperworks.

Como mostrado na figura 18 importou-se apenas metade do casco, seccionado longitudinalmente ao longo do plano diametral da embarcação. O uso de planos de simetria é uma clássica estratégia para reduzir o tempo de processamento em análises numéricas de embarcações, tal como pode ser visto em Iervolino (2015), Amaral (2016) e Kopetski (2017).

4.4.1 Criação da malha

O programa Hyperworks apresenta um módulo de criação de malhas (hypermesh), no qual é definido o tipo de malha desejada, bem como o tamanho

Figura 18 – Casco importado para o Hyperworks

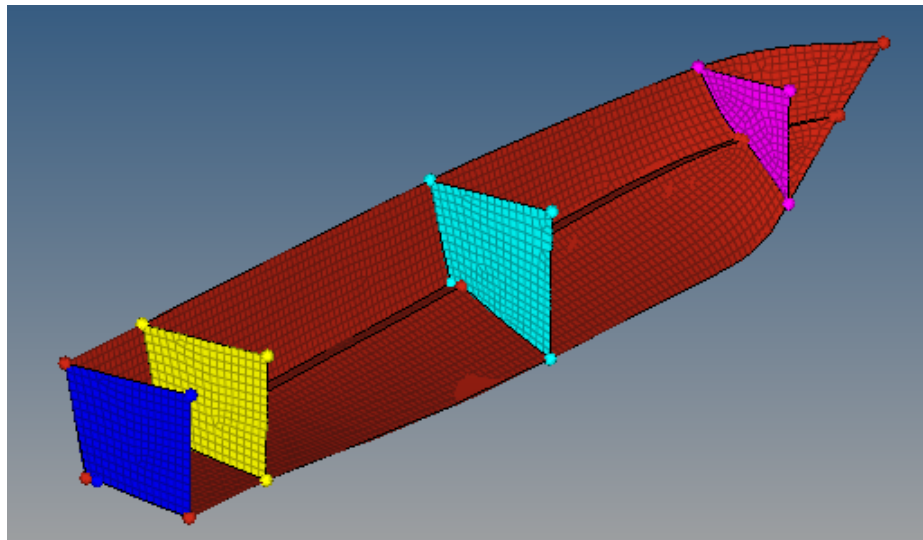


Fonte: O Autor (2018)

padrão dos elementos utilizados na discretização da estrutura.

Baseado na experiência de Kopetski (2017), que utilizou o mesmo programa, o mesmo tipo de elemento e um modelo bastante similar de arranjo estrutural, utilizou-se elementos do tipo shell com discretização regular tamanho médio de 50 a 100 mm. Na figura 19 é representada a geometria contendo a malha criada.

Figura 19 – Casco importado para o Hyperworks



Fonte: O Autor (2018)

É importante observar que a geometria modelada contém os reforçadores longitudinais e transversais descritos na figura 13, porém a representação visual do programa oculta tais elementos da escala utilizada na visualização

4.4.2 Definição das propriedades do elemento


Para a realização da simulação deve-se definir as propriedades referentes ao tipo de elemento utilizado na análise, incluindo-se a definição de um eventual sub tipo elemento.

Conforme descrito na fundamentação teórica e na metodologia proposta, com base em diversos trabalhos anteriores e buscando a viabilização do tempo computacional gasto com as análises realizadas, optou-se por utilizar elementos bidimensionais (casca) na modelagem do problema.

Entre os diversos elementos do tipo casca, seguindo-se o procedimento estabelecido por Kopetski (2017), optou-se pelo elemento Shell Quad P(8) o qual é denominado pelo programa como PShell, cujas características permitem modelar corretamente os fenômenos envolvidos na análise de estruturas baseadas em cascas finas reforçadas por grelhas ortogonais sujeitas a carregamentos ortogonais ao chapeamento. As recomendações de uso, bem como os detalhes da formulação do elemento podem ser consultadas em Altair (2018).

Na figura 20 é apresentada a janela do programa hyperworks para definição das propriedades do elemento, onde também é definida a espessura do chapeamento. Conforme mostrado na Tabela 7, na geometria analisada, todo o chapeamento possui 11 mm de espessura.

Figura 20 – Propriedades da geometria a ser simulada

Name	Value
Solver Keyword	PSHELL
Name	PROP_CASCO
ID	1
Color	
Include File	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image	PSHELL
Material	ALUMINIO (1)
User Comments	Hide In Menu/Export
T	11.0


Fonte: O Autor (2018)

4.4.3 Definição do material

Na aba de propriedades do elemento discutida na seção anterior, deve-se ainda definir o material utilizado na modelagem. Conforme discutido anteriormente na fundamentação teórica, neste trabalho será utilizado o alumínio, cujas propriedades foram listadas na tabela 1.

O material é definido na interface do programa por meio da janela mostrada na figura 21, na qual são inseridas as diversas propriedades, tais como, o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (NU), entre outras.

Figura 21 – Definição do material no programa

Name	Value
Solver Keyword	MAT1
Name	ALUMINIO
ID	1
Color	
Include File	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image	MAT1
User Comments	Hide In Menu/Export
E	69000.0
G	
NU	0.33

Fonte: O Autor (2018)

4.4.4 Condições de Contorno

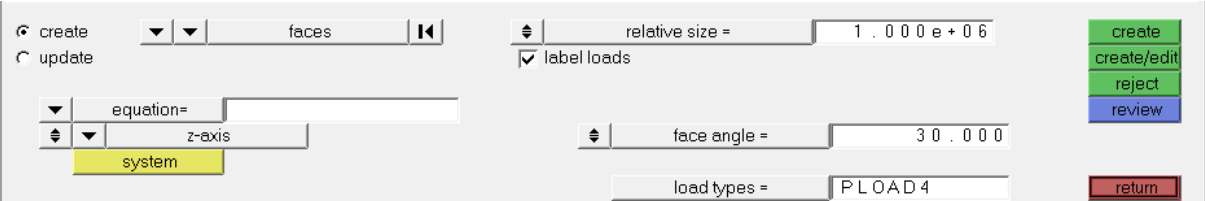
A etapa seguinte refere-se a definição das condições de contorno, que neste caso, representam o carregamento distribuído no fundo do casco, bem como as condições de contorno referentes ao equilíbrio do modelo.

4.4.4.1 Pressão distribuída

A distribuição da pressão ao longo da posição longitudinal da embarcação é realizada utilizando-se o polinômio interpolador referente a cada um dos casos analisados, cuja construção foi amplamente discutida ao longo deste capítulo.

A implementação do carregamento distribuído a partir do polinômio interpolador é realizada na interface do programa por meio da janela mostrada na figura 22, preenchendo-se o campo denominado "equation".

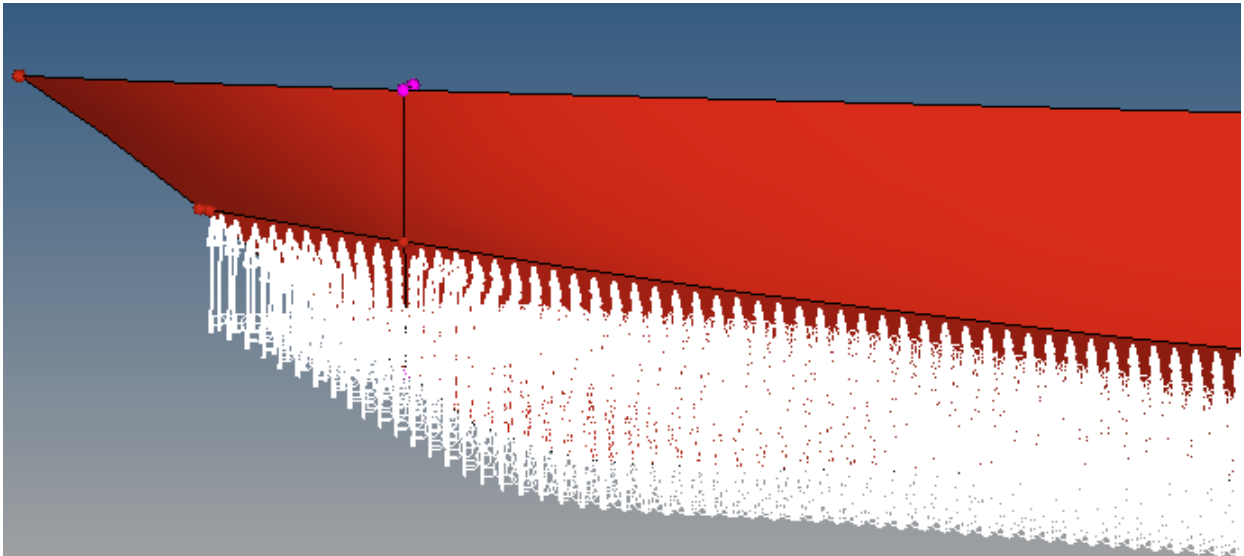
Figura 22 – Janela para inclusão da equação da distribuição da pressão



Fonte: O Autor (2018)

Uma vez definida a equação que descreve o carregamento proposto, o programa se encarrega de realizar o cálculo e a aplicação dos vetores de carga a cada um dos elementos discretizados. O resultado final deste processo pode ser visto na figura 23.

Figura 23 – Exemplo referente a distribuição da pressão no fundo do casco



Fonte: O Autor (2018)

4.4.4.2 Fixação dos graus de liberdade

A aplicação de forças e pressões em estruturas pode resultar em dois efeitos distintos. O primeiro ocorre quando a resultante de tais esforços não é nula. Neste caso, a resultante provoca o movimento do corpo, e o problema passa a ser um problema de dinâmica, o qual é fundamental para a análise de comportamento no mar, resistência ao avanço e manobra de uma embarcação; mas pouco guarda relação com a análise estrutural do casco.

Já o segundo, refere-se as situações onde a resultante dos esforços atuantes na embarcação é nula, ou seja, auto-equilibrada. Neste caso, os esforços provocam a deformação dos elementos estruturais e, por conseguinte, as tensões sofridas pela estrutura; levando à eventual falha estrutural.

O objetivo da aplicação do método dos elementos finitos é justamente realizar a análise estrutural da embarcação. No entanto, o processo de discretização da geometria invariavelmente impede que se consiga um equilíbrio numérico dos esforços.

Em análises envolvendo estruturas vinculadas ao solo, tal característica é de pouca importância, pois eventuais resíduos numéricos são absorvidos por variações infinitesimais das reações ocorridas nos vínculos.

Sendo assim, no caso de embarcações, a definição da condição de fixação é um fator primordial na simulação da estrutura, tendo em vista que a embarcação não deve possuir movimentação de corpo rígido (AMARAL, 2016), outrossim o programa não conseguiria realizar os cálculos para solucionar as equações de equilíbrio.

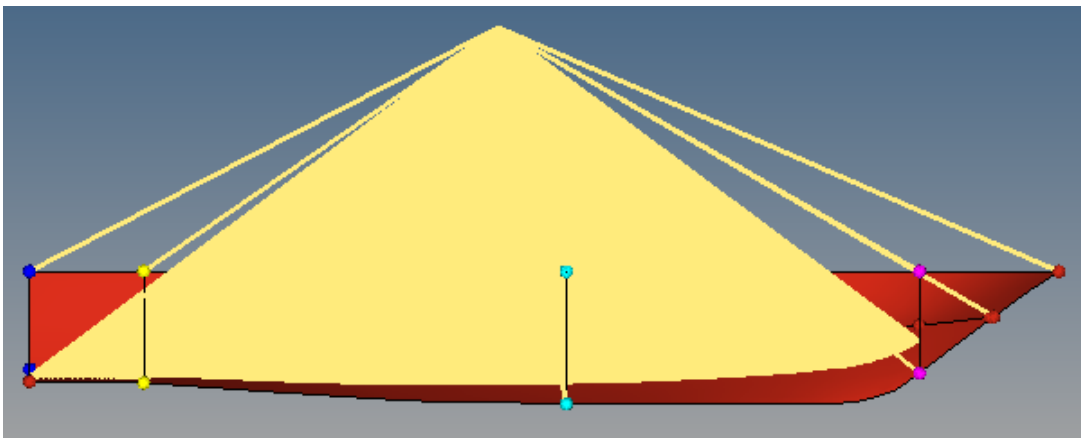
Existem diversas estratégias que visam mitigar esse problema. Para este trabalho optou-se por seguir a metodologia estabelecida por Amaral (2016) e Kopetski (2017) que consiste em se utilizar elementos do tipo RBE3, os quais ligam os nós

da malha dos reforçadores longitudinais e das cavernas (nós escravos) aos graus de liberdade de um ponto de referência (nó mestre) posicionado acima da embarcação. O nó mestre deve ser ligado a outro ponto por meio de elemento "spring", restringindo assim todos os graus de liberdade do nó mestre.

Assim, os esforços do nó mestre, os quais representam a reação aos esforços externos aplicados à estrutura, são transferidos aos nós escravos de maneira equilibrada.

A aplicação das condições de contorno visando assegurar o equilíbrio da estrutura é mostrada na figura 24. É importante observar que os elementos RBE3 (em amarelo) têm característica de transmitir integralmente os esforços, em teoria, não afetando o resultado da análise.

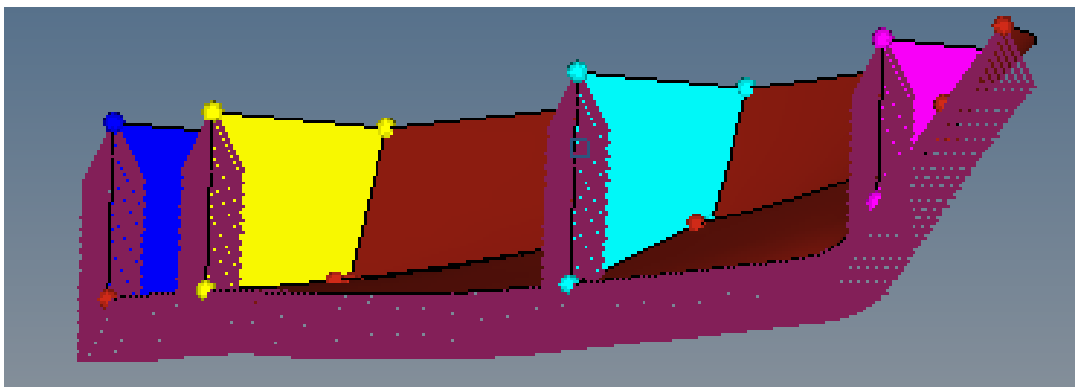
Figura 24 – Elementos RBE3



Fonte: O Autor (2018)

Por fim, os nós que encontram-se no plano longitudinal de simetria devem ter restringidos os graus de liberdade de deslocamento no eixo transversal, rotação em torno do eixo longitudinal e em torno do eixo vertical; para que a simulação represente de fato o comportamento de uma estrutura simétrica.

Figura 25 – Restrição de simetria



Fonte: O Autor (2018)

5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos cálculos das pressões através das equações sugeridas pelas normas: DNV (2012), ISO (2008) e ABS (2018), além do resultado da análise das tensões no casco devido a pressão proveniente de cada norma estudada.

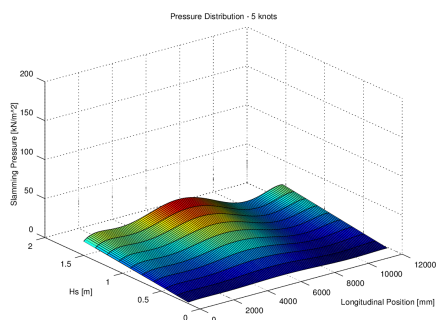
5.1 Análise das pressões - DNV (2012)

A norma DNV (2012) através das equações 2 e 3 definem os valores da pressão de slamming em função da altura de onda e da velocidade de operação da embarcação. Seguindo o desenvolvimento apresentado foram geradas tabelas variando a velocidade de 1 à 25 nós e altura significativa de onda 0,15 à 1,5 metros. O Conjunto completo dos resultados é tabelado no Apêndice D.

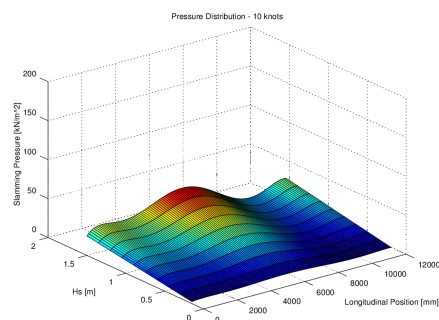
A partir das informações das pressões em função da altura significativa de onda, e da posição longitudinal, foi gerado um gráfico para cada velocidade, com a finalidade de facilitar a compreensão dos dados obtidos. A seguir apresentam-se os gráficos para as velocidades de 5, 10, 15 e 25 nós, os gráficos restantes podem ser vistos no apêndice E.

Figura 26 – Distribuição da pressão segundo a DNV (2012)

(a) Velocidade - 5 nós



(b) Velocidade - 10 nós

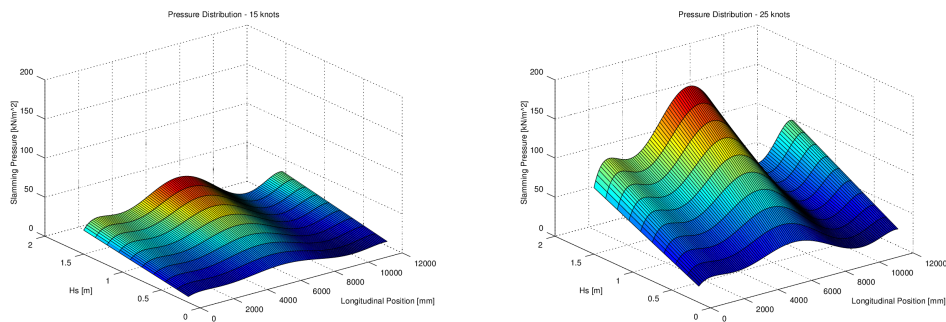


Fonte: O Autor (2018)

Figura 27 – Distribuição da pressão segundo a DNV (2012)

(a) Velocidade - 15 nós

(b) Velocidade - 25 nós

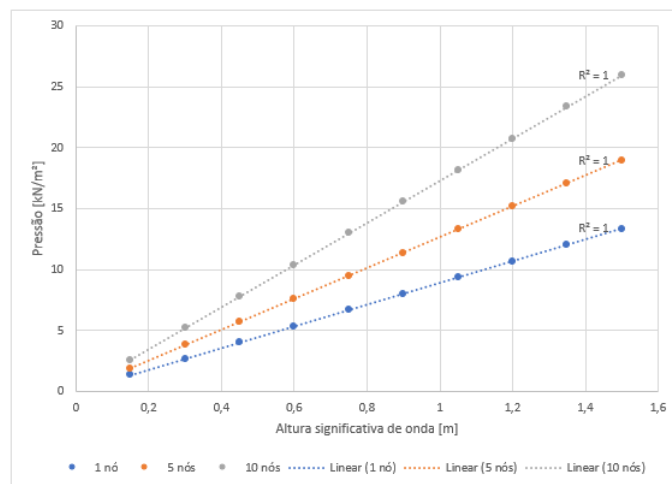


Fonte: O Autor (2018)

Observando os valores obtidos para pressão de slamming estimados pela norma DNV (2012), verificou-se um crescimento linear na pressão em função da altura significativa de onda nos casos em que a velocidade da embarcação é de até 10 nós.

Esse fato pode ser verificado analisando-se os valores da pressão estimados na posição 0,0 considerando-se a velocidades de 1, 5 e 10 nós, os quais são apresentados no gráfico a seguir. Observa-se que as regressões lineares possuem aderência quase perfeita para os 3 conjuntos de dados referentes as velocidades analisadas.

