

CARLOS ALBERTO MOJICA VALERO

Efeito da superestrutura sobre a resistência longitudinal de embarcações
de pequeno porte: Aplicação e análise estrutural para um navio militar
da Marinha Colombiana

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

São Paulo
2008

CARLOS ALBERTO MOJICA VALERO

Efeito da superestrutura sobre a resistência longitudinal de embarcações
de pequeno porte: Aplicação e análise estrutural para um navio militar
da Marinha Colombiana

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Naval
e Oceânica

Orientador: Prof. Livre-Docente

Dr. Cláudio Ruggieri

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Valero, Carlos Alberto Mojica

Efeito da superestrutura sobre a resistência longitudinal de embarcações de pequeno porte: aplicação e análise estrutural para um navio militar da Marinha Colombiana / C.A.M. Valero. -- São Paulo, 2008.

178 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Navios (Estrutura;Análise) 2.Marinha – Colômbia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

DEDICATÓRIA

A meus pais, familiares e amigos...

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio Ruggieri, pela dedicação, interesse e conhecimento oferecido para tornar possível a realização deste trabalho.

Ao pessoal do NAMEF, Gustavo Donato, Sebastian Cravero, Mario Chiodo, Juan Galindo, Ricardo Picado, Lucas Yshii, pela sua contribuição, paciência e apoio permanente.

Ao Prof. Dr. Rui Botter pela oportunidade oferecida para desenvolver este curso de mestrado, assim como por sua colaboração e preocupação permanente.

Ao IPIN e ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP pela oportunidade de realização deste curso de mestrado.

A COTECMAR pela oportunidade de realizar o mestrado.

Ao Diego, amigo e colega.

À minha família e a todos que, de alguma forma, acreditaram em mim e me apoiaram.

RESUMO

O propósito do presente trabalho é desenvolver a avaliação estrutural de um navio “Nodriza” de pequeno porte de aplicação militar e cujo projeto inicial foi orientado à navegação em águas abrigadas com restrições de calado. Porém, requisitos e necessidades afetando a concepção inicial do projeto obrigam este a efetuar percursos em águas profundas com possibilidade de experimentar ciclos de onda.

A avaliação estrutural pretende determinar o nível de influência da superestrutura sobre a resistência longitudinal do navio considerando-o submetido a esforços solicitantes próprios de águas não abrigadas. As limitações geradas pelas formas e proporções do navio Nodriza, que não permitem implementar de forma direta as regras de Sociedades Classificadoras para a avaliação estrutural em águas profundas, obriga ao uso de cálculos diretos para sua aprovação.

Uma análise mediante o uso de elementos finitos, modelando o navio com e sem participação da superestrutura, permite determinar como esta representa uma significativa influência sobre a resistência longitudinal e tensões finais dos membros principais e membros de suporte, quando é considerada dentro da análise estrutural. Igualmente, implementam-se procedimentos determinísticos propostos pelas regras de sociedades classificadoras para navios convencionais, na procura de estabelecer a conveniência ou não da sua aplicação como método de aproximação para uma avaliação estrutural desta classe de navio militar, cujas características tornam dele um caso particular de análise.

Palavras-chave: Navio Nodriza. Superestrutura. Resistência Longitudinal. Análise Estrutural. Elementos Finitos.

ABSTRACT

The objective of the present work is to conduct a structural evaluation of the small size, military vessel Nodriza which has been designed for navigation in sheltered waters with draft restrictions. However, new requirements and changes in the operation of this vessel forced deep water navigation with the possible action of wave loading.

The structural evaluation seeks to determine the effects of the superstructure on the longitudinal structural resistance for the vessel. Since the geometry and overall dimensions of the ship are not covered by the structural rules of the Classification Societies, a numerical analyses based on the finite element method is conducted for a full model of the vessel.

The numerical analyses demonstrate the strong effect of the superstructure on the longitudinal resistance which yields reduced stress levels in primary structural members. The work provides a compelling support to use more refined procedures in the structural design of non-conventional small-sized vessels.

Key words: Vessel Nodriza. Superstructure. Longitudinal Resistance. Structural Analysis. Finite Elements.

RESUMEN

El propósito del presente trabajo es desarrollar la evaluación estructural de un navío “Nodriza” de menor porte y de aplicación militar, cuyo proyecto inicial fue orientado a la navegación en aguas abrigadas con restricciones de calado. Sin embargo, requisitos y necesidades mudando la concepción inicial del proyecto obligan a este a efectuar navegaciones en aguas profundas con posibilidad de experimentar ciclos de onda.