Figura 28 – Influência da altura significativa de onda DNV (2012)



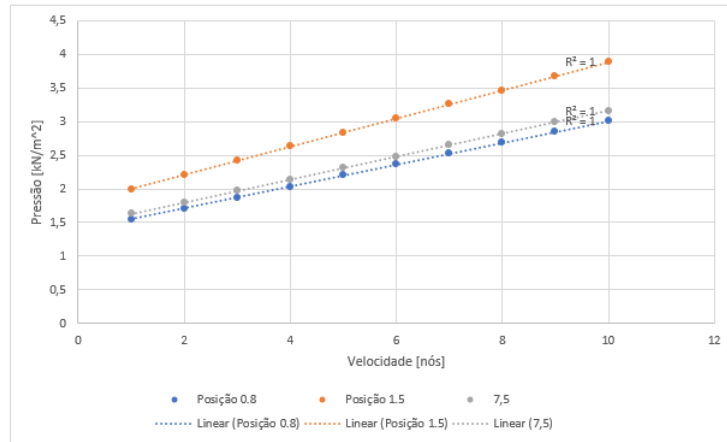
Fonte: O Autor (2018)

Tal constatação permite que, eventualmente, sejam estimadas apenas o valor da pressão de slamming em cada posição longitudinal da embarcação, considerando-se uma altura significativa de onda de 0,15 metros. E a partir desses resultados, sejam estimados os valores de pressão para as demais alturas, utilizando-se as relações lineares observadas na figura 28.

Observou-se também que uma relação linear entre a pressão e a velocidade da embarcação, considerando-se a mesma posição longitudinal e a mesma altura de onda. Tal relação vale para velocidades menores do que 10 nós e pode ser vista no

gráfico da figura 29.

Figura 29 – Influência da velocidade DNV (2012)

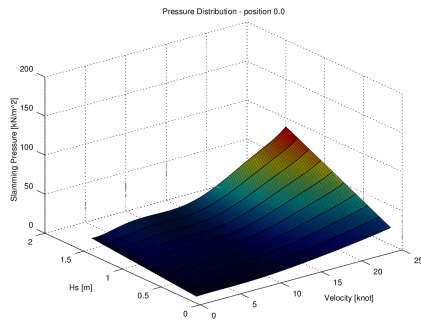


Fonte: O Autor (2018)

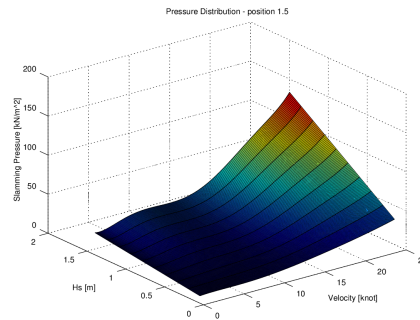
É importante observar que, a partir da velocidade de 11 nós, não foi possível constatar nenhuma inferência ou padrão nos dados obtidos. Sendo assim, para facilitar a visualização dos dados foram gerados gráficos da pressão de slamming para as diferentes posições longitudinais, em função da velocidade e altura significativa de onda. A seguir são mostrados os gráficos para as posições 0,0, 1,5, 2,6, 7,5, 8,4 e 11,78.

Figura 30 – Distribuição da pressão

(a) Posição 0,0 metros



(b) Posição 1,5 metros

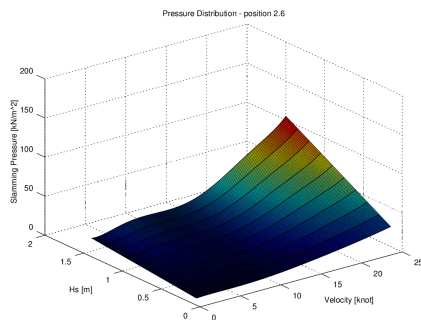


Fonte: O Autor (2018)

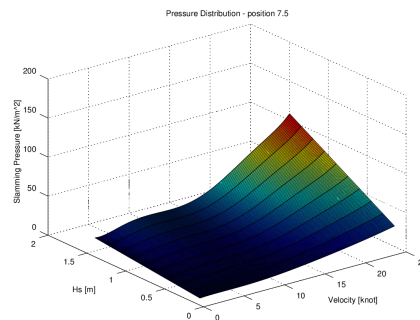
Por fim, também foi realizado um estudo da pressão de slamming em cada altura de onda significativa, gerando gráficos em função da velocidade e posição longitudinal. Os gráficos referentes aos estudos realizados podem ser vistos no apêndice E.

Figura 31 – Distribuição da pressão

(a) Posição 2,6 metros



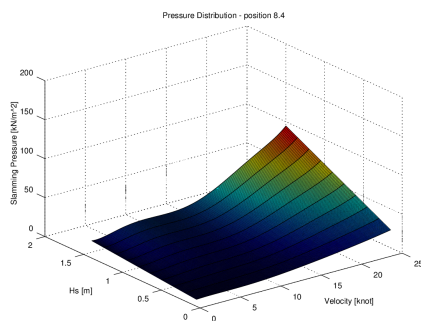
(b) Posição 7,5 metros



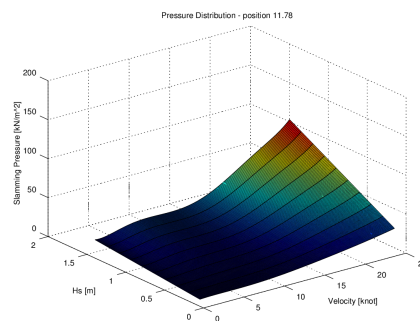
Fonte: O Autor (2018)

Figura 32 – Distribuição da pressão

(a) Posição 8,4 metros



(b) Posição 11,78 metros



Fonte: O Autor (2018)

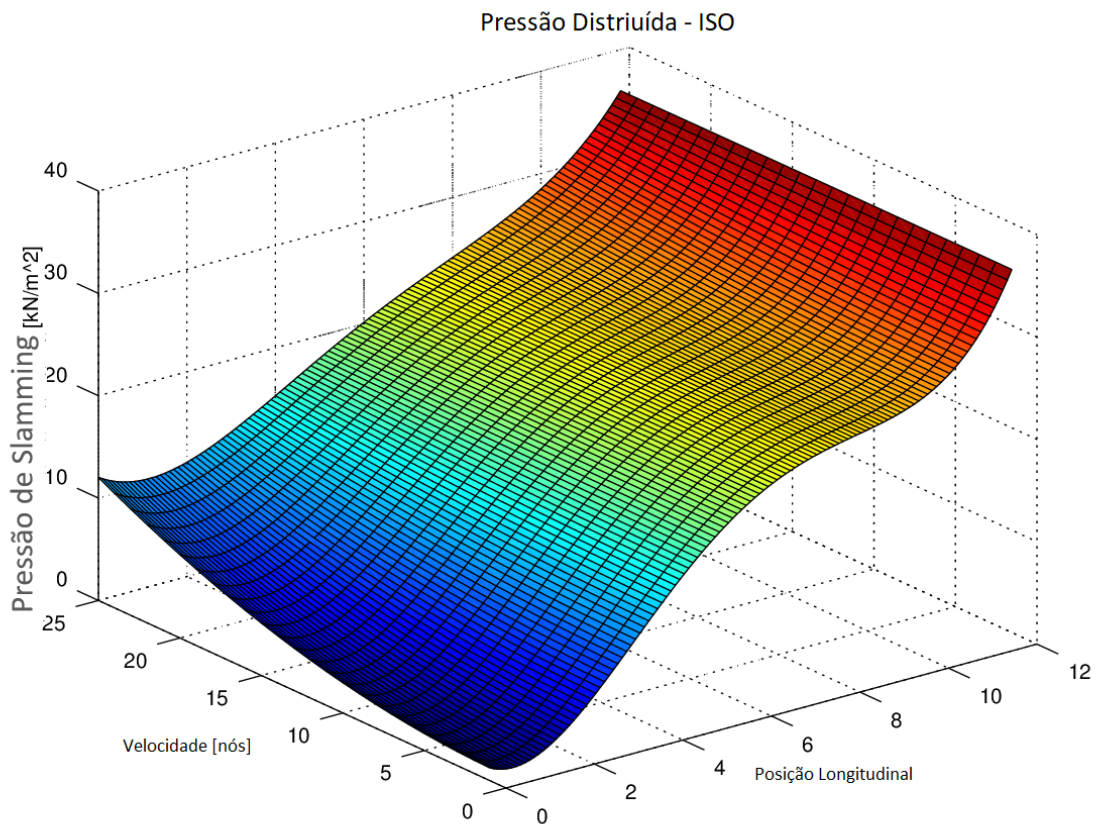
5.2 Análise das pressões - ISO (2008)

Pelos cálculos de pressão de slamming pela norma ISO (2008) não é possível definir explicitamente uma pressão para diferentes alturas de onda significativas, tendo em vista que para este quesito a ISO (2008) define um fator de categoria de projeto, K_{DC} , o qual carrega implícito uma altura de onda em que a embarcação poderá navegar com segurança.

Assim, realizou-se a análise paramétrica para as 4 categorias de projeto descritas no desenvolvimento, e cujos resultados são mostrados no apêndice E.

Observou-se que, como o fator de distribuição de pressão longitudinal (K_L) assume o valor igual a 1 após cruzar 60% do comprimento da embarcação (a partir da popa), para a lancha analisada, os valores de pressão não variam em função da velocidade a partir da posição 7,50 metros.

Figura 33 – Distribuição de pressão - ISO

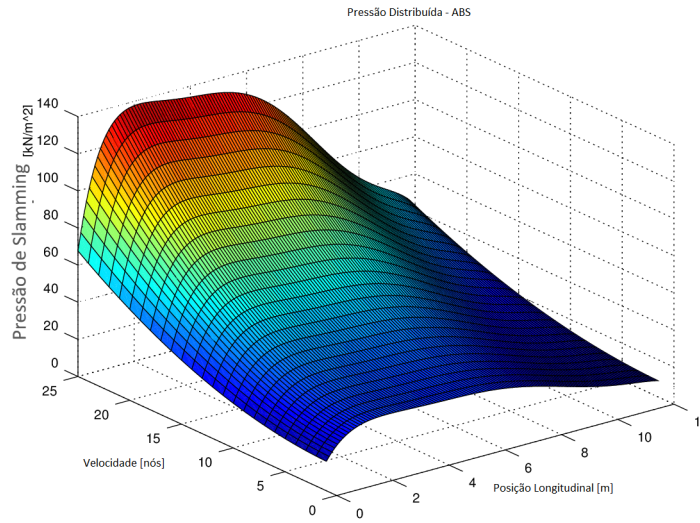


Fonte: O Autor (2018)

5.3 Análise das pressões - ABS (2018)

Como definido na seção de metodologia para o cálculo da pressão seguindo a norma ABS (2018), foi gerada a tabela 41 mostrada no apêndice E, com os valores da pressão de slamming variando a velocidade de operação da embarcação, e mantendo a altura significativa de onda conforme a condição de operação mostrado na figura 10.

Figura 34 – Distribuição de pressão - ABS



Fonte: O Autor (2018)

5.4 Comparação entre os métodos

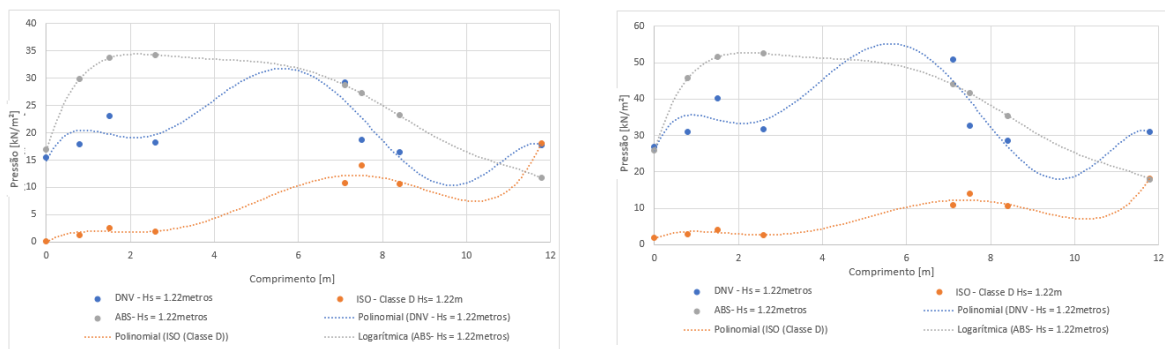
Nesta secção é apresentada a comparação entre os resultado estimados pelas normas DNV (2012), ABS (2018) e ISO (2008) para a distribuição da pressão ao longo da embarcação analisada.

Para viabilizar a comparação, utilizou-se as alturas de ondas estabelecidas pela norma ISO (2008) para as diferentes categorias de projeto definidas na norma. Já para estudar uma eventual influência da velocidade nessa análise, realizou-se o procedimento considerando as velocidades de 5, 15 e 25 nós. Os resultado são então sintetizados nos gráficos apresentados nas figuras 35, 36, 37.

Figura 35 – Comparação entre as pressões

(a) Altura significativa de onda 1,22 metros e 5 nós

(b) Altura significativa de onda 1,22 metros e 15 nós

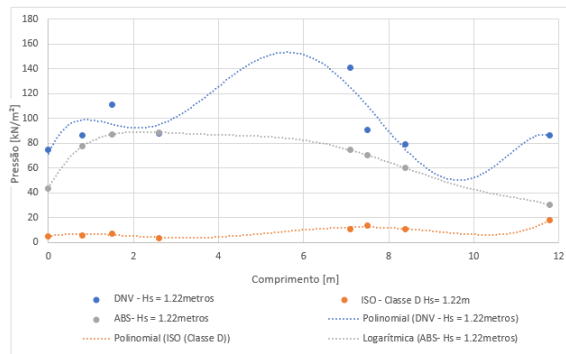


Fonte: O Autor (2018)

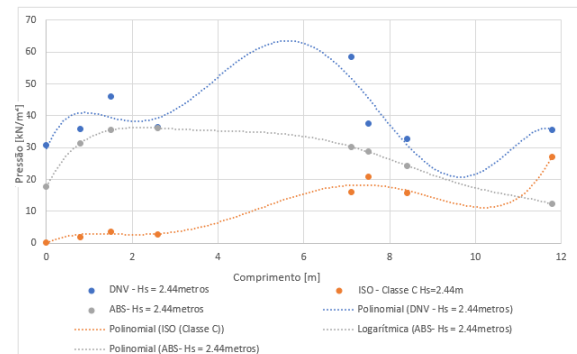
É importante destacar que as diferenças observadas não podem ser consideradas como definições absolutas sobre o grau de conservadorismo de cada

Figura 36 – Comparação entre as pressões

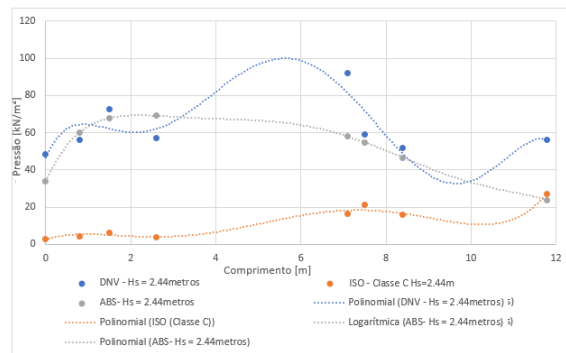
(a) Altura significativa de onda 1,22 metros e 25 nós



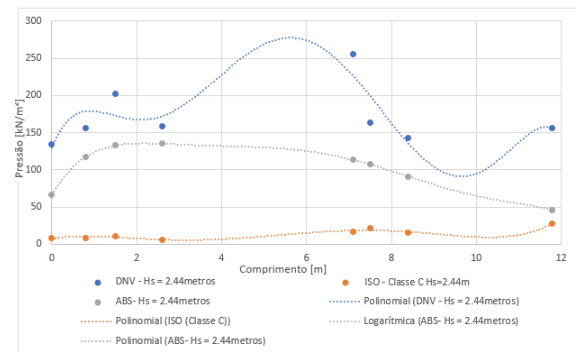
(b) Altura significativa de onda 2,44 metros e 5 nós



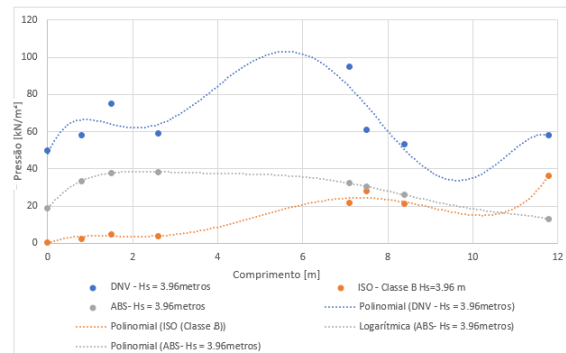
(c) Altura significativa de onda 2,44 metros e 15 nós



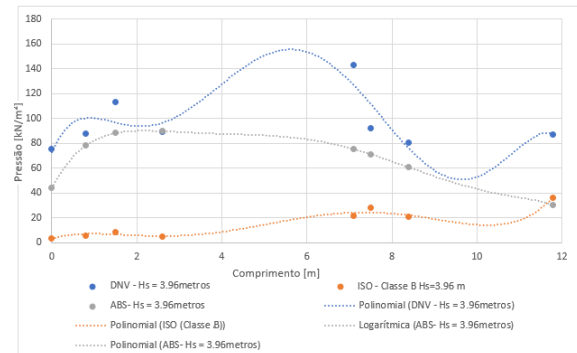
(d) Altura significativa de onda 2,44 metros e 25 nós



(e) Altura significativa de onda 3,96 metros e 5 nós



(f) Altura significativa de onda 3,96 metros e 15 nós



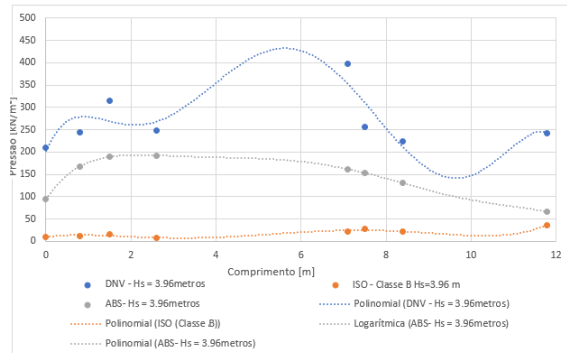
Fonte: O Autor (2018)

norma. Isso porque a aplicação de uma norma para o projeto estrutural de uma embarcação possui essencialmente dois componentes: a estimativa de carga atuante e o projeto estrutural propriamente dito.

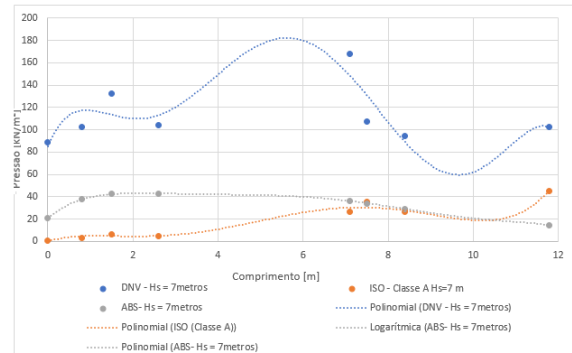
Assim, é possível que uma norma seja mais conservadora na estimativa dos esforços e menos conservadora no dimensionamento estrutural, ou então o contrário, apresentando um dimensionamento mais conservador aplicado sobre um carregamento menos conservador. É por essa razão que deve-se evitar, sempre que possível, misturar equações empíricas obtidas de normas diferentes.