La evaluación estructural pretende determinar el nivel de influencia de la superestructura en la resistencia longitudinal del navío considerándolo sometido a cargas propias de aguas no abrigadas. Las limitaciones generadas por las formas e las proporciones del navío Nodriza, no permiten la aplicación de forma directa de las reglas de Sociedades Clasificadoras para a evaluación estructural en aguas profundas, obligando al uso de cálculos directos para su aprobación.

Un análisis mediante o uso de elementos finitos modelando el navío con y sin participación de la superestructura, permite determinar como esta representa una significativa influencia en la resistencia longitudinal y en las tensiones finales de los miembros principales y soportando primarios, cuando es considerada dentro del análisis estructural. Igualmente, son implementados procedimientos propuestos por las reglas de sociedades clasificadoras para navíos convencionales, con la intención de establecer la conveniencia o no de su aplicación como método de aproximación para una evaluación estructural de esta clase de navío militar, cuyas características tornan de el un caso particular de análisis.

Palabras-clave: Navío Nodriza. Superestructura. Resistencia Longitudinal. Análisis Estructural. Elementos Finitos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

LISTA DE APÊNDICES

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Os Navios Classe Nodriza	20
1.2	O Problema do Projeto Estrutural e Avaliação da Resistência Longitudinal dos Navios Classe Nodriza	23
1.3	Objetivos do Trabalho	24
2	RESISTÊNCIA LONGITUDINAL DO NAVIO.....	27
2.1	Padrões de Onda e Esforços Primários	27
2.2	Tensões Primárias de Flexão	31
2.3	Tensões primárias de Cisalhamento.....	37
2.4	Efeitos de Shear Lag	39
2.5	Resposta Combinada da Viga Navio e Tensões Admissíveis.....	41
2.6	Níveis de Análise Estrutural	44
3	PARTICIPAÇÃO ESTRUTURAL DA SUPERESTRUTURA	47
3.1	Critérios de Projeto Iniciais	48
3.2	Considerações sobre a Participação Estrutural	50
3.3	Determinação das Tensões e Eficiência da Superestrutura	54
4	ARRANJO ESTRUTURAL DO NAVIO CLASSE NODRIZA TERCEIRA GERAÇÃO	60
4.1	Descrição geral	60
4.2	Arranjo estrutural	61
5	AVALIAÇÃO CONVENCIONAL DA RESISTÊNCIA LONGITUDINAL DO NAVIO NODRIZA GERAÇÃO III	68
5.1	Antecedentes	68
5.2	Sociedade Classificadora Bureau Veritas	69

5.3	Sociedade Classificadora Nippon Kaiji Kyokai (NKK)	75
5.4	Teoria Simples de Vigas	77
5.4.1	Estimativa dos Módulos Seccionais	78
5.4.2	Determinação de Esforços Presentes na Estrutura do Navio Nodriza	80
5.5	Resumo Comparativo	82
6	ANÁLISE ESTRUTURAL DO NAVIO CLASSE NODRIZA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	84
6.1	Introdução ao Método dos Elementos Finitos	85
6.2	Elementos Utilizados e Características da Modelagem	87
6.2.1	Elementos CBEAM	88
6.2.2	Elementos SHELL	89
6.2.3	Características da Modelagem	91
6.3	Determinação dos Esforços	94
6.3.1	Pesos Agentes	96
6.3.2	Cargas Hidrostáticas	99
6.3.3	Considerações de Carregamento Dinâmico	101
6.4	Condições de Contorno	102
6.5	Modelo Numérico da Viga Navio	104
7	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA LONGITUDINAL	111
7.1	Validação do Modelo	112
7.1.1	Critérios para Avaliação da Resistência	113
7.1.2	Avaliação da Resposta Global em Condição de Cargas Combinadas E+D	115
7.2	Influência da Superestrutura Sobre a Resistência Longitudinal	128
8	CONCLUSÕES	141
	Referencias Bibliográficas	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	<i>Cargas principais agentes nos navios [5].....</i>	31
Tabela 2	<i>Cálculo pela BV dos módulos seccionais de elementos participantes na resistência longitudinal para navio Nodriza em estudo.....</i>	72
Tabela 3	<i>Espessuras do chapeamento para navio Nodriza avaliados pela BV.....</i>	73
Tabela 4	<i>Avaliação de momentos verticais e mínimos módulos seccionais do navio Nodriza pelo Bureau Veritas</i>	74
Tabela 5	<i>Tensões admissíveis para avaliação estrutural para navio Nodriza</i>	74
Tabela 6	<i>Avaliação pela NKK dos escantilhões de membros primários participantes da resistência longitudinal.</i>	76
Tabela 7	<i>Avaliação das espessuras do chapeamento pela NKK</i>	77
Tabela 8	<i>Avaliação dos módulos seccionais mínimos requeridos pela NKK.....</i>	77
Tabela 9	<i>Resultados da avaliação dos momentos verticais</i>	78
Tabela 10	<i>Módulos Seccionais Mínimos Requeridos da Secção Mestra</i>	79
Tabela 11	<i>Estimativo dos módulos seccionais dos membros estruturais Navio Nodriza</i>	79
Tabela 12	<i>Resultados de avaliação das tensões primárias no navio Nodriza.....</i>	80
Tabela 13	<i>Resumo da avaliação de esforços em membros principais para o navio Nodriza com participação da superestrutura, aplicação da teoria de vigas.</i>	81
Tabela 14	<i>Comparação da Avaliação Convencional Estrutural do Navio Nodriza ..</i>	83
Tabela 15	<i>Elementos gerais disponíveis para análise de elementos finitos.....</i>	87
Tabela 16	<i>Sumário dos elementos usados na modelagem do navio Nodriza</i>	90
Tabela 17	<i>Valores Recomendados de Malha para Modelo Global</i>	92
Tabela 18	<i>Composição de Nós e Elementos para os Módulos do Casco.....</i>	93
Tabela 19	<i>Valores de cargas agentes no modulo do casco para a condição de carga plena.....</i>	97
Tabela 20	<i>Resumo geral de esforços agentes no módulo do casco.....</i>	110
Tabela 21	<i>Tabela resumo das avaliações consideradas.....</i>	112
Tabela 22	<i>Máximos fatores de uso e esforços combinados permissíveis para avaliação da resistência por escoamento, IACS-DNV[23].....</i>	114