Figura 37 – Comparação entre as pressões

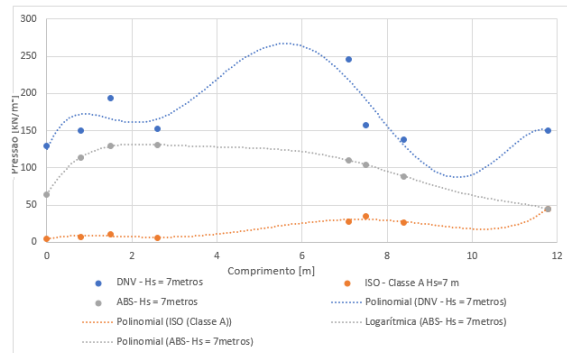
(a) Altura significativa de onda 3,96 metros e 25 nós



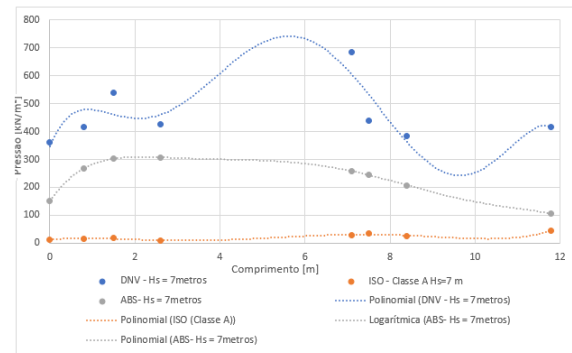
(b) Altura significativa de onda 7 metros e 5 nós



(c) Altura significativa de onda 7 metros e 15 nós



(d) Altura significativa de onda 7 metros e 25 nós



Fonte: O Autor (2018)

Logo, os resultados aqui obtidos podem ser discutidos apenas no contexto da estimativa dos campos de pressão, uma vez que uma conclusão mais geral requereria, a partir da estimativa dos campos de pressão, a determinação do projeto estrutural utilizando cada uma das normas estudadas.

5.5 Análise estrutural utilizando o método dos elementos finitos

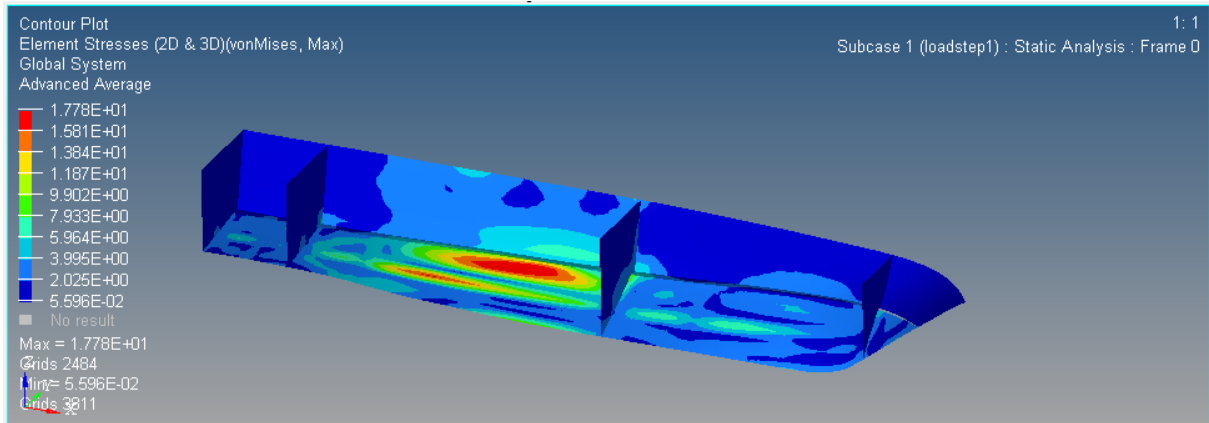
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas análises utilizando o método dos elementos finitos, referentes aos valores máximos de tensão no casco da embarcação analisada quando considera-se os diferentes modelos de carregamento propostos pelas normas DNV (2012), ABS (2018) e ISO (2008).

5.5.1 Tensões devido as pressões de slamming - DNV (2012)

Como a norma DNV (2012) apresenta uma equação para o cálculo da pressão de slamming em função da velocidade e altura significativa de onda, nesta seção são apresentados os campos de tensão para as velocidades: 5, 10, 15, 20 e 25 nós, considerando as alturas significativas de onda de 0,3 e 1,05 metros.

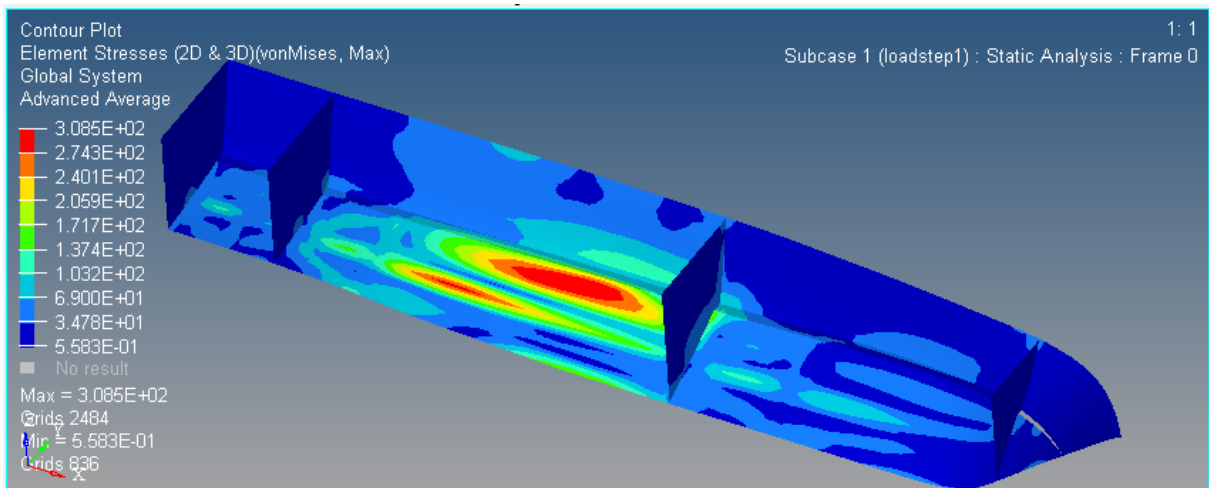
Nas figuras 38 e 39 são mostrados os dois casos extremos analisados enquanto que o resultado das demais análises pode ser visto no Apêndice F.

Figura 38 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 0,30$



Fonte: O Autor (2018)

Figura 39 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 1,05$ metros



Fonte: O Autor (2018)

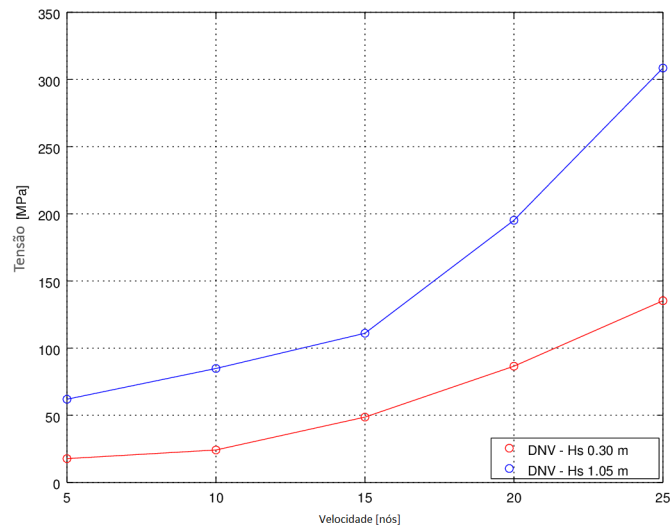
Para uma melhor visualização, tabelou-se a tensão máxima existente em cada uma das análises realizadas. No apêndice F são mostrados os dados referentes a variação de tensão máxima na estrutura em função da velocidade e da altura de onda significativa do mar. Por fim, os dados apresentados no apêndice F são utilizados para a construção do gráfico mostrado na Figura 40.

5.5.2 Tensões devido as pressões de slamming - ABS (2018)

De maneira análoga a norma DNV (2012), a norma ABS (2018) apresenta equações para o cálculo da pressão de slamming em função da velocidade da embarcação e a altura significativa de onda. Neste caso também foram utilizados as velocidades de 5, 10, 15, 20 e 25 nós, e alturas significativas de 0,3 e 1,05 metros.

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados referentes as análises

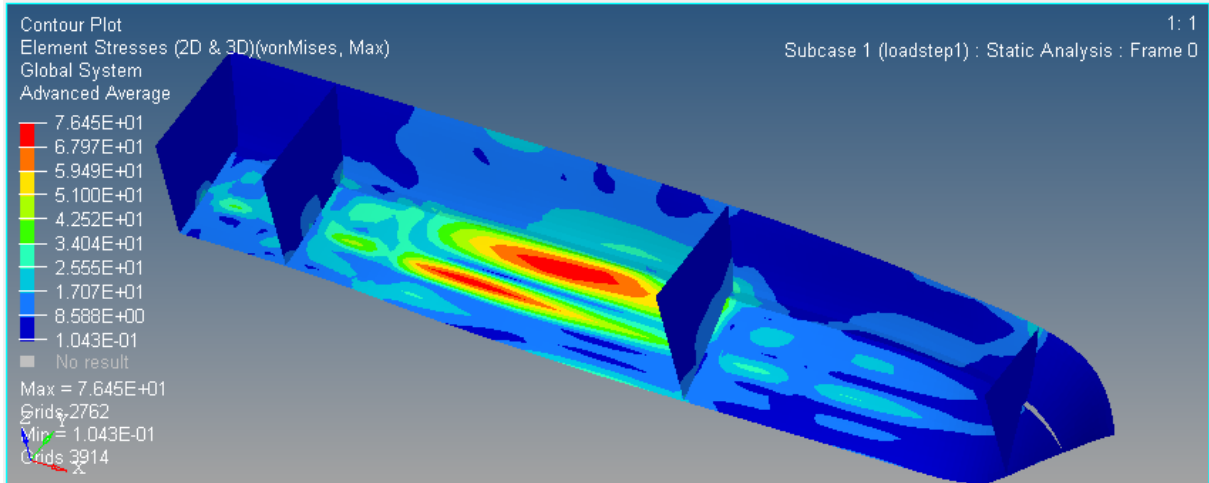
Figura 40 – Gráfico da tensão principal máxima - $H_S = 0,30$ m e 1,05 m



Fonte: O Autor (2018)

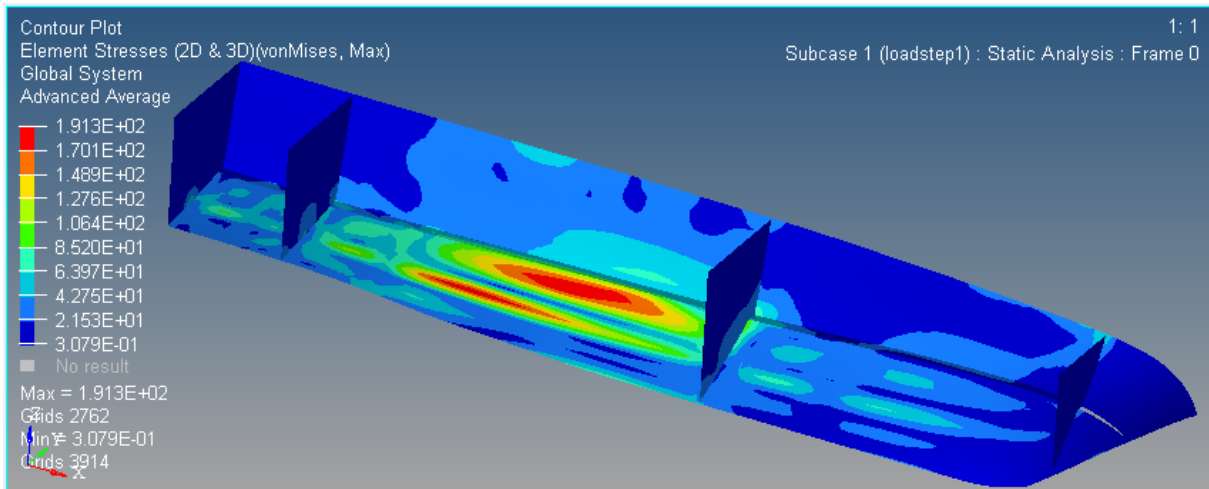
dos casos extremos, enquanto que o resultado das análises restantes pode ser visto no apêndice F.

Figura 41 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 0,30$



Fonte: O Autor (2018)

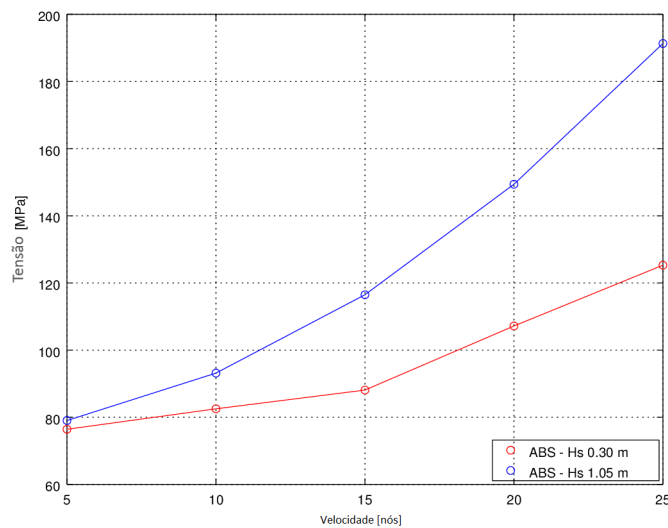
Figura 42 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 1,05$



Fonte: O Autor (2018)

Para uma melhor visualização, tabelou-se a tensão máxima existente em cada uma das análises realizadas. No apêndice F são mostrados os dados referentes a variação da tensão máxima na estrutura em função da velocidade e da altura de onda significativa do mar. Por fim, os dados apresentados no apêndice F são utilizados para construção do gráfico mostrado na figura 43

Figura 43 – Gráfico da tensão principal máxima - $H_S = 0,30$ m e $H_S = 1,05$ m



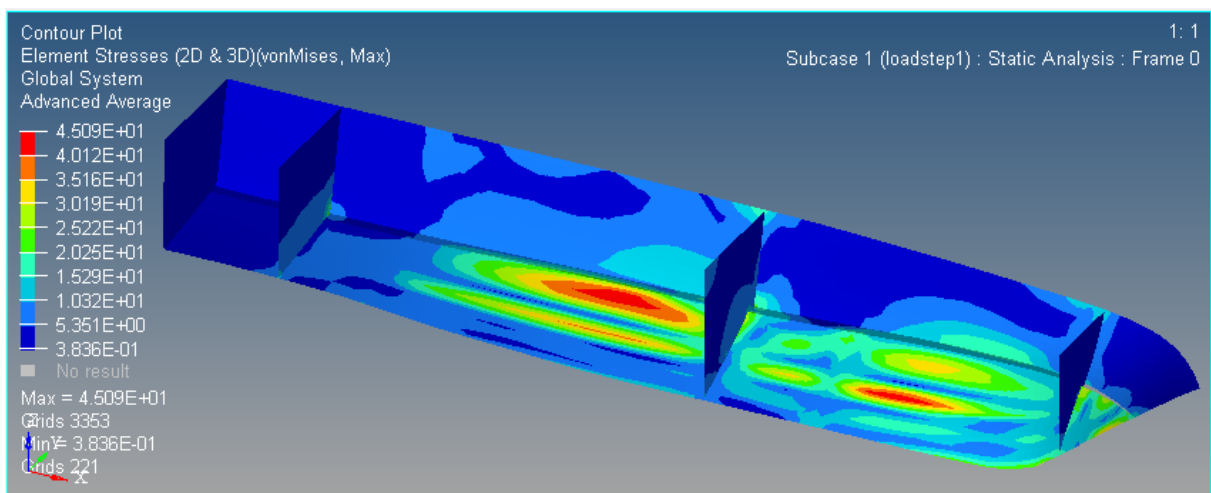
Fonte: O Autor (2018)

5.5.3 Tensões devido as pressões de slamming - ISO

Uma vez que no procedimento da norma ISO (2008) a altura significativa é um parâmetro implícito não será possível realizar uma comparação direta com os valores obtidos pela ABS (2018) e DNV (2012). Assim, serão apresentados os valores de tensão máxima nas velocidades de 5, 10, 15, 20 e 25 nós. considerando apenas a categoria B de projeto, referente a uma altura de onda de 3,96 metros.

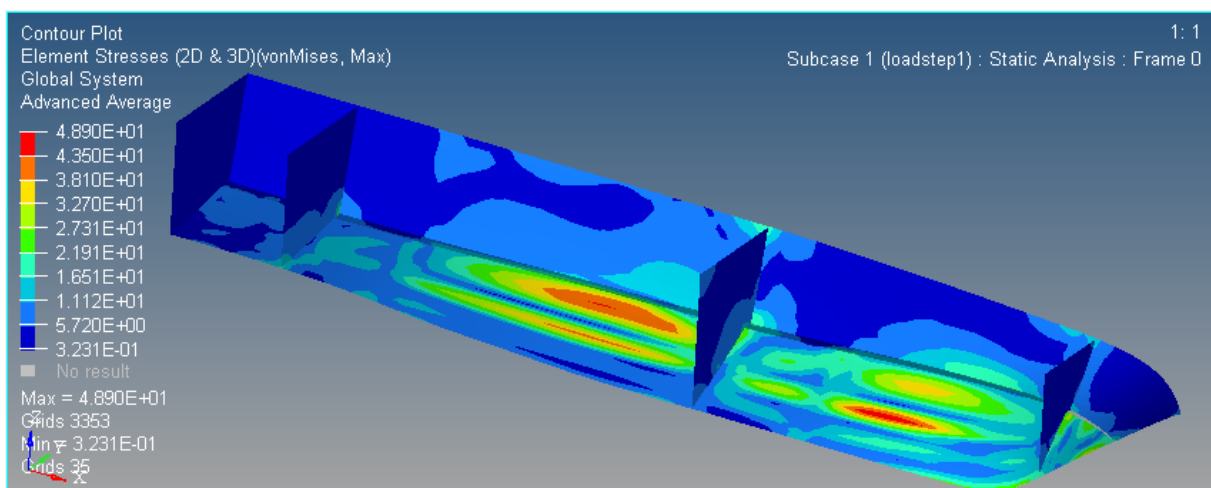
Na figura a seguir são mostrados os resultados das análises para a altura significativa de onda definida pela categoria B, considerando as velocidades de 5 e 25 nós. O resultado das demais análises é mostrado no apêndice F.

Figura 44 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós



Fonte: O Autor (2018)

Figura 45 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós

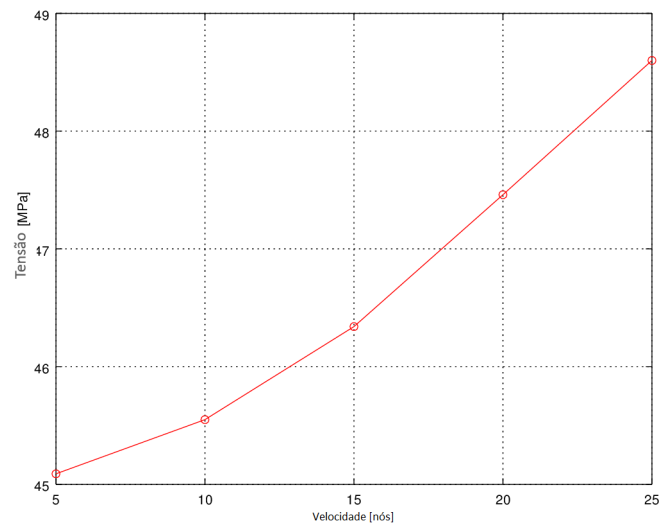


Fonte: O Autor (2018)

Para uma melhor visualização, tabelou-se a tensão máxima existente em cada uma das análises realizadas. No apêndice F são mostrados os dados referentes a variação da tensão máxima na estrutura em função da velocidade e da altura de onda significativa do mar. Por fim, os dados apresentados no apêndice F são utilizados para

a construção do gráfico mostrado na Figura 46.

Figura 46 – Gráfico da tensão principal máxima - ISO (2008)

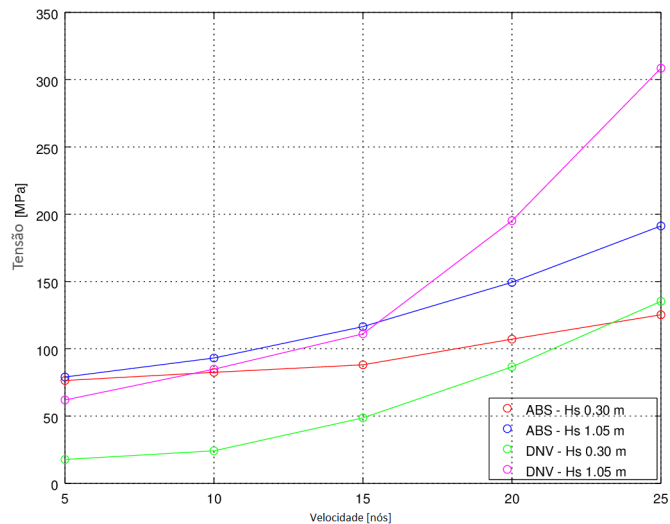


Fonte: O Autor (2018)

5.6 Comparação das tensões máximas - DNV, ABS e ISO

Com a finalidade de comparar as máximas tensões resultantes da aplicação dos diferentes modelos de pressões provenientes das normas DNV (2012) e ABS (2018), os resultados obtidos são sintetizados no gráfico apresentado na Figura 47.

Figura 47 – Gráfico das tensões máximas principais - $H_S = 0,30$ m e 1,05 m - ABS e DNV



Fonte: O Autor (2018)

Uma vez que a avaliação das tensões utilizando o campo de pressões estimado pela norma ISO (2008) refere-se apenas a condição B de projeto, não é possível comparar os resultados referentes as máximas tensões existentes ao longo do casco da embarcação estudada. No entanto, em decorrência dos resultados apresentados nas Figuras 35, 36 e 37.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma análise da distribuição das pressões de slamming calculadas de acordo com as normas DNV (2012), ABS (2018) e ISO (2008), considerando diferentes velocidades de operação e alturas significativas de onda. A seguir analisou-se os efeitos que os diferentes modelos para a estimativa da pressão dinâmica causam na distribuição das tensões atuantes ao longo do casco de uma mesma embarcação.

Inicialmente buscou-se as normas mais representativas no mercado brasileiro utilizadas para o projeto estrutural de embarcações de alta velocidade. Com base nos resultados, determinou-se que o estudo seria realizado com as normas DNV (2012), ABS (2018) e ISO (2008). A escolha da norma DNV (2012) visou manter a compatibilidade existente com o trabalho de Amaral (2016), o qual inclusive definiu a geometria e o arranjo estrutural da embarcação base utilizada neste trabalho.

As três formulações proposta foram implementadas e diversas análises paramétricas foram realizadas. A seguir a embarcação foi modelada em uma ferramenta capaz de realizar análises utilizando o método dos elementos finitos, permitindo avaliar os efeitos dos diferentes campos de pressão ao longo da estrutura da embarcação.

Os estudos apresentados servem para evidenciar as diferenças entre as normas, tendo em vista que foi utilizada a mesma geometria de casco em todas as etapas do trabalho. Servindo também para confirmar que as normas seguem diferentes modelos empíricos para a obtenção dos valores de pressão de slamming. Assim, a comparação direta entre elas só é possível com o intuito de definir qual delas apresenta maiores fatores de segurança.

A norma DNV (2012) foi a que se apresentou como sendo, potencialmente, a mais conservadora em relação a pressão dinâmica estimada, pois foi aquela cuja análise resultou nas maiores tensões máximas ao longo da estrutura.

Verificou-se que a norma ISO (2008) foi a que aparenta possuir o menor fator de segurança para a estimativa da pressão de slamming ao longo do comprimento.

É importante destacar que as diferenças observadas não podem ser consideradas como definições absolutas, pois a aplicação de uma norma para o projeto estrutural de uma embarcação possui essencialmente dois componentes: a estimativa da carga atuante e o projeto estrutural propriamente dito. Assim, é possível que uma norma seja mais conservadora na estimativa dos esforços e menos conservadora no dimensionamento estrutural, ou então que concentre o fator de segurança na etapa do

dimensionamento estrutura.

Outra consideração importante diz respeito ao fato de que a estimativa de uma maior pressão dinâmica, não necessariamente implica em uma maior tensão na estrutura, uma vez que eventuais concentrações de pressões menores, podem resultar em tensões maiores quando comparadas a pressões maiores distribuídas mais homogeneamente ao longo do casco.

No entanto, no problema analisado, todas as vezes em que se observou uma maior intensidade de pressões ao longo do casco, observou-se também uma maior intensidade de tensões ao longo da estrutura.

Por fim, recomenda-se para futuros trabalhos a utilização do método CFD para a definição da pressão de slamming, podendo assim realizar uma comparação com os valores obtidos pelas diferentes normas analisadas.

Outra recomendação interessante seria, a partir das estimativas das pressões realizadas, projetar o arranjo estrutural considerando cada uma das normas estudadas, e, assim, verificar de fato o grau de conservadorismo de cada norma.

REFERÊNCIAS

- ABS, A. B. o. S. **High-Speed Naval Craft**. [S.l.]: American Bureau of Shipping, 2018.
- ALTAIR, U. **2D Meshing**. 2018. Disponível em : <<https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2014/02/2Dmeshing.pdf>>. Acessado em: 1 de julho de 2018.
- AMARAL, J. R. **Otimização do projeto estrutural de embarcações de alta velocidade produzidas em material compósito**. 2016. 94 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- ANDERSON, J. D.; WENDT, J. **Computational Fluid Dynamics**. Nova Iorque: Springer, 2009. v. 206.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUTORES DE BARCOS ACOBAR. 2016. Disponível em: <<http://www.acobar.org.br/>>. Acesso em: 31 ago. 2017.
- AUGUSTO, O. B. A estrutura secundária do navio. **São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2004.
- BARABANOV, N. V. **Structural Design of Sea-going Ships**. [S.l.]: Peace Publishers, 1966.
- DNV, D. N. V. **Rules for Classification of High Speed Light Craft**. [S.l.]: Det Norske Veritas Classification, 2012.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo: Editora Érica, 2008.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais** . [S.l.]: Pearson Educacional, 2010.
- IERVOLINO, L. A. **Estudo de resistência ao avanço de uma embarcação de planeio de 26 pés: abordagem computacional baseada em CFD**. 2015. 81 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- ISO, I. S. O. **12215-5 Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination, 2008**. [S.l.]: International Standard Organization., 2008.
- KALMAR. **Lancha Runabout IT22**. 2016. Disponível em: <<http://www.kalmar.com.br/kalmar-yachts/lancha-it22/>>. Acesso em: 09 nov. 2017.
- KOPETSKI, J. F. **Avaliação da deflexão da estrutura terciária no comportamento estrutural de uma embarcação de alta velocidade**. p. 84 TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

LAMB, T. et al. **Ship design and construction**. [S.l.]: Society of Naval Architects and Marine Engineers Jersey City, 2004. v. 4.

LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. Stamford: Cengage Learning, 2011.

MELLO, N. X. de. **ANÁLISE DE EQUILÍBRIO DINÂMICO E RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE CASCOS PLANADORES EM CFD**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of propulsive power**. Nova Iorque: Cambridge university press, 2011.

MORAES, A. A. Metodologia de suporte ao projeto informacional e conceitual de embarcações de recreio a motor de pequeno porte. 2017.

MOTOZUM. **Lancha de alumínio metalglass Big Fish 5014 SPORT**. 2017. Disponível em: <<https://motozum.com/bigfish-5014sport.html>>. Acesso em: 09 nov. 2017.

NASSEH, J. **Barcos: Métodos avançados de construção em composites**. Rio de Janeiro: Divisão de Engenharia e Marketing da empresa Barracuda Advanced Composites, 2007.

DA ROSA, E. Análise de resistência mecânica–mecânica da fratura e fadiga. **Grupo de Análise e Projeto Mecânico, In: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina**, 2002. Santa Catarina, Brasil.

SAVITSKY, D. Hydrodynamic design of planing hulls. **Marine technology**, v. 1, n. 1, 1964.

SCHAEFERYACHT. **Phanton 290**. 2017. Disponível em: <<http://www.schaeferyachts.net/barcos>>. Acesso em: 09 nov. 2017.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Nova Iorque: Pearson Education Limited, 2007.

APÊNDICE A

Computational Fluid Dynamics - CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) consiste em um sistema de análise numérica de escoamentos de fluídos, transferência de calor e fenômenos associados a reações químicas, através de simulações computacionais.

O CFD é uma combinação das disciplinas de mecânica dos fluídos com cálculo numérico, pois as equações que regem o escoamento de fluídos tem origem na mecânica dos fluídos e podem ser resolvidos por meio de diferentes métodos numéricos.

Todo sistema CFD é baseado nas equações governantes das dinâmicas dos fluídos: equações da conservação da massa (Equação 1), conservação do momento (Equação 2) e conservação da energia (Equação 3), conforme descrito por Anderson e Wendt (2009).

- Conservação da Massa (continuidade)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

- Conservação do Momento

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{aligned} \quad (2)$$

- Conservação da Energia

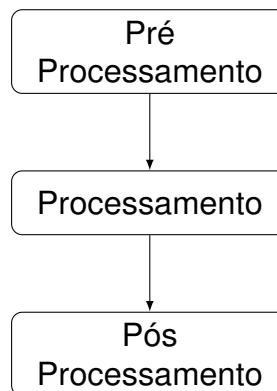
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} \\ &\quad + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} \\ &\quad + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (3)$$

Portanto, pode-se dizer que a análise de CFD é a capacidade de substituir as equações diferenciais parciais por números, ou seja, estes números representam as características do escoamento ao longo do tempo e do espaço. Para isto, é necessário um grande poder de processamento, tendo em vista que para realizar as soluções numéricas referentes aos escoamentos de fluídos é necessário manipular milhares de equações.

Simulação CFD

Para realização da simulação em CFD, Versteeg e Malalasekera (2007) estabelecem que o algoritmo responsável pela análise numérica dos programas comerciais são estruturados em três módulos, conforme pode ser visto da figura 48: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Figura 48 – Fluxograma da Simulação CFD.



Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007)

O pré-processamento consiste em realizar a entrada das informações necessárias para realização da simulação. Os desenvolvedores desses programas buscam disponibilizar uma interface gráfica amigável para facilitar o trabalho do usuário. Os parâmetros de entradas comumente utilizados são:

- A geometria de interesse;
- Definição do volume de controle;
- Discretização do domínio, criação da malha;
- Seleção do tipo de fenômeno a ser analisado;
- Definição das características do domínio e das superfícies da geometria;
- Definição das propriedades do fluído;
- E por fim são determinadas as condições de contorno.

É no processamento onde ocorre a resolução matemática do problema, através de métodos numéricos.

O módulo de pós-processamento dos softwares atuais as fabricantes estão investindo em pacotes e ferramentas gráficas para demonstrarem os resultados obtidos

no processamento, entre os itens mostrados no pós-processamento estão:

- Mostrar a malha e domínio da geometria;
- Exibição dos vetores referentes as diferentes propriedades do fluido;
- Superfícies 2D e 3D;
- Monitoramento de partículas;
- Animação dos resultados dinâmicos.

Com isso o método de simulação por CFD se mostra vantajoso no estudo dos escoamentos de fluídos, tendo em vista o baixo custo operacional, ao compará-lo com a fabricação de modelos e análises em tanques de prova. Outro ponto positivo é a assertividade, pois o CFD apresenta uma alta confiabilidade nos resultados dos fenômenos macroscópicos.

Entretanto, este método apresenta restrições devido ao processamento computacional. As resoluções numéricas estão relacionadas com a discretização da malha, isto é, quanto menor a malha mais pontos na superfície da geometria é analisado pelo programa computacional, acarretando mais tempo para a realização dos cálculos.

A simulação deve considerar uma condição de regime multifásico, onde ocorre a mistura dos fluídos ar/água, caracterizada pela formação de ondas, spray entre outros fenômenos.

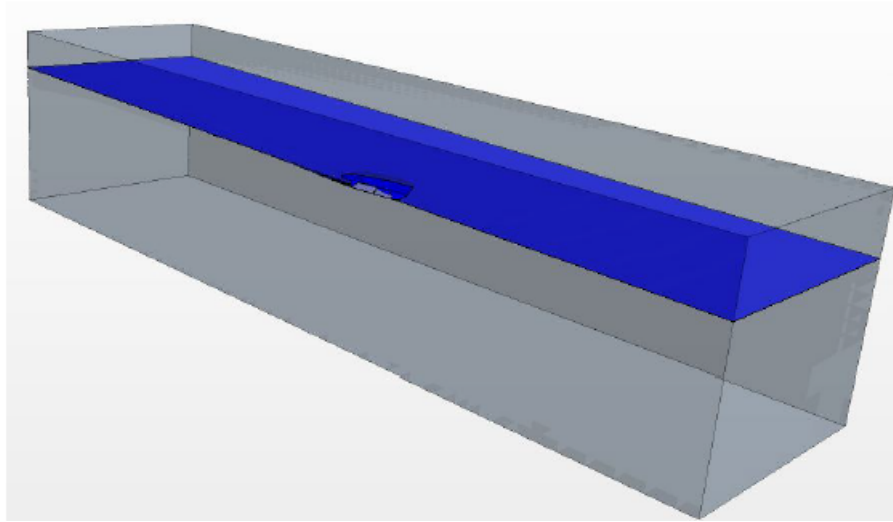
Além disso, simulações de embarcações planantes exigem que o programa seja capaz de realizar a análise considerando a mudança de posição da embarcação conforme são calculadas as forças hidrodinâmicas oriundas da interação do fluido com o casco. Assim, diferente da simulação de embarcações deslocantes, as quais são consideradas imóveis, nas simulações de lanchas, considera-se os movimentos do corpo rígido, realizando um processo iterativo buscando uma nova posição de equilíbrio a cada modificação observada no campo de pressões ao longo do casco.

Partindo de uma geometria com um bom acabamento de superfície, a qual é importada para o ambiente de simulação CFD, será definido um domínio computacional, o qual corresponderá ao volume de controle definido para o processo numérico, figura 49.

Para simulações em regime de planeio a tarefa torna-se complexa, tendo em vista que para cada velocidade irá existir uma condição de equilíbrio dinâmico, devido a modificação dinâmica do calado e do ângulo de trim da embarcação (MELLO, 2015).

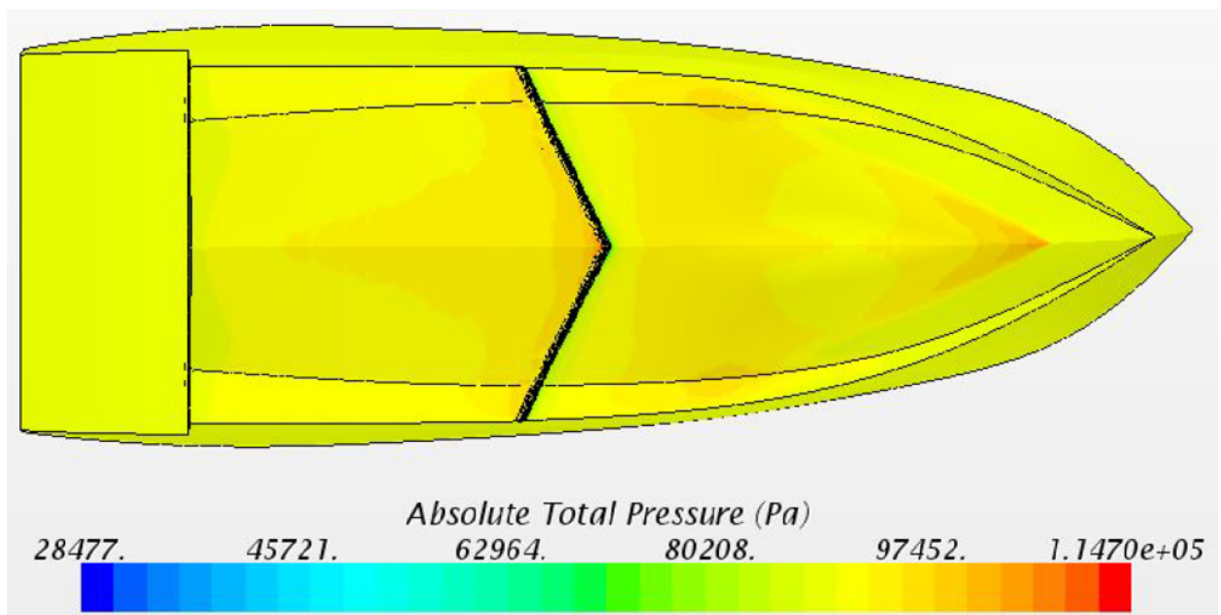
Um exemplo de análise CFD voltado para indústria náutica é o desenvolvido por Mello (2015), onde o autor faz um estudo da resistência ao avanço de uma embarcação de lazer, apresentando um resultado gráfico da distribuição de pressão no fundo do casco, figura 50.