Tabela 23	<i>Níveis de redução de esforços quando avaliada a contribuição estrutural da Casaria de Convés</i>	135
Tabela 24	<i>Regiões de avaliação local comuns para os módulos do casco em estudo.....</i>	135
Tabela 25	<i>Resultados da avaliação de tensões para o navio com superestrutura</i>	137
Tabela 26	<i>Resultados da avaliação de tensões para o navio sem superestrutura</i>	137
Tabela 27	<i>Resultados da avaliação de tensões para elementos de viga no navio.....</i>	139

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1	<i>Navio Classe Nodriza de primeira geração</i>	21
Figura 1-2	<i>Navio Classe Nodriza de Segunda Geração</i>	21
Figura 1-3	<i>Navio Nodriza de Terceira geração</i>	22
Figura 2-1	<i>Comparação entre uma onda senoidal e uma trocói</i> <i>de</i>	28
Figura 2-2	<i>Altura de ondas para determinação dos momentos fletores</i> <i>verticais [8]</i>	29
Figura 2-3	<i>Resumo Gráfico da Flexão da Viga Navio [5]</i>	34
Figura 2-4	<i>Comparação da deflexão causada pelos cortantes e pelos</i> <i>momentos fletores numa viga engastada com carga pontual e de</i> <i>dimensões meias. [12]</i>	37
Figura 2-5	<i>Diagrama de cortantes transversais e fluxo cortantes [5]</i>	38
Figura 2-6	<i>Efeito “Shear Lag” em viga caixão e flanges de vigas [5]</i>	40
Figura 2-7	<i>Raciocínio de Lockwood Taylor da influência dos esforços cortantes</i> <i>na estrutura do navio [8]</i>	42
Figura 2-8	<i>Níveis de análise estrutural [5]</i>	45
Figura 3-1	<i>Diferença entre Superestrutura e casaria de Convés [6]</i>	47
Figura 3-2	<i>Geração de forças sobre a superestrutura [8]</i>	50
Figura 3-3	<i>Conceito do módulo de rigidez $K(x)$ [8]</i>	51
Figura 3-4	<i>Idealização do comportamento casco-casaria com transmissão de</i> <i>cortante zero [8]</i>	51
Figura 3-5	<i>Idealização do comportamento casco-casaria como uma viga</i> <i>simples [8]</i>	52
Figura 3-6	<i>Comportamento casco casaria com distribuição não linear [8]</i>	52
Figura 3-7	<i>Efeito de Shear lag presente numa casaria de convés [8]</i>	53
Figura 3-8	<i>Dimensionamento na teoria de duas vigas. Interação de</i> <i>casco-casaria de convés [8]</i>	54
Figura 3-9	<i>Determinação gráfica dos valores de ϕ</i>	56
Figura 3-10	<i>Componentes do critério de Bleich para superposição dos</i> <i>momentos fletores [8]</i>	57
Figura 3-11	<i>Avaliação da eficiência de participação da superestrutura</i>	59