Figura 49 – Domínio computacional



Fonte:(MELLO, 2015)

Figura 50 – Gradiente de pressão à 20 nós



Fonte: (MELLO, 2015)

APÊNDICE B

Figura 51 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]

	Hs	Posição							
		0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
10 nós	0,15	2,59485	3,00783	3,88286	3,06154	4,92116	3,15624	2,76073	3,00111
	0,3	5,18969	6,01565	7,76572	6,12308	9,84232	6,31249	5,52147	6,00221
	0,45	7,78454	9,02348	11,6486	9,18463	14,7635	9,46873	8,2822	9,00332
	0,6	10,3794	12,0313	15,5314	12,2462	19,6846	12,625	11,0429	12,0044
	0,75	12,9742	15,0391	19,4143	15,3077	24,6058	15,7812	13,8037	15,0055
	0,9	15,5691	18,047	23,2972	18,3693	29,5269	18,9375	16,5644	18,0066
	1,05	18,1639	21,0548	27,18	21,4308	34,4481	22,0937	19,3251	21,0077
	1,2	20,7588	24,0626	31,0629	24,4923	39,3693	25,2499	22,0859	24,0088
	1,35	23,3536	27,0704	34,9457	27,5539	44,2904	28,4062	24,8466	27,0099
	1,5	25,9485	30,0783	38,8286	30,6154	49,2116	31,5624	27,6073	30,0111

Fonte: O Autor (2018)

Figura 52 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]

	Hs	Posição							
		0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
15 nós	0,15	7,75564	8,98998	11,6053	9,15053	14,7087	9,43358	8,25145	8,96989
	0,3	10,4263	12,0857	15,6017	12,3015	19,7736	12,6821	11,0929	12,0587
	0,45	13,097	15,1814	19,598	15,4525	24,8386	15,9305	13,9343	15,1475
	0,6	15,7677	18,2771	23,5943	18,6036	29,9036	19,179	16,7757	18,2363
	0,75	18,4383	21,3729	27,5907	21,7546	34,9685	22,4275	19,6171	21,3251
	0,9	21,109	24,4686	31,587	24,9056	40,0335	25,676	22,4585	24,4139
	1,05	23,7797	27,5643	35,5833	28,0566	45,0985	28,9244	25,2999	27,5027
	1,2	26,4504	30,66	39,5796	31,2076	50,1634	32,1729	28,1413	30,5915
	1,35	29,121	33,7558	43,576	34,3586	55,2284	35,4214	30,9827	33,6803
	1,5	31,7917	36,8515	47,5723	37,5096	60,2934	38,6699	33,8241	36,7691

Fonte: O Autor (2018)

Figura 53 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]

	Hs	Posição							
		0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
20 nós	0,15	13,7878	15,9822	20,6317	16,2676	26,1487	16,7708	14,6692	15,9465
	0,3	18,5357	21,4857	27,7363	21,8694	35,1531	22,5459	19,7206	21,4377
	0,45	23,2835	26,9892	34,8409	27,4712	44,1575	28,3209	24,772	26,9289
	0,6	28,0314	32,4927	41,9455	33,073	53,1619	34,096	29,8234	32,4201
	0,75	32,7793	37,9962	49,0501	38,6748	62,1663	39,8711	34,8748	37,9113
	0,9	37,5271	43,4997	56,1546	44,2766	71,1707	45,6462	39,9262	43,4025
	1,05	42,275	49,0032	63,2592	49,8784	80,1751	51,4212	44,9776	48,8937
	1,2	47,0229	54,5067	70,3638	55,4802	89,1795	57,1963	50,029	54,385
	1,35	51,7707	60,0102	77,4684	61,082	98,1838	62,9714	55,0804	59,8762
	1,5	56,5186	65,5137	84,573	66,6837	107,188	68,7464	60,1318	65,3674

Fonte: O Autor (2018)

Figura 54 – Pressão de slamming em função da velocidade, posição e altura significativa de onda [kN/m^2]

	Hs	Posição							
		0	0,8	1,5	2,6	7,1	7,5	8,4	11,78
25 nós	0,15	21,5434	24,9722	32,2371	25,4181	40,8574	26,2044	22,9207	24,9164
	0,3	28,962	33,5714	43,338	34,1709	54,9268	35,2279	30,8135	33,4964
	0,45	36,3805	42,1706	54,4389	42,9237	68,9961	44,2515	38,7063	42,0764
	0,6	43,7991	50,7698	65,5398	51,6765	83,0655	53,275	46,5991	50,6564
	0,75	51,2176	59,3691	76,6407	60,4293	97,1348	62,2986	54,4919	59,2364
	0,9	58,6362	67,9683	87,7416	69,1821	111,204	71,3221	62,3847	67,8165
	1,05	66,0547	76,5675	98,8425	77,935	125,274	80,3457	70,2775	76,3965
	1,2	73,4732	85,1668	109,943	86,6878	139,343	89,3692	78,1703	84,9765
	1,35	80,8918	93,766	121,044	95,4406	153,412	98,3928	86,0631	93,5565
	1,5	88,3103	102,365	132,145	104,193	167,482	107,416	93,9559	102,137

Fonte: O Autor (2018)

APÊNDICE C

Tabela 12 – Coeficientes para a equação 4 -10 nós

H_S	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0,15	0,0001	0,004	0,1215	0,9963	3,5311	5,9004	0,6763
0,3	0,0003	0,0082	0,243	1,9926	7,0621	11,801	1,3527
0,45	0,0004	0,0124	0,3644	2,9889	10,593	17,701	2,029
0,6	0,0005	0,0165	0,4859	3,9852	14,124	23,602	2,7053
0,75	0,0007	0,0206	0,6074	4,9815	17,655	29,502	3,3817
0,9	0,0008	0,0247	0,7289	5,9778	21,186	35,402	4,058
1,05	0,0009	0,0289	0,8503	6,9741	24,717	41,303	4,7343
1,2	0,0011	0,033	0,9718	7,9704	28,248	47,203	5,4107
1,35	0,0012	0,0371	1,0933	8,9667	31,78	53,103	6,087
1,5	0,0013	0,0412	1,2148	9,963	35,311	59,004	6,7633

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 13 – Coeficientes para a equação 4 -15 nós

H_S	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0,15	0,0004	0,0123	-0,3631	2,9778	-10,554	17,635	-2,0215
0,3	0,0005	0,0166	-0,4881	4,0032	-14,188	23,708	-2,7176
0,45	0,0007	0,0208	-0,6131	5,0286	-17,822	29,781	-3,4137
0,6	0,0008	0,025	-0,7382	6,054	-21,457	35,854	-4,1098
0,75	0,0009	0,0293	-0,8632	7,0794	-25,091	41,927	-4,8059
0,9	0,0011	0,0335	-0,9882	8,1048	-28,725	47,999	-5,502
1,05	0,0012	0,0378	-1,1132	9,1302	-32,359	54,072	-6,198
1,2	0,0014	0,042	-1,2383	10,156	-35,994	60,145	-6,8941
1,35	0,0015	0,0463	-1,3633	11,181	-39,628	66,218	-7,5902
1,5	0,0016	0,0505	-1,4883	12,206	-43,262	72,291	-8,2863

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 14 – Coeficientes para a equação 4 -20 nós

H_S	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0,15	0,0007	0,0219	-0,6455	5,2938	-18,762	31,352	-3,5937
0,3	0,001	0,0294	-0,8677	7,1168	-25,223	42,148	-4,8312
0,45	0,0012	0,037	-1,09	8,9398	-31,684	52,944	-6,0687
0,6	0,0014	0,0445	-1,3123	10,763	-38,145	63,74	-7,3062
0,75	0,0017	0,0521	-1,5345	12,586	-44,606	74,536	-8,5437
0,9	0,0019	0,0596	-1,7568	14,409	-51,067	85,332	-9,7812
1,05	0,0022	0,0672	-1,9791	16,232	-57,528	96,128	-11,019
1,2	0,0024	0,0747	-2,2013	18,055	-63,989	106,92	-12,256
1,35	0,0027	0,0822	-2,4236	19,877	-70,44	117,72	-13,494
1,5	0,0029	0,0898	-2,6459	21,7	-76,91	128,52	-14,731

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 15 – Coeficientes para a equação 4 -25 nós

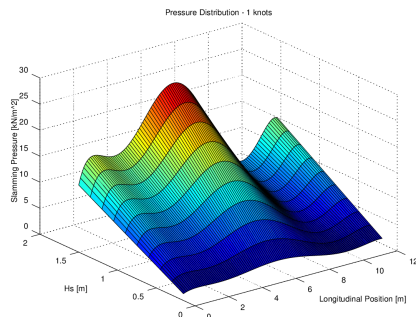
H_S	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0,15	0,0011	0,0342	-1,0085	8,2716	-29,316	48,987	-5,6152
0,3	0,0015	0,046	-1,3558	11,12	-39,411	65,856	-7,5488
0,45	0,0019	0,0578	-1,7031	13,968	-49,507	82,725	-9,4824
0,6	0,0022	0,0696	-2,0504	16,817	-59,602	99,594	-11,416
0,75	0,0026	0,0814	-2,3977	19,665	-69,697	116,46	-13,35
0,9	0,003	0,0931	-2,745	22,513	-79,792	133,33	-15,283
1,05	0,0034	0,1049	-3,0923	25,362	-89,887	150,2	-17,217
1,2	0,0038	0,1167	-3,4396	28,21	-99,982	167,07	-19,15
1,35	0,0041	0,1285	-3,7869	31,059	-110,08	183,94	-21,084
1,5	0,0045	0,1403	-4,1342	33,907	-120,17	200,81	-23,018

Fonte: O Autor (2018)

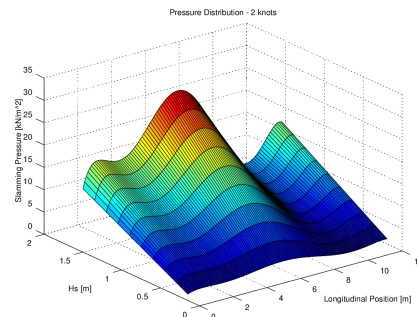
APÊNDICE E

Figura 55 – Distribuição da pressão segundo a DNV (2012)

(a) Velocidade - 1 nó



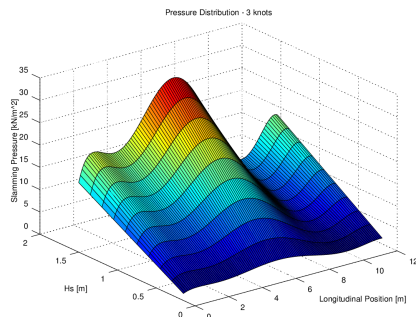
(b) Velocidade - 2 nós



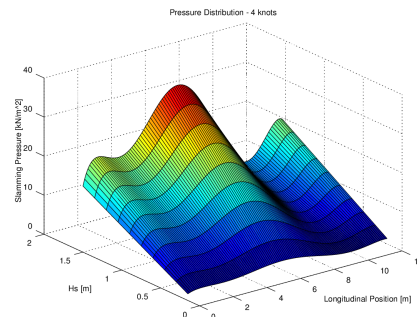
Fonte: O Autor (2018)

Figura 56 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 3 nós



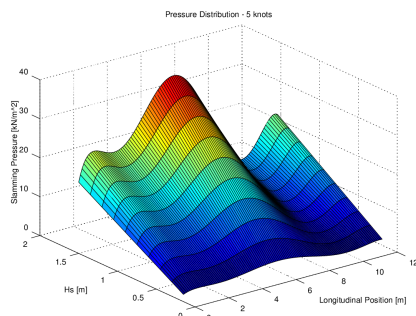
(b) Velocidade - 4 nós



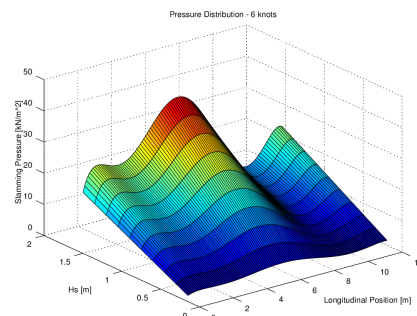
Fonte: O Autor (2018)

Figura 57 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 5 nós



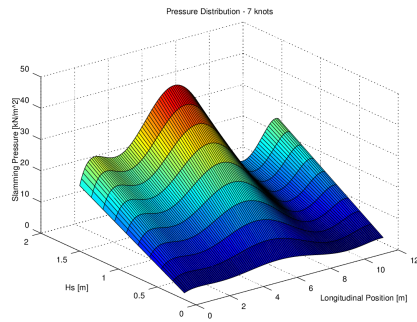
(b) Velocidade - 6 nós



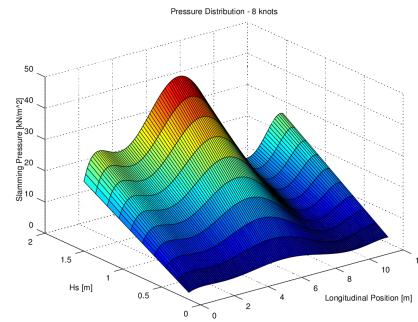
Fonte: O Autor (2018)

Figura 58 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 7 nós



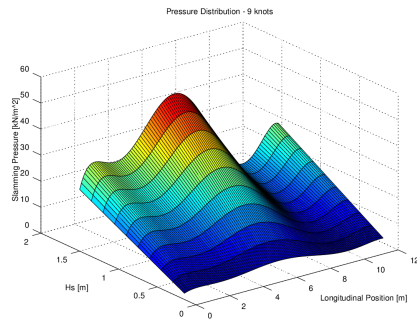
(b) Velocidade - 8 nós



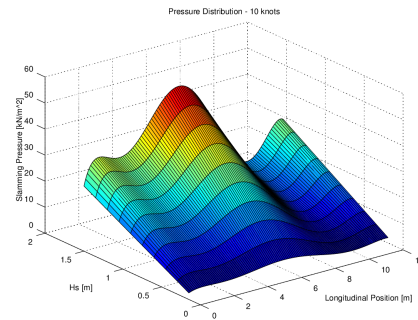
Fonte: O Autor (2018)

Figura 59 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 9 nós



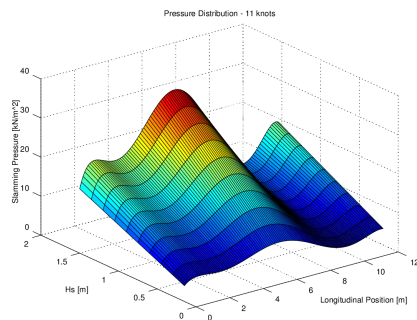
(b) Velocidade - 10 nós



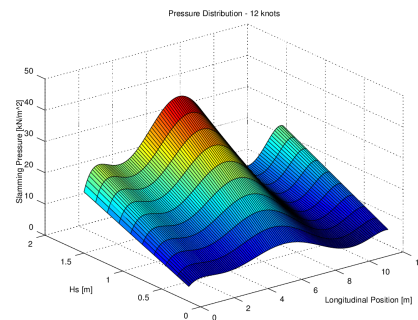
Fonte: O Autor (2018)

Figura 60 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 11 nós



(b) Velocidade - 12 nós

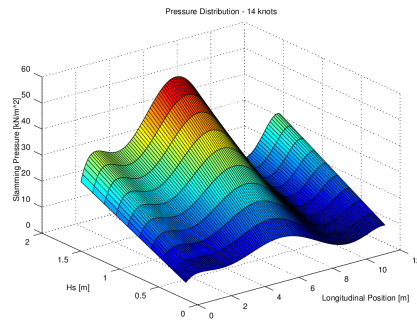
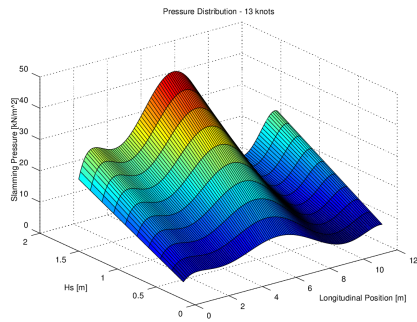


Fonte: O Autor (2018)

Figura 61 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 13 nós

(b) Velocidade - 14 nós

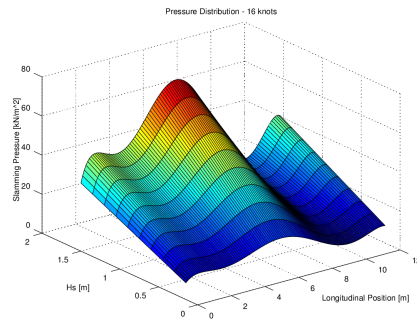
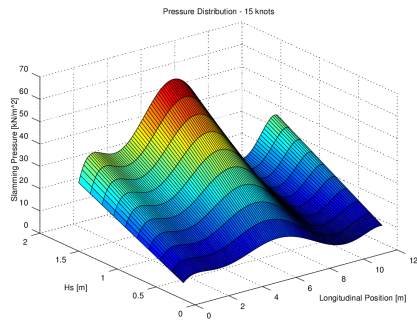


Fonte: O Autor (2018)

Figura 62 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 15 nós

(b) Velocidade - 16 nós

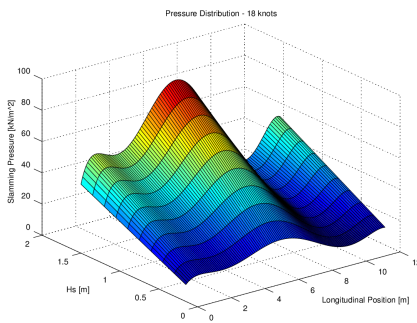
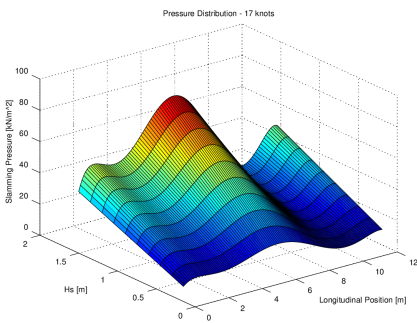


Fonte: O Autor (2018)

Figura 63 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 17 nós

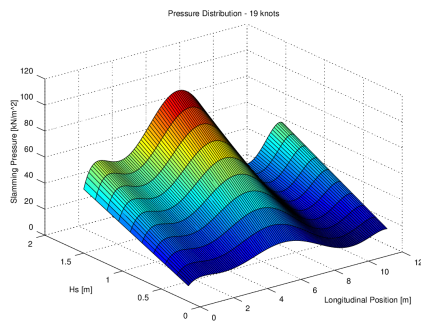
(b) Velocidade - 18 nós



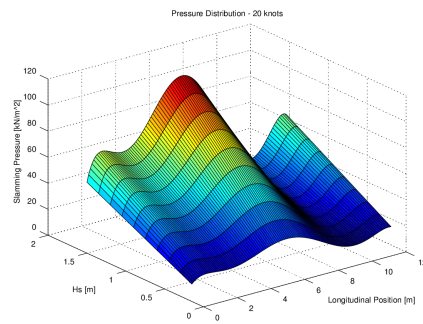
Fonte: O Autor (2018)

Figura 64 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 19 nós



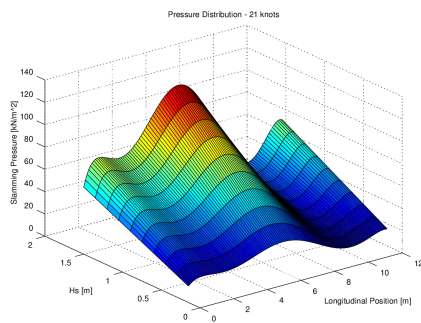
(b) Velocidade - 20 nós



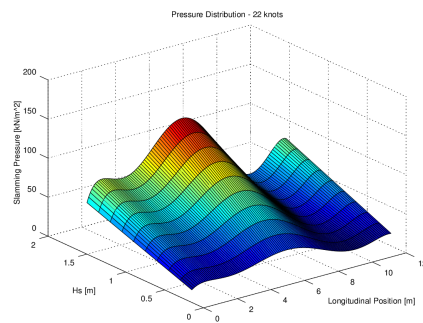
Fonte: O Autor (2018)

Figura 65 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 21 nós



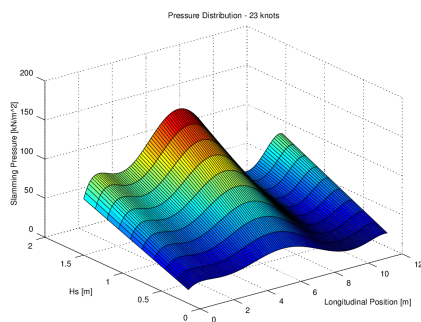
(b) Velocidade - 22 nós



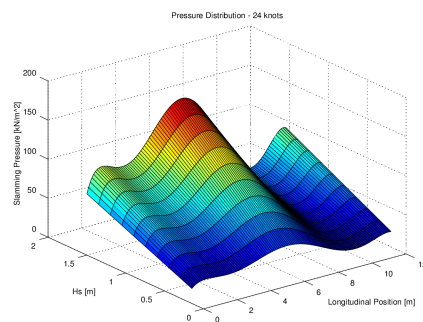
Fonte: O Autor (2018)

Figura 66 – Distribuição da pressão

(a) Velocidade - 23 nós

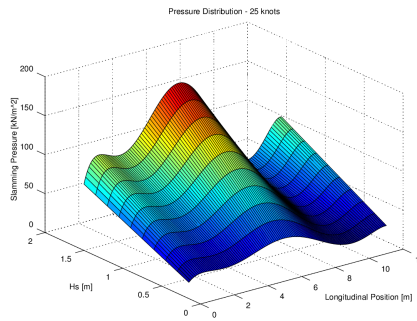


(b) Velocidade - 24 nós



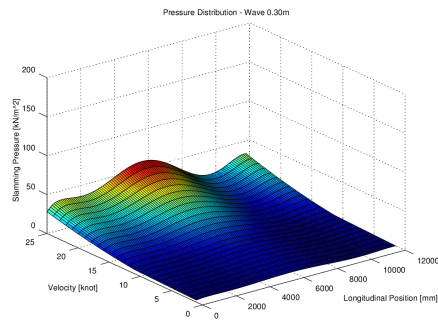
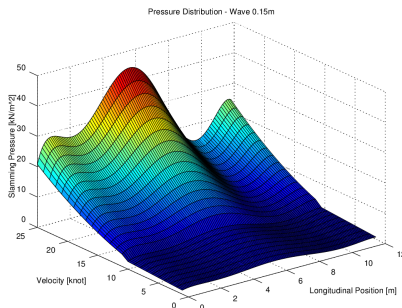
Fonte: O Autor (2018)

Figura 67 – Distribuição da pressão - Velocidade - 25 nós



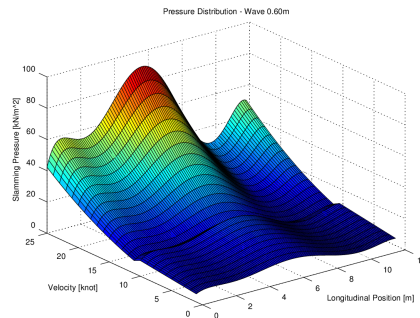
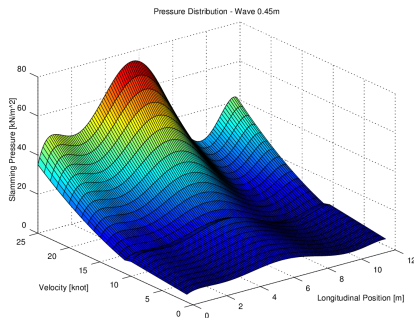
Fonte: O Autor (2018)
Figura 68 – Distribuição da pressão

- (a) Altura significativa de onda 0,15 metros (b) Altura significativa de onda 0,30 metros



Fonte: O Autor (2018)
Figura 69 – Distribuição da pressão

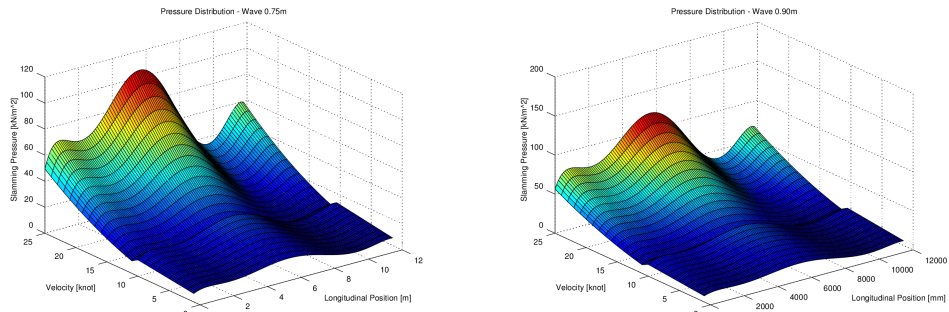
- (a) Altura significativa de onda 0,45 metros (b) Altura significativa de onda 0,60 metros



Fonte: O Autor (2018)

Figura 70 – Distribuição da pressão

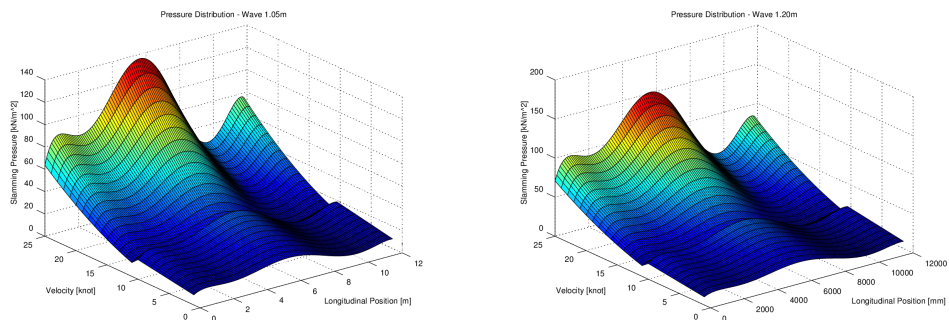
- (a) Altura significativa de onda 0,75 metros (b) Altura significativa de onda 0,90 metros



Fonte: O Autor (2018)

Figura 71 – Distribuição da pressão

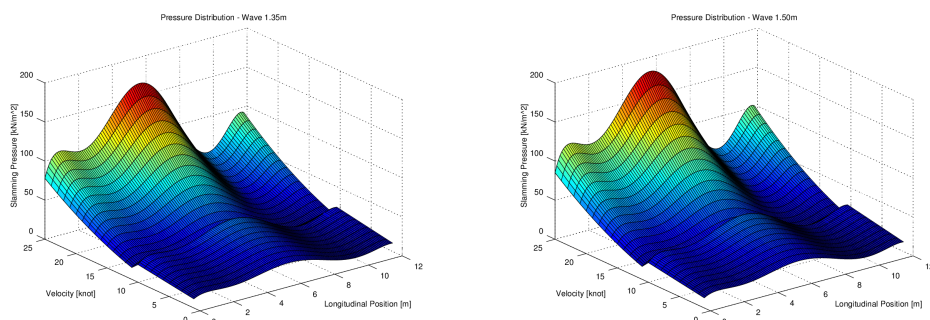
- (a) Altura significativa de onda 1,05 metros (b) Altura significativa de onda 1,20 metros



Fonte: O Autor (2018)

Figura 72 – Distribuição da pressão

- (a) Altura significativa de onda 1,35 metros (b) Altura significativa de onda 1,50 metros



Fonte: O Autor (2018)

Tabela 41 – Pressão de slamming pela norma ABS

Velocidade[nós]	Posição [m]							
	0,00	0,80	1,50	2,60	7,10	7,50	8,40	11,78
1	15,852	28,015	31,625	32,180	27,000	25,540	21,746	11,011
2	16,101	28,455	32,122	32,686	27,424	25,941	22,088	11,184
3	16,516	29,188	32,950	33,528	28,131	26,609	22,657	11,472
4	17,097	30,215	34,109	34,708	29,120	27,545	23,454	11,876
5	17,844	31,535	35,599	36,224	30,392	28,749	24,479	12,394
6	18,757	33,148	37,421	38,077	31,947	30,220	25,731	13,029
7	19,835	35,055	39,573	40,268	33,785	31,958	27,211	13,778
8	21,080	37,255	42,057	42,795	35,905	33,964	28,919	14,643
9	22,491	39,749	44,872	45,659	38,308	36,237	30,854	15,623
10	24,068	42,536	48,018	48,860	40,994	38,777	33,018	16,718
11	25,811	45,616	51,495	52,399	43,963	41,586	35,409	17,929
12	27,720	48,989	55,303	56,274	47,214	44,661	38,027	19,255
13	29,795	52,656	59,443	60,486	50,748	48,004	40,874	20,696
14	32,036	56,617	63,913	65,035	54,565	51,614	43,948	22,252
15	34,442	60,870	68,715	69,921	58,664	55,492	47,249	23,924
16	37,015	65,417	73,848	75,144	63,047	59,637	50,779	25,711
17	39,754	70,257	79,312	80,704	67,711	64,050	54,536	27,614
18	42,659	75,391	85,107	86,601	72,659	68,730	58,521	29,631
19	45,729	80,818	91,234	92,835	77,889	73,677	62,734	31,764
20	48,966	86,538	97,691	99,406	83,402	78,892	67,174	34,013
21	52,369	92,552	104,480	106,314	89,198	84,375	71,842	36,376
22	55,938	98,859	111,600	113,558	95,277	90,124	76,738	38,855
23	59,672	105,459	119,051	121,140	101,638	96,142	81,861	41,449
24	63,573	112,353	126,833	129,059	108,282	102,426	87,212	44,159
25	67,640	119,540	134,947	137,315	115,208	108,978	92,791	46,984

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 42 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria A

Velocidade[nós]	Posição [m]							
	0,00	0,80	1,50	2,60	7,10	7,50	8,40	11,78
1	0,021	2,578	5,696	4,565	26,865	35,034	26,405	45,111
2	0,084	2,637	5,758	4,588	26,868	35,034	26,405	45,111
3	0,188	2,734	5,860	4,627	26,874	35,034	26,405	45,111
4	0,335	2,870	6,004	4,681	26,882	35,034	26,405	45,111
5	0,523	3,045	6,189	4,751	26,893	35,034	26,405	45,111
6	0,753	3,259	6,416	4,837	26,906	35,034	26,405	45,111
7	1,025	3,511	6,683	4,938	26,921	35,034	26,405	45,111
8	1,339	3,803	6,992	5,054	26,939	35,034	26,405	45,111
9	1,695	4,133	7,341	5,186	26,959	35,034	26,405	45,111
10	2,092	4,503	7,732	5,333	26,981	35,034	26,405	45,111
11	2,532	4,911	8,164	5,496	27,006	35,034	26,405	45,111
12	3,013	5,358	8,637	5,675	27,033	35,034	26,405	45,111
13	3,536	5,844	9,151	5,869	27,062	35,034	26,405	45,111
14	4,101	6,368	9,706	6,079	27,094	35,034	26,405	45,111
15	4,708	6,932	10,303	6,304	27,128	35,034	26,405	45,111
16	5,356	7,535	10,940	6,544	27,165	35,034	26,405	45,111
17	6,047	8,176	11,619	6,801	27,204	35,034	26,405	45,111
18	6,779	8,856	12,338	7,072	27,245	35,034	26,405	45,111
19	7,553	9,575	13,099	7,359	27,288	35,034	26,405	45,111
20	8,369	10,333	13,901	7,662	27,334	35,034	26,405	45,111
21	9,227	11,130	14,745	7,980	27,383	35,034	26,405	45,111
22	10,126	11,966	15,629	8,314	27,433	35,034	26,405	45,111
23	11,068	12,841	16,554	8,664	27,486	35,034	26,405	45,111
24	12,051	13,754	17,521	9,028	27,541	35,034	26,405	45,111
25	13,076	14,706	18,529	9,409	27,599	35,034	26,405	45,111

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 43 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria B

Velocidade[nós]	Posição [m]							
	0,00	0,80	1,50	2,60	7,10	7,50	8,40	11,78
1	0,0167	2,0628	4,5567	3,6519	21,4917	28,0276	21,1239	36,0891
2	0,0670	2,1094	4,6061	3,6706	21,4945	28,0276	21,1239	36,0891
3	0,1506	2,1872	4,6884	3,7016	21,4992	28,0276	21,1239	36,0891
4	0,2678	2,2960	4,8035	3,7451	21,5058	28,0276	21,1239	36,0891
5	0,4184	2,4360	4,9516	3,8010	21,5143	28,0276	21,1239	36,0891
6	0,6026	2,6070	5,1326	3,8693	21,5246	28,0276	21,1239	36,0891
7	0,8202	2,8091	5,3464	3,9500	21,5369	28,0276	21,1239	36,0891
8	1,0712	3,0424	5,5932	4,0432	21,5510	28,0276	21,1239	36,0891
9	1,3558	3,3067	5,8729	4,1487	21,5670	28,0276	21,1239	36,0891
10	1,6738	3,6021	6,1855	4,2667	21,5849	28,0276	21,1239	36,0891
11	2,0253	3,9286	6,5310	4,3971	21,6047	28,0276	21,1239	36,0891
12	2,4102	4,2862	6,9094	4,5400	21,6263	28,0276	21,1239	36,0891
13	2,8287	4,6750	7,3207	4,6952	21,6499	28,0276	21,1239	36,0891
14	3,2806	5,0948	7,7649	4,8629	21,6753	28,0276	21,1239	36,0891
15	3,7660	5,5457	8,2420	5,0430	21,7026	28,0276	21,1239	36,0891
16	4,2849	6,0277	8,7520	5,2355	21,7318	28,0276	21,1239	36,0891
17	4,8372	6,5408	9,2949	5,4404	21,7629	28,0276	21,1239	36,0891
18	5,4230	7,0850	9,8708	5,6578	21,7958	28,0276	21,1239	36,0891
19	6,0423	7,6603	10,4795	5,8876	21,8307	28,0276	21,1239	36,0891
20	6,6951	8,2667	11,1211	6,1297	21,8674	28,0276	21,1239	36,0891
21	7,3814	8,9042	11,7957	6,3844	21,9060	28,0276	21,1239	36,0891
22	8,1011	9,5728	12,5031	6,6514	21,9465	28,0276	21,1239	36,0891
23	8,8543	10,2724	13,2434	6,9308	21,9889	28,0276	21,1239	36,0891
24	9,6410	11,0032	14,0167	7,2227	22,0331	28,0276	21,1239	36,0891
25	10,4611	11,7651	14,8228	7,5270	22,0793	28,0276	21,1239	36,0891

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 44 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria C

Velocidade[nós]	Posição [m]							
	0,00	0,80	1,50	2,60	7,10	7,50	8,40	11,78
1	0,013	1,547	3,418	2,739	16,119	21,021	15,843	27,067
2	0,050	1,582	3,455	2,753	16,121	21,021	15,843	27,067
3	0,113	1,640	3,516	2,776	16,124	21,021	15,843	27,067
4	0,075	1,094	2,344	1,851	10,750	14,014	10,562	18,045
5	0,314	1,827	3,714	2,851	16,136	21,021	15,843	27,067
6	0,452	1,955	3,849	2,902	16,143	21,021	15,843	27,067
7	0,615	2,107	4,010	2,963	16,153	21,021	15,843	27,067
8	0,803	2,282	4,195	3,032	16,163	21,021	15,843	27,067
9	1,017	2,480	4,405	3,112	16,175	21,021	15,843	27,067
10	1,255	2,702	4,639	3,200	16,189	21,021	15,843	27,067
11	1,519	2,946	4,898	3,298	16,203	21,021	15,843	27,067
12	1,808	3,215	5,182	3,405	16,220	21,021	15,843	27,067
13	2,122	3,506	5,491	3,521	16,237	21,021	15,843	27,067
14	2,460	3,821	5,824	3,647	16,256	21,021	15,843	27,067
15	2,825	4,159	6,182	3,782	16,277	21,021	15,843	27,067
16	3,214	4,521	6,564	3,927	16,299	21,021	15,843	27,067
17	3,628	4,906	6,971	4,080	16,322	21,021	15,843	27,067
18	4,067	5,314	7,403	4,243	16,347	21,021	15,843	27,067
19	4,532	5,745	7,860	4,416	16,373	21,021	15,843	27,067
20	5,021	6,200	8,341	4,597	16,401	21,021	15,843	27,067
21	5,536	6,678	8,847	4,788	16,430	21,021	15,843	27,067
22	6,076	7,180	9,377	4,989	16,460	21,021	15,843	27,067
23	6,641	7,704	9,933	5,198	16,492	21,021	15,843	27,067
24	7,231	8,252	10,513	5,417	16,525	21,021	15,843	27,067
25	7,846	8,824	11,117	5,645	16,559	21,021	15,843	27,067

Fonte: O Autor (2018)

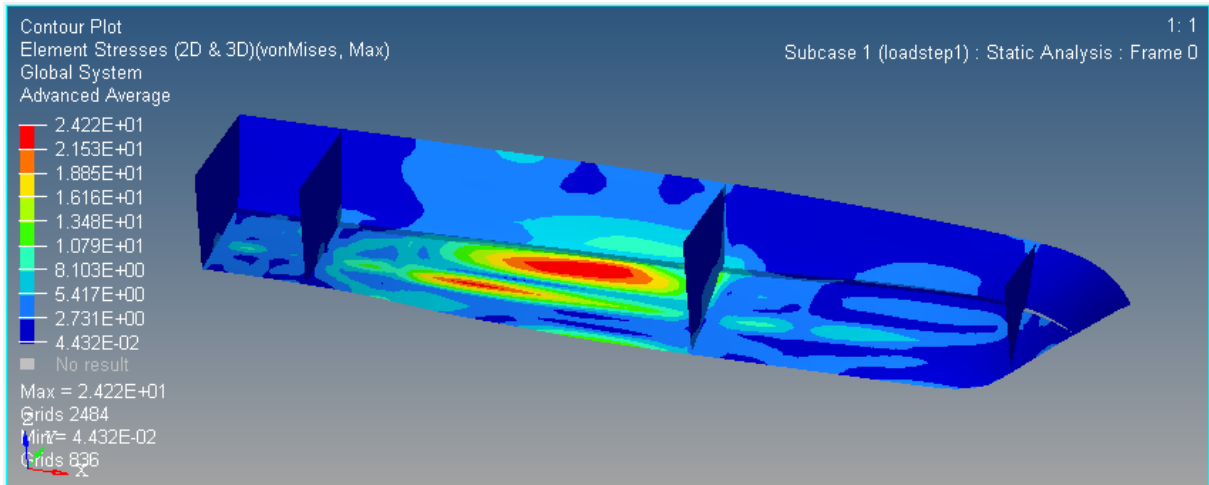
Tabela 45 – Pressão de slamming estimada pela norma ISO (2008) - Categoria D

Velocidade[nós]	Posição [m]							
	0,00	0,80	1,50	2,60	7,10	7,50	8,40	11,78
1	0,008	1,031	2,278	1,826	10,746	14,014	10,562	18,045
2	0,033	1,055	2,303	1,835	10,747	14,014	10,562	18,045
3	0,075	1,094	2,344	1,851	10,750	14,014	10,562	18,045
4	0,134	1,148	2,402	1,873	10,753	14,014	10,562	18,045
5	0,209	1,218	2,476	1,900	10,757	14,014	10,562	18,045
6	0,301	1,304	2,566	1,935	10,762	14,014	10,562	18,045
7	0,410	1,405	2,673	1,975	10,768	14,014	10,562	18,045
8	0,536	1,521	2,797	2,022	10,775	14,014	10,562	18,045
9	0,678	1,653	2,936	2,074	10,783	14,014	10,562	18,045
10	0,837	1,801	3,093	2,133	10,792	14,014	10,562	18,045
11	1,013	1,964	3,265	2,199	10,802	14,014	10,562	18,045
12	1,205	2,143	3,455	2,270	10,813	14,014	10,562	18,045
13	1,414	2,337	3,660	2,348	10,825	14,014	10,562	18,045
14	1,640	2,547	3,882	2,431	10,838	14,014	10,562	18,045
15	1,883	2,773	4,121	2,521	10,851	14,014	10,562	18,045
16	2,142	3,014	4,376	2,618	10,866	14,014	10,562	18,045
17	2,419	3,270	4,647	2,720	10,881	14,014	10,562	18,045
18	2,712	3,542	4,935	2,829	10,898	14,014	10,562	18,045
19	3,021	3,830	5,240	2,944	10,915	14,014	10,562	18,045
20	3,348	4,133	5,561	3,065	10,934	14,014	10,562	18,045
21	3,691	4,452	5,898	3,192	10,953	14,014	10,562	18,045
22	4,051	4,786	6,252	3,326	10,973	14,014	10,562	18,045
23	4,427	5,136	6,622	3,465	10,994	14,014	10,562	18,045
24	4,820	5,502	7,008	3,611	11,017	14,014	10,562	18,045
25	5,231	5,883	7,411	3,764	11,040	14,014	10,562	18,045

Fonte: O Autor (2018)