Figura 3-12	<i>Mínimo comprimento para efetividade da superestrutura, Muckle [8]....</i>	59
Figura 4-1	<i>Anel estrutural do navio Nodriza considerando a superestrutura</i>	62
Figura 4-2	<i>Vista de perfil geral e vista estrutural na linha central</i>	63
Figura 4-3	<i>Ilustração dos componentes estruturais participantes na região central do navio Nodriza</i>	64
Figura 5-1	<i>Avaliação de tensões secundarias em sistema chapa-perfil (pesado e leve).....</i>	81
Figura 6-1	<i>Características do elemento CBEAM</i>	88
Figura 6-2	<i>Direções positivas das forcas, momentos e esforços em um elemento de chapa, Manual Nastran 2005, [40].....</i>	89
Figura 6-3	<i>Nível de Detalhe Modelado para o Navio Nodriza</i>	91
Figura 6-4	<i>Distribuição de tanques geral do navio em estudo.....</i>	98
Figura 6-5	<i>Padrões de ondas trocoidal em carga plena</i>	99
Figura 6-6	<i>Forças cortantes resultantes para condição de “carga plena e carga leve”.....</i>	100
Figura 6-7	<i>Momentos fletores verticais resultantes avaliação resistência longitudinal viga navio para condição “carga plena e carga leve”</i>	101
Figura 6-8	<i>Imposição de Momentos Fletores Verticais nas condições de contorno para o modelo com superestrutura.</i>	104
Figura 6-9	<i>Módulo do casco em análise (a) Vista lateral do navio Nodriza demarcando extensão da região central para avaliação pelo MEF. (b) Módulo do casco com participação da superestrutura. (c) Módulo do casco sem superestrutura. (d) Detalhe da modelagem na secção central.....</i>	106
Figura 6-10	<i>Modelo Numérico da Viga Navio para Resistência Longitudinal.....</i>	108
Figura 7-1	<i>Avaliação geral das tensões de Von Mises para o Módulo do Casco com superestrutura na condição estática (E)</i>	115
Figura 7-2	<i>Avaliação geral das tensões de Von Mises para o Módulo do Casco sem superestrutura na condição estática (E)</i>	116
Figura 7-3	<i>Níveis de esforços atingidos no Módulo do Casco para avaliação da Resistência Longitudinal presente e exigida pela norma Bureau Veritas a nível primário para o navio entre ondas. Condição de operação a carga plena.....</i>	117

Figura 7-4	<i>Níveis de esforços atingidos no Módulo do Casco para avaliação da Resistência Longitudinal presente e exigida pela norma Bureau Veritas a nível primário para o navio entre ondas. Condição de operação a carga leve.</i>	118
Figura 7-5	<i>Avaliação da Resistência Longitudinal presente e exigida pela norma BV a nível primário para condição de operação carga plena.</i>	119
Figura 7-6	<i>Avaliação geral das tensões longitudinais para o módulo do casco com superestrutura na condição de alquebramento pela imposição de momento vertical de onda.</i>	120
Figura 7-7	<i>Avaliação geral das tensões longitudinais para o módulo do casco sem superestrutura na condição de alquebramento pela imposição de momento vertical de onda.</i>	120
Figura 7-8	<i>Avaliação da resistência longitudinal geral para a condição de carga plena.</i>	121
Figura 7-9	<i>Avaliação da resistência longitudinal geral para a condição de carga leve.</i>	122
Figura 7-10	<i>Avaliação geral das tensões de Von Mises para o módulo do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.</i>	123
Figura 7-11	<i>Avaliação da deflexão do módulo do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.</i>	123
Figura 7-12	<i>Avaliação geral das tensões de cisalhamento do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.</i>	124
Figura 7-13	<i>Avaliação dos Valores das tensões de Cisalhamento para o navio com Superestrutura.</i>	124
Figura 7-14	<i>Avaliação geral das tensões de Von Mises para o módulo do casco sem superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.</i>	125
Figura 7-15	<i>Avaliação da deflexão do módulo do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento. (Patran).</i>	125

Figura 7-16 Avaliação geral das tensões de cisalhamento do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.....	126
Figura 7-17 Avaliação dos Valores das tensões de Cisalhamento para o navio sem Superestrutura.	126
Figura 7-18 Tensões Longitudinais convés resistente Módulo sem Superestrutura, visualização dos efeitos combinados.....	127
Figura 7-19 Comparação dos esforços longitudinais agentes nas chapas de convés e fundo para o navio sem superestrutura em flexão pura.	129
Figura 7-20 Comparação dos esforços longitudinais (em plano neutro e bordo) agentes na chapa do convés e fundo para o navio sem superestrutura em condição E+D.	130
Figura 7-21 Comparação dos esforços longitudinais agentes (entre balizas ou em vaus) em chapas de conveses e fundo para o navio com superestrutura em condição E+D.	131
Figura 7-22 Comparação dos esforços longitudinais agentes em chapas de costado para o navio com e sem superestrutura.....	131
Figura 7-23 Comparação dos esforços longitudinais agentes em chapas de convés e fundo para o navio sem superestrutura em condição E+D....	132
Figura 7-24 Comparação dos esforços longitudinais agentes em chapas de convés e fundo para o navio sem superestrutura em condição E+D....	133
Figura 7-25 Avaliação dos níveis de eficiência da superestrutura na resistência longitudinal do navio Nodriza.....	134
Figura 7-26 Regiões determinadas para avaliação local de níveis de tensões.....	136
Figura 7-27 Deflexão das sicordas avaliadas no convés de borda livre.....	138
Figura 7-28 Deflexão dos vaus do convés de borda livre, módulo com superestrutura.	138
Figura 7-29 Deflexão dos vaus convés de borda livre, módulo sem superestrutura.	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