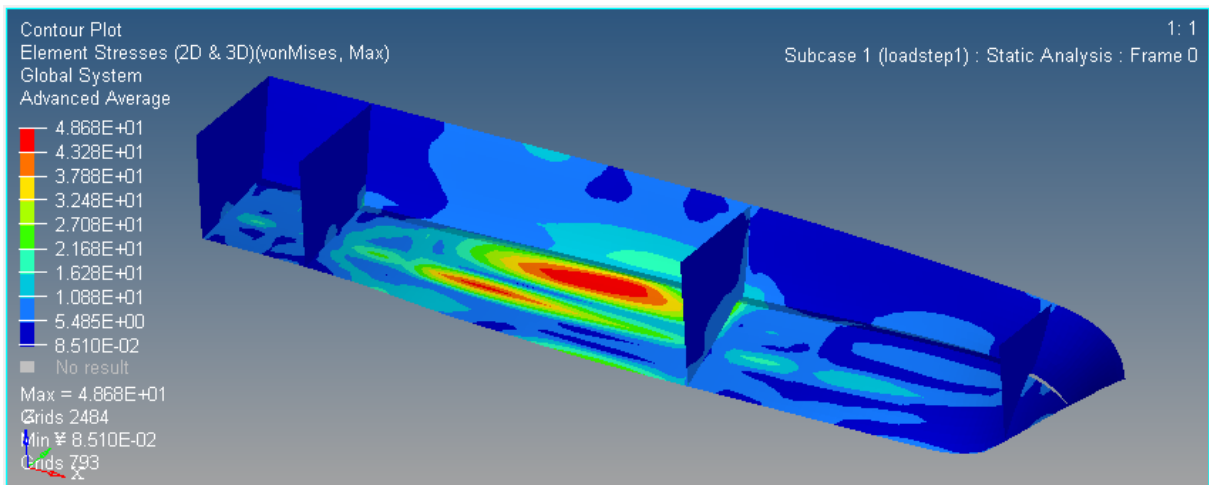
APÊNDICE F

Figura 73 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 0,30$



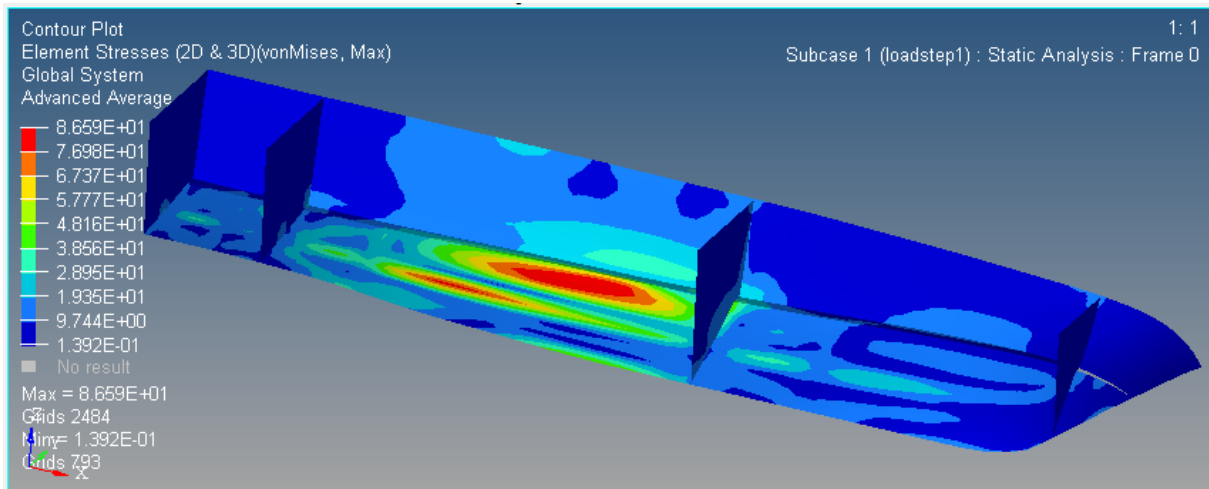
Fonte: O Autor (2018)

Figura 74 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 0,30$



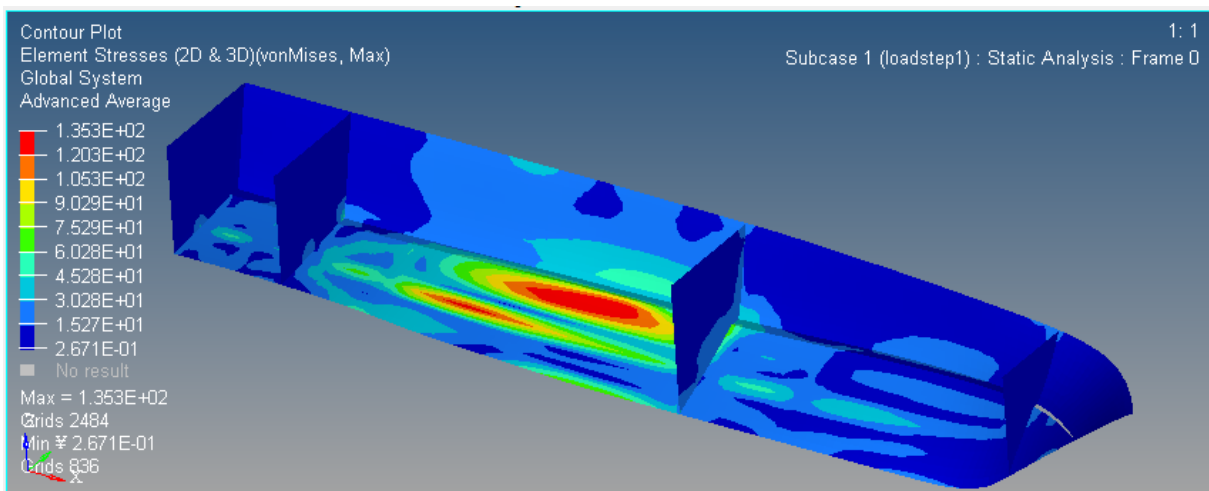
Fonte: O Autor (2018)

Figura 75 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 0,30$



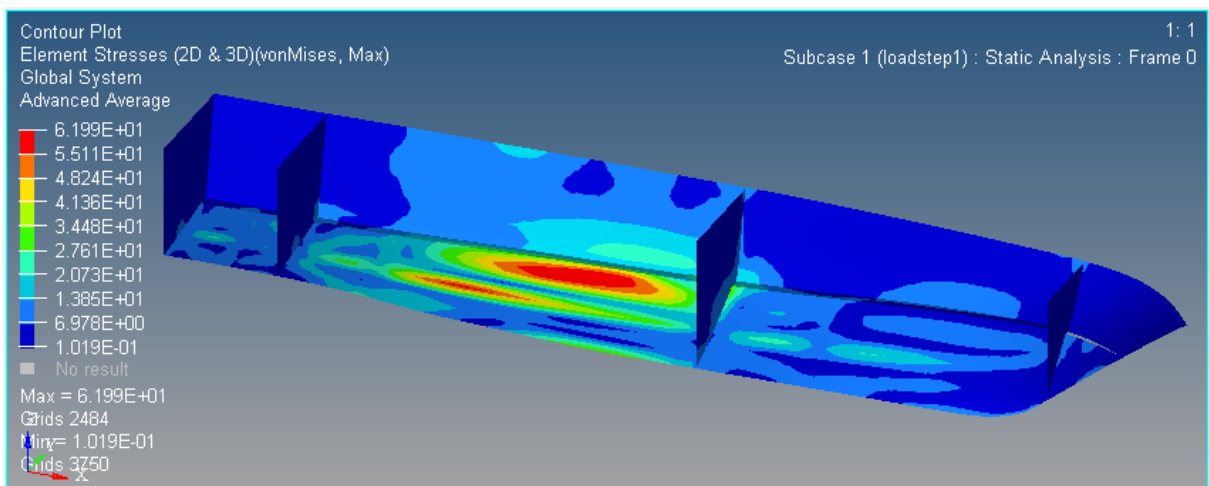
Fonte: O Autor (2018)

Figura 76 – Campos de tensão (MPa) - 25 nós $H_S = 0,30$



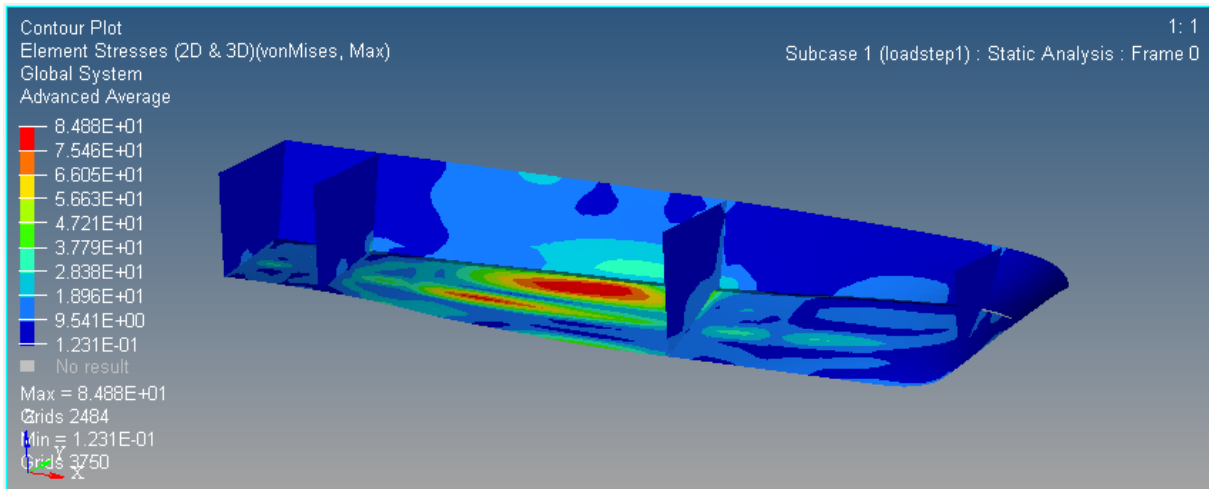
Fonte: O Autor (2018)

Figura 77 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 1,05$ metros



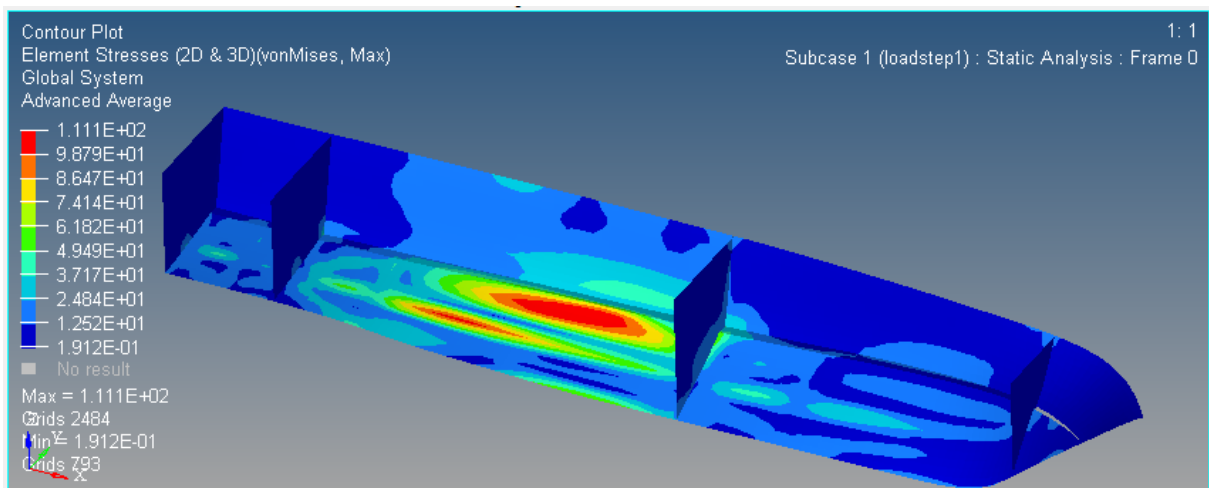
Fonte: O Autor (2018)

Figura 78 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 1,05$ metros



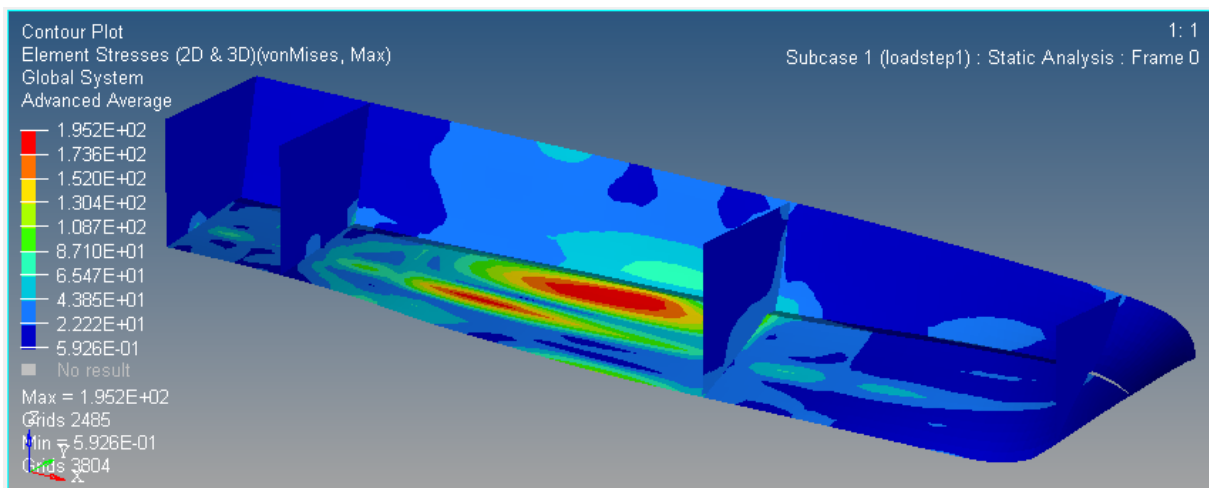
Fonte: O Autor (2018)

Figura 79 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 1,05$ metros



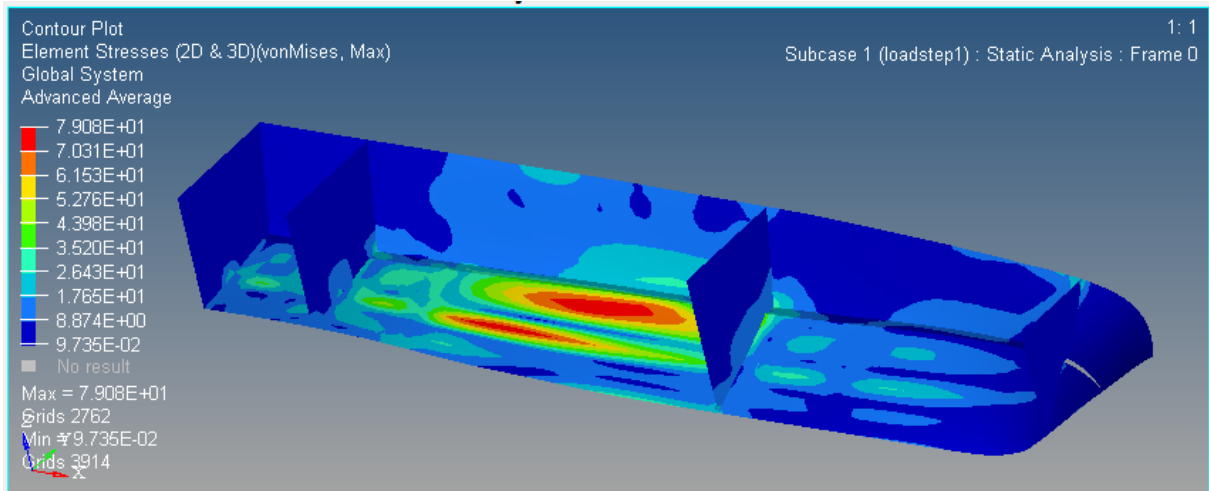
Fonte: O Autor (2018)

Figura 80 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 1,05$ metros



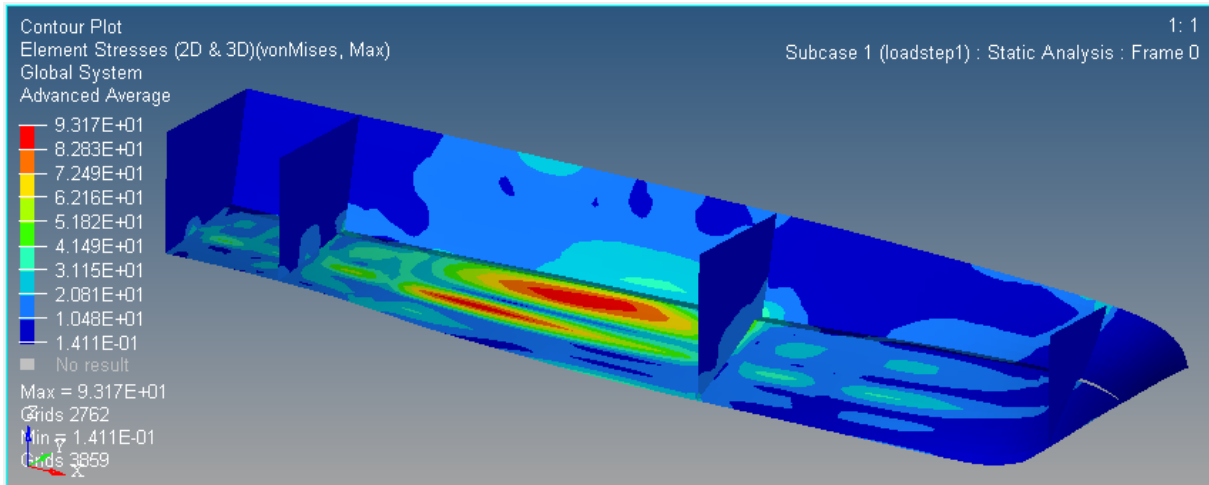
Fonte: O Autor (2018)

Figura 85 – Campos de tensão (MPa) - 5 nós $H_S = 1,05$



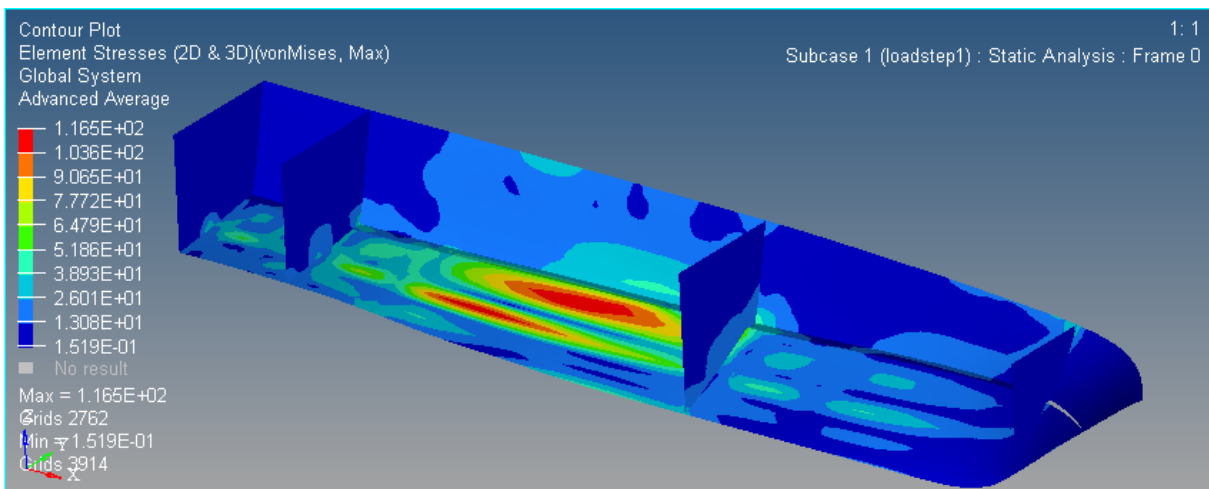
Fonte: O Autor (2018)