LRS	Lloyds Register of Shipping
NKK	Nippon Kaiji Kiokay
DNV	Det Norske Veritas
BV	Bureau Veritas
IACS	International Association of Classification Societies
Lw ou LBP	Comprimento entre perpendiculares
W	Módulo de rigidez da secção do navio.
Wp	Módulo seccional Convés de vôo
Wf	Módulo seccional no fundo
Wt	Módulo seccional convés de borda livre
Msw	Momento em águas tranqüilas
Mvw	Momento vertical de onda
Mhvw	Momento horizontal
Qsw	Força cortante em águas tranqüilas
Qvw	Força cortante para navio em alquebramento ou tosamento
Phs	Pressão hidrostática nas chapas externas do casco em condição (E)
Phd	Pressão hidrodinâmica nas chapas externas do casco em condição (D)
Pint	Pressão interna em tanques
Psta	Pressão estática agente nos conveses e duplo fundo.
(E)	Condição de cargas estáticas
(D)	Condição de cargas dinâmicas
(E+D)	Condição de cargas combinadas
m_a	Distribuição de Massa (massa por unidade de comprimento)
b	Força (associada à flutuação)
w	Força (associada ao peso)
ρ	Densidade água do mar (ou de água fresca)
g	Aceleração gravidade
a_s	Área secção transversal submersa
Q	Força cortante na secção
τ	Tensão de cisalhamento

I	Momento de inércia da seção
m	Momento estático
t	Espessura do chapeamento
l	Comprimento flexível da viga
I_1	Inércia casaria do convés
I_2	Inércia casco até o convés de borda livre
I_A	Inércia conjunta casco e casaria do convés
a	Distancia entre centros de gravidade de casco e casaria do convés
E_1	Modulo de Young aço superestrutura (aço alta resistência)
E_2	Modulo de Young aço casco
A_1	Área da secção transversal da casaria do convés
A_2	Área da secção transversal do casco até o convés de borda livre
M_c	Momento fletor vertical presente a popa da casaria do convés
M_D	Momento fletor vertical presente a proa da casaria do convés
ρ_1	Relação de Módulos de Young
μ	Fator de correção de inércias
$K(x)$	Módulo de rigidez do convés principal
q	Carga uniformemente distribuída.
σ_x	Tensão de flexão.
σ_1, σ_2	Tensões principais para estado duplo de tensões.
σ_{vm}	Tensões de Von Mises calculados nas tensões de membrana
σ_{rod}	Tensões axiais em elementos de viga
σ_{yd}	Tensão de Escoamento
σ_2'	Tensão secundaria perfis pesados
σ_2''	Tensão secundaria perfis leves
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Tensões de cisalhamento
[K]	Matriz de rigidez da estrutura
[k]	Matriz de rigidez de um elemento
E	Módulo de elasticidade volumétrica do material
G	Módulo de elasticidade transversal
y	ordenada vertical em relação à linha neutra

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice I Aplicação do Critério de Bleich para Determinação de Esforços Primários com Participação da Superestrutura e Avaliação de Eficiências.
- Apêndice II Avaliação dos escantilhões para navio Nodriza pela sociedade classificadora Bureau Veritas
- Apêndice III Avaliação dos Escantilhões Para Navio Nodriza Pela Sociedade Classificadora Nippon Kaiji Kyokai.
- Apêndice IV Determinação de Tensões Secundárias e Terciárias do Navio Nodriza.
- Apêndice V Cálculos das Inércias Para os Diferentes Componentes da Secção Mestra.
- Apêndice VI Plano de Distribuição Geral do Navio Nodriza em Estudo.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Os Navios Classe Nodriza

Dentro do cenário de conflito interno da Colômbia, onde existe um grande interesse por parte dos grupos narcotraficantes e terroristas pelas áreas marítimas e fluviais devido à facilidade que elas proporcionam para a movimentação e transporte de armas e drogas, a Marinha de Guerra da Colômbia tem aumentado sua presença nestas áreas com a finalidade de garantir um controle efetivo do mar e dos rios colombianos. Devido à necessidade de intensificar o controle destas áreas através do aumento do número de unidades navais, a Marinha de Guerra da Colômbia, decidiu, por intermédio dos seus departamentos técnicos e da Corporação de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento da Indústria Naval, Marítima e Fluvial da Colômbia - COTECMAR, iniciar a construção de Navios Fluviais de Patrulha classe "NODRIZA" em 1997. Tais embarcações possuem autonomia suficiente para efetuar operações de controle em águas fluviais e servir como apoio logístico para barcos de menor porte, porém com maior velocidade e poder de artilharia. As principais características destes navios são apresentadas a seguir:

Comprimento	39,26 metros
Boca	9,50 metros
Pontal de projeto	3,10 metros
Calado de projeto	1,00 metros
Deslocamento	275 Toneladas

Um dos principais fatores que motivou o desenvolvimento destas unidades foi a inexistência no mercado mundial de navios que possam se ajustar aos problemas e necessidades que a Marinha precisa enfrentar dentro do país. Dentre as necessidades a serem supridas estão a capacidade de efetuar operações de controle e de combate nos rios, armazenar suprimentos e permitir reabastecimento, reparar e auxiliar na manutenção das unidades menores e, mais importante, poder navegar em águas restritas, típicas dos rios colombianos, dentro das áreas de interesse da Marinha e as quais apresentam baixa profundidade.

Nesse contexto, iniciou-se a construção dos Navios Nodriza, que apresentam três gerações de embarcações. A primeira geração (ver Figura 1-1) possui superestrutura central e foi desenvolvida para atender um conceito de operação em águas abrigadas (navegação completamente fluvial) com deslocamentos costeiros curtos, apenas para a movimentação em sua área de operação ou para trabalhos de estaleiro localizados no litoral. Desta geração foram construídas duas unidades.



Figura 1-1 Navio Classe Nodriza de primeira geração

O desenvolvimento de uma segunda geração destas embarcações permitiu melhorias nas características de sua blindagem, artilharia, armazenamento e nas acomodações, embora mantivesse sua superestrutura central (Ver Figura 1-2). Seguindo esta hierarquia de embarcações, ainda permanecia o conceito puramente fluvial e deslocamentos em percursos costeiros apenas para manutenção e reparos.



Figura 1-2 Navio Classe Nodriza de Segunda Geração

O desenvolvimento da terceira geração introduziu mudanças estruturais algo significativas, tais como uma superestrutura abrangendo mais de quarenta por cento (40%) do comprimento do navio, blindagem geral, aumento de artilharia, aumento de armazenamento, acomodações e autonomia, assim como um convés para pouso, reabastecimento e decolagem de helicópteros (ver Figura 1-3). Além disso, o sistema de propulsão original baseado em sistema de hélices foi alterado para um sistema hidrojato.



Figura 1-3 Navio Nodriza de Terceira geração

Dentro desta geração, o conceito operacional continua sendo primariamente a navegação em águas abrigadas, mas ampliando sua capacidade para operações costeiras e com probabilidade de ser submetido a ciclos de navegação em águas profundas.

Uma das dificuldades associadas ao projeto e desenvolvimento dos navios apresentados anteriormente foi a relativa escassez de procedimentos específicos de projeto aplicáveis a este tipo de embarcação. Em particular, as características da terceira geração dos Navios Classe Nodriza a tornam uma estrutura peculiar, uma vez que possuem baixo calado, grande relação boca/pontal e uma superestrutura construída em aço militar resistente de grande comprimento, a qual se estende por aproximadamente quarenta por cento (40%) do comprimento da embarcação. As chamadas regras de projeto das Sociedades Classificadoras de navios não

contemplam explicitamente tais características. Outro aspecto relevante e que possui impacto direto sobre o desempenho estrutural da terceira geração daqueles navios é a ampliação da sua capacidade de operação em águas costeiras ou de águas profundas.

1.2 O Problema do Projeto Estrutural e Avaliação da Resistência Longitudinal dos Navios Classe Nodriza

O projeto de navios militares dentro de um contexto geral é desenvolvido para atender requisitos de combate no mar, seguindo alguns princípios especiais quando comparado aos navios comerciais. O projeto estrutural de navios militares não é regulado por sociedades classificadoras, mas existem algumas opções de regras para navios militares apresentadas pela Lloyd's Register of Shipping (LRS) [1], assim como especificações da Marinha Americana que têm sido referenciadas na construção de navios por sua vasta experiência e confiabilidade [2].