Figura 86 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 1,05$



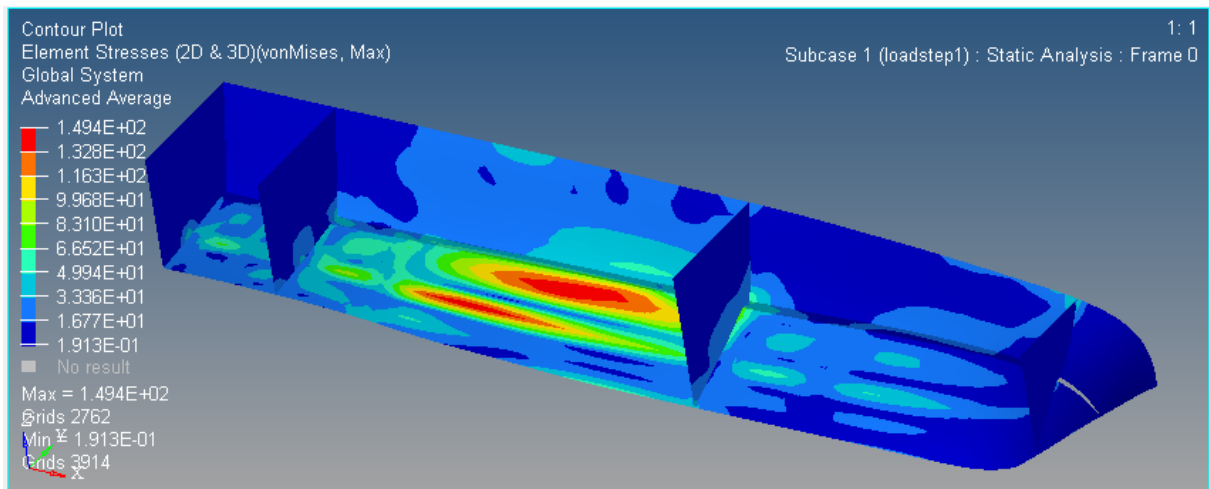
Fonte: O Autor (2018)

Figura 87 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 1,05$



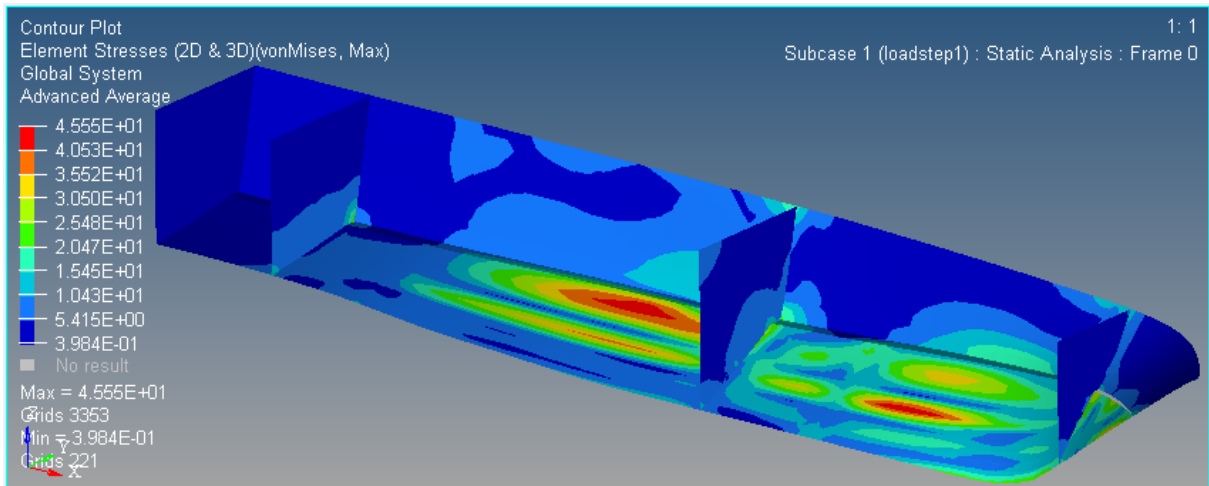
Fonte: O Autor (2018)

Figura 88 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 1,05$



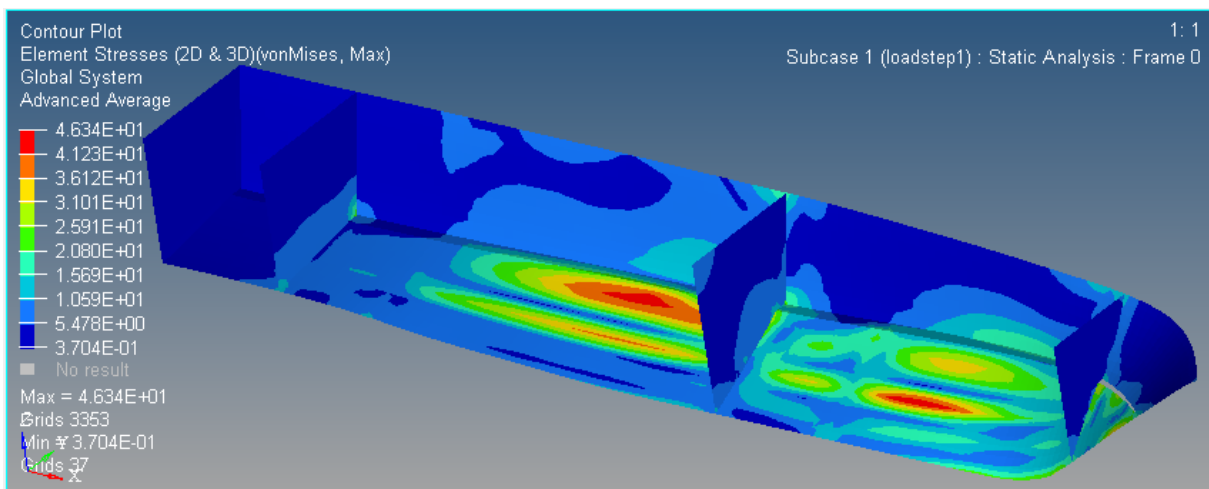
Fonte: O Autor (2018)

Figura 89 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós



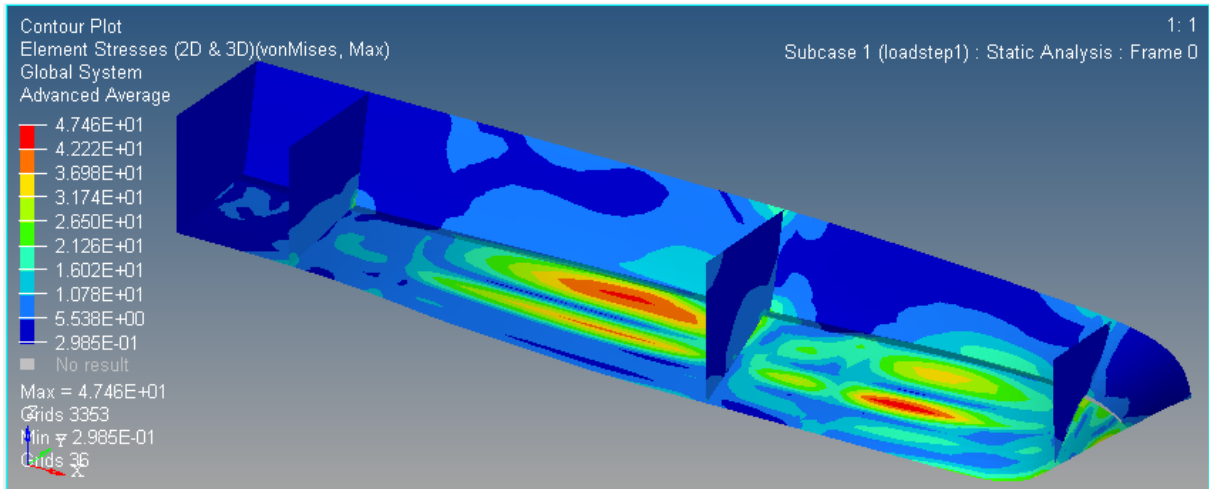
Fonte: O Autor (2018)

Figura 90 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós



Fonte: O Autor (2018)

Figura 91 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós

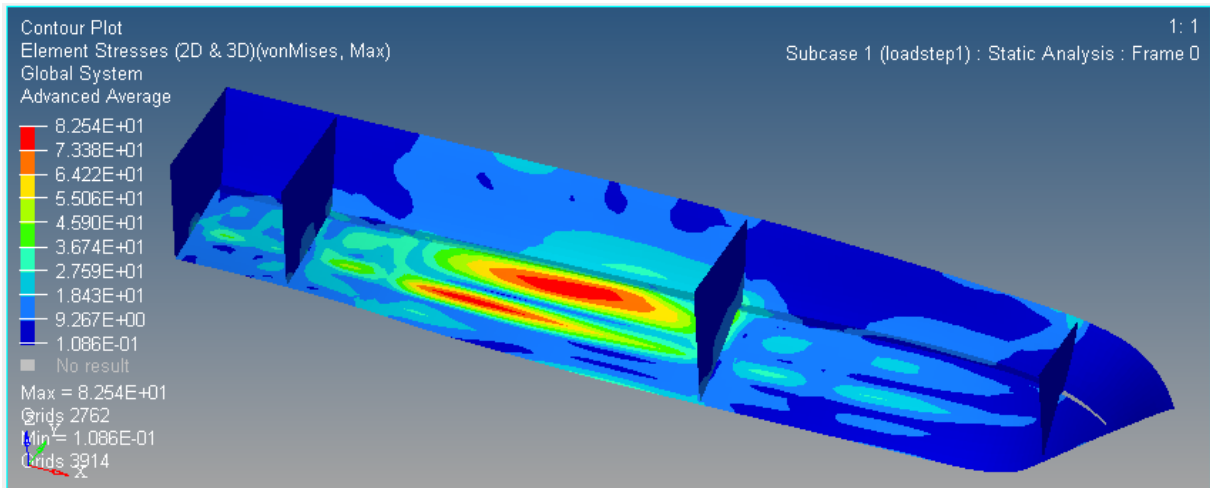


Fonte: O Autor (2018)

Tabela 46 – Tensão máxima no casco

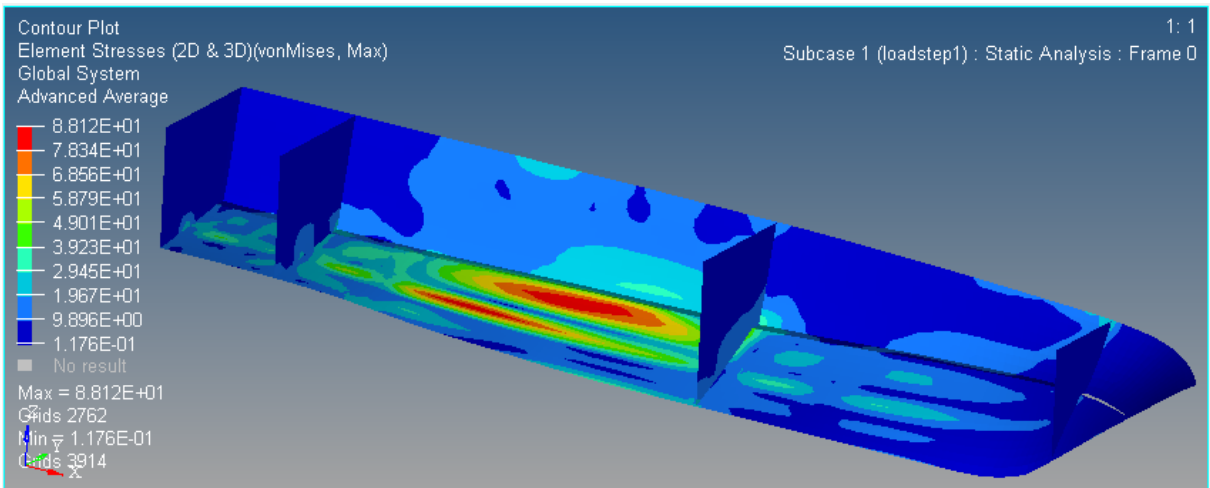
Velocidade [nós]	Tensão Principal [Mpa]	
	$H_S = 0,30$ metros	$H_S = 1,05$ metros
5	17,78	61,99
10	24,22	84,88
15	48,68	111,10
20	86,59	195,20
25	135,30	308,50

Figura 81 – Campos de tensão (MPa) - 10 nós $H_S = 0,30$



Fonte: O Autor (2018)

Figura 82 – Campos de tensão (MPa) - 15 nós $H_S = 0,30$



Fonte: O Autor (2018)

Figura 83 – Campos de tensão (MPa) - 20 nós $H_S = 0,30$

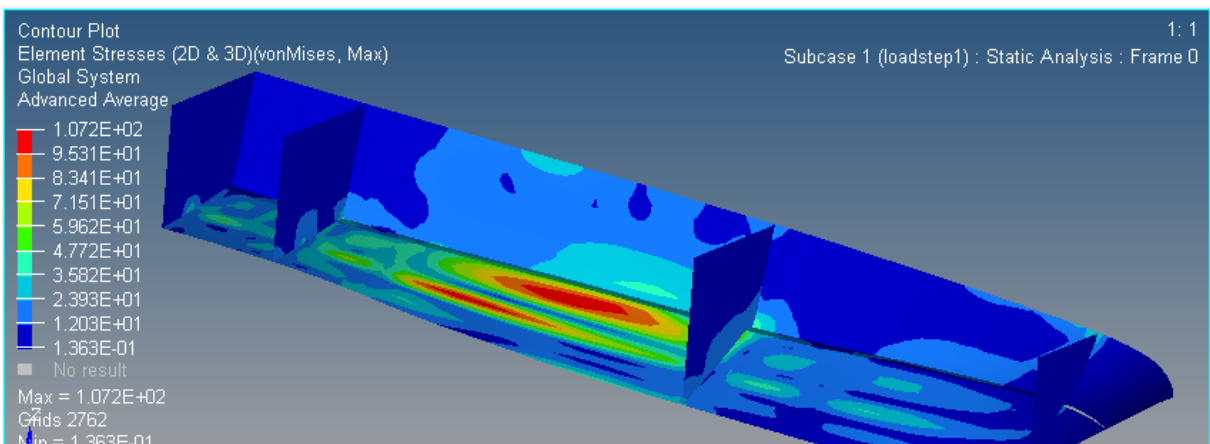


Tabela 47 – Tensão máxima no casco - ABS

Velocidade [nós]	Tensão Principal [Mpa]	
	$H_S = 0,30$ metros	$H_S = 1,05$ metros
5	76,45	79,08
10	82,54	93,17
15	88,12	116,50
20	107,20	149,40
25	125,30	191,30

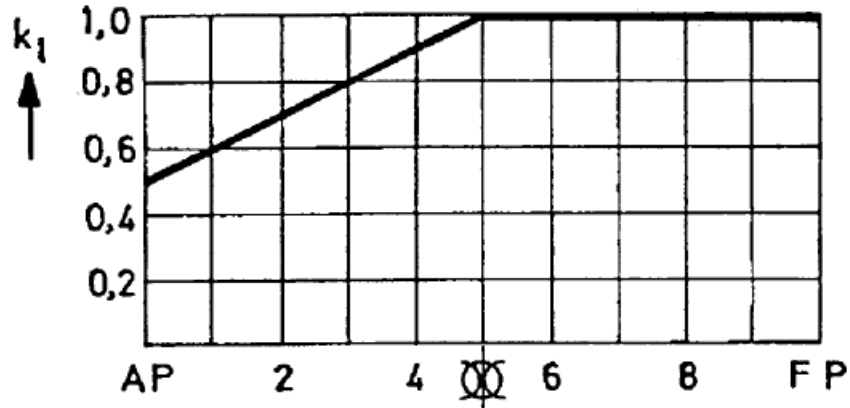
Tabela 48 – Tensão máxima no casco

Velocidade [nós]	Tensão Principal [Mpa]
5	45,09
10	45,55
15	46,34
20	47,46
25	48,90

Fonte: O Autor (2018)

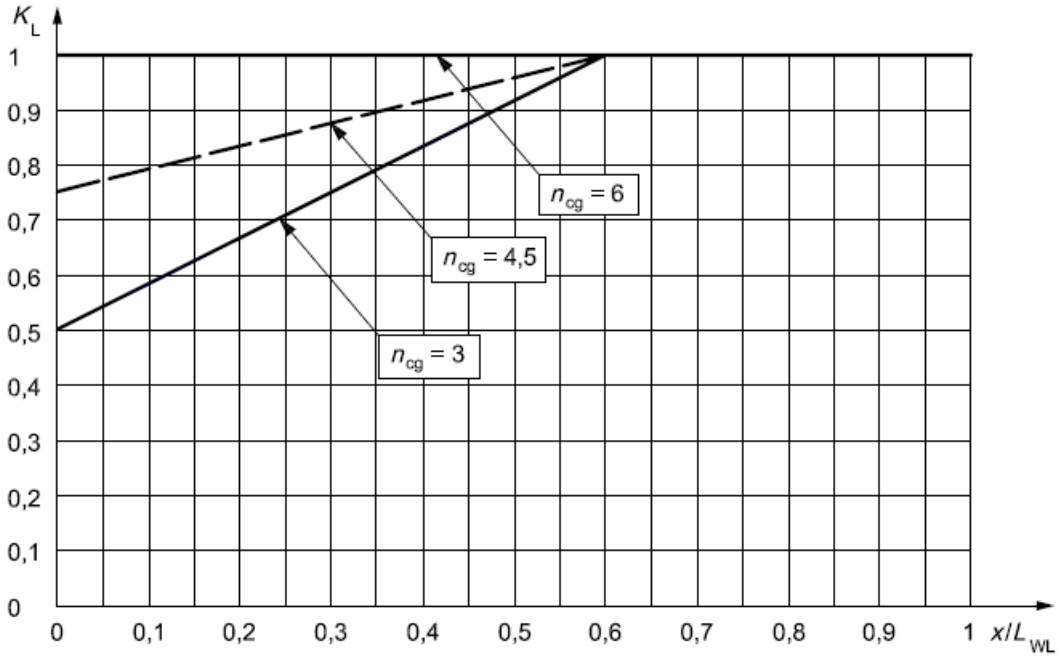
ANEXO A

Figura 92 – Distribuição longitudinal da pressão de slamming



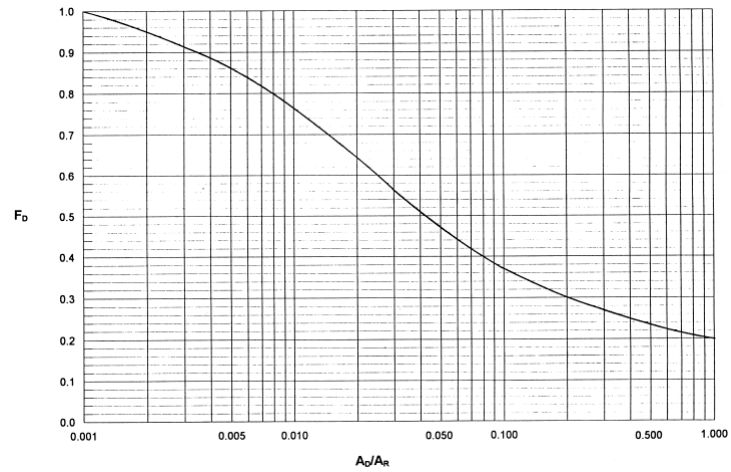
Fonte: DNV (2012)

Figura 93 – Valores de k_L em função do comprimento da embarcação



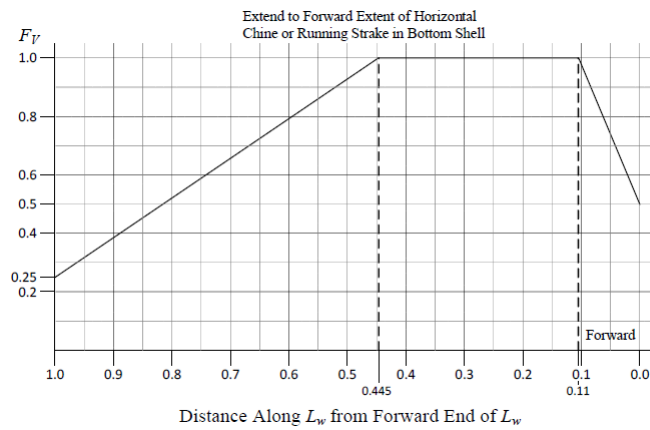
Fonte: ISO (2008)

Figura 94 – Fator de área de projeto - F_D



Fonte: ABS (2018)

Figura 95 – Fator de distribuição da aceleração vertical - F_V



Fonte: ABS (2018)