A primeira geração construída de navios Nodriza para operação fluvial foi avaliada estruturalmente para águas abrigadas e referenciada às regras da Sociedade Classificadora Bureau Veritas (1999) para navios menores de sessenta e cinco metros no seu comprimento. Estruturalmente foram avaliados os escantilhões determinando o módulo seccional da secção mestra, considerando para a determinação das tensões agentes aqueles elementos constitutivos até o convés resistente, que no caso da primeira e segunda geração de Navios Nodriza coincide com o convés de borda livre. No entanto, a última geração deles possui superestrutura e estende-se aproximadamente por quarenta por cento do navio, gerando a possibilidade de estabelecer um convés de borda livre e convés resistente diferenciado na secção média (se considerada a superestrutura na resistência longitudinal), mudando assim a aplicabilidade dos cálculos feitos inicialmente, além das novas condições de navegação.

O desenvolvimento da terceira geração de Navio Nodriza, cujas dimensões e capacidades de combate estão fora dos padrões conhecidos para operação em águas abrigadas e não restritas, pode ser considerado pioneiro dentro do âmbito

militar, especialmente por permitir operar conjugadamente em águas não abrigadas e em rios que estabelecem como condição crítica de projeto o calado. Portanto, e considerando as peculiaridades das formas e proporções do navio e que os âmbitos para uso de aplicação das regras comerciais existentes não são de aplicação direta, faz-se necessária a implementação do uso de normas das Sociedades Classificadoras Comerciais, para obter uma avaliação da resistência estrutural do navio Nodriza. Referente à resistência longitudinal, pode ser considerado que, para as Sociedades Classificadoras, os esforços primários em navios menores a 61 metros são de relevância “secundária”. Entretanto, há exceções especiais que consideram sua avaliação relevante para navegações em água não abrigadas de navios particulares.

Estabelece-se que as tensões presentes variem em função do comprimento do navio e dos esforços solicitantes na estrutura mas, em princípio, pode se apreciar que embarcações de comprimento menor, como o navio Nodriza navegando em águas não restritas, apresentam maior probabilidade de navegar sobre ondas do tamanho do seu comprimento, podendo atingir mais facilmente níveis de esforços maiores [4]. Por outro lado, para o navio Nodriza que possui uma superestrutura constituída por chapas de aço de alta resistência e com um comprimento consideravelmente longo, será importante avaliar sua influência no comportamento geral da viga navio [5], especialmente nas áreas de junta com o aço médio. Os processos que interagem entre casco e a superestrutura apresentam complexidade, e sua participação não pode ser avaliada adequadamente numa análise de viga navio. Portanto, uma avaliação mais acurada das deformações e esforços apresentando-se na estrutura é recomendada considerando sua participação dentro de uma análise de módulo do casco¹ para as diferentes condições de navegação.

1.3 Objetivos do Trabalho

Considerando os diferentes aspectos indicados anteriormente, o presente trabalho desenvolve dois Módulos do Casco representando a secção central da

¹ Nome determinado para uma secção do navio modelada por elementos finitos para avaliação estrutural denominada assim por Hughes em Ship Structural Design [5].

terceira geração do Navio Nodriza. Um módulo do casco inclui o arranjo total da superestrutura e outro ignora a presença desta modelando o casco somente até o convés de borda livre. Desta forma, por intermédio dos modelos de elementos finitos, estabelece-se como objetivo central a avaliação de forma acurada do grau de participação estrutural e a influência da superestrutura na Resistência Longitudinal e global do navio, determinando assim a importância da sua inclusão dentro de uma avaliação estrutural para uma condição de navegação em águas não abrigadas.

A análise também tem o objetivo de avaliar e referenciar estruturalmente a última geração dos Navios Nodriza por métodos determinísticos de Sociedades Classificadoras Comerciais e por Métodos Racionais. Isto, dentro dos âmbitos e critérios possíveis de aplicação, para determinar a conveniência do seu uso, bem como definir os diferentes níveis de segurança presentes que permitam considerar a confiabilidade da estrutura para navegar em águas não abrigadas.

O desenvolvimento do Módulo do Casco mediante modelos de elementos finitos permitirá atingir três objetivos escopos do presente trabalho, assim:

- Desenvolver uma análise estrutural para avaliar os esforços globais no nível de resistência longitudinal na estrutura compreendida na região central do navio, nas diferentes condições estabelecidas pelo construtor (carga leve, mínima condição de operação, carga plena e máxima condição de operação). As tensões serão analisadas nos componentes estruturais primários longitudinais e suportando primários (estrutura transversal), assim como nas anteparas transversais presentes na região de avaliação, em função dos critérios de escoamento do material.
- Avaliar a influência da superestrutura, que pela geometria e comprimento pode exercer uma influência significativa no comportamento estrutural do navio dentro da resistência longitudinal, determinando sua eficiência estrutural. Especial atenção nos níveis de tensões será dada na área da junta com o casco, levando em conta a dissimilaridade nas propriedades dos materiais presentes.

- Analisar a conveniência de aplicação dos processos determinísticos propostos pelas regras de Sociedades Classificadoras para navios de comprimento semelhante dentro de uma avaliação estrutural inicial que permita estabelecer se em função dos requerimentos exigidos a estrutura instalada no navio militar da Classe “Nodriza” satisfaz totalmente os critérios para a navegação em águas profundas. As regras utilizadas serão as determinadas pela Bureau Veritas para navios de menos de 65 metros e Nippon Kaiji Kyokai para navios menores a 90 metros e seus resultados serão referenciados aos valores obtidos das análises dos módulos dos casco.

2 RESISTÊNCIA LONGITUDINAL DO NAVIO

O projeto do navio, em particular a sua análise estrutural, requer o conhecimento das diversas forças agentes sobre a estrutura. A determinação correta da magnitude destas forças é crucial para evitar que os diversos carregamentos agentes no navio durante sua vida útil gerem tensões e deformações que superem os limites estabelecidos previamente no projeto.

O presente capítulo apresenta uma abordagem dos aspectos relacionados à resistência longitudinal do navio, considerando basicamente uma condição estática para determinação dos esforços solicitantes agentes. São introduzidas hipóteses simplificadoras, através das quais podem ser elaborados processos racionais que, embora incorporem aproximações um tanto profundas, produzem resultados aplicáveis à estrutura real dentro de um processo de avaliação. Além disso, serão tratados os esforços cortantes e os efeitos de “Shear Lag” associados às características do navio em estudo.

2.1 Padrões de Onda e Esforços Primários

Os diferentes esforços presentes no navio são produtos de forças de natureza estática e dinâmica. Para determinar as tensões primárias serão considerados dois tipos de carregamento: um correspondente à distribuição de todos os pesos próprios e outro devido à flutuação do casco, resultante da pressão hidrostática, que depende do comportamento de onda. Serão tratadas a seguir estas duas classes de esforços.

Em relação às forças de flutuação, um navio no mar encontra um sistema de ondas que é considerado altamente irregular e composto por ondas de diferentes comprimentos e alturas, atingindo o navio em diferentes direções e gerando diferentes forças e momentos na estrutura. Torna-se muito difícil uma avaliação dentro de um padrão de ondas determinístico, pois estatisticamente vê-se que elas não se repetem exatamente.

O comprimento, forma e altura da onda têm uma importante influência sobre a distribuição de flutuação no navio. Para desenvolver uma análise das tensões existentes será preciso elaborar um modelo simplificado da onda que gere as máximas solicitações possíveis. Para isto, é assumido como hipótese que a onda terá uma forma regular e que suas cristas afetarão a flutuação do navio incidindo sobre ele paralelamente em relação ao eixo do seu movimento.

É prática comum considerar uma onda de comprimento igual ao do navio, situando as suas cristas nas perpendiculares de proa e popa ou na secção mestra. Isto permite avaliar as tensões máximas que poderiam ocorrer em conjunção com critérios adequados de carregamento e altura de onda, que altera os momentos fletores pela mudança das áreas submersas e, portanto, da flutuação.

Para avaliação da resistência longitudinal, é prática comum adotar a forma de uma onda trocóide, que foi trabalhada por Froude como uma aproximação ideal a um perfil bidimensional, segundo Muckle [15]. Sua geometria e simplicidade matemática auxiliam o tratamento analítico aqui discutido. Ondas senoidais também são usadas, mas foi observado que a tendência das ondas do mar é apresentar maior curvatura nas cristas que nos cavados, razão pela qual a onda trocóide representa melhor este comportamento (ver Figura 2-1).



Figura 2-1 Comparação entre uma onda senoidal e uma trocóide

Diferentes critérios e propostas para determinar a altura (h) da onda são apresentadas por vários autores, onde a escolha da altura crítica tem sido mais hipotética, como pode ser visto na revisão feita por Heller [11]. Uma avaliação continuada das informações de ondas tem gerado um número considerável de formulações, que são apresentadas na Figura 2-2 e que permitem considerar significativas diferenças de valores das alturas. Tais diferenças são particularmente

proeminentes para navios de comprimentos menores de 90 metros, onde a formulação de Biles e White assume um valor de $h = \frac{L_w}{20}$, sendo L_w o comprimento entre perpendiculares (critério assumido para avaliação da resistência longitudinal no presente trabalho). Deve-se enfatizar a influência marcante que a altura da onda, comprimento e forma, esta última de padrão trocóide, terão na resistência longitudinal.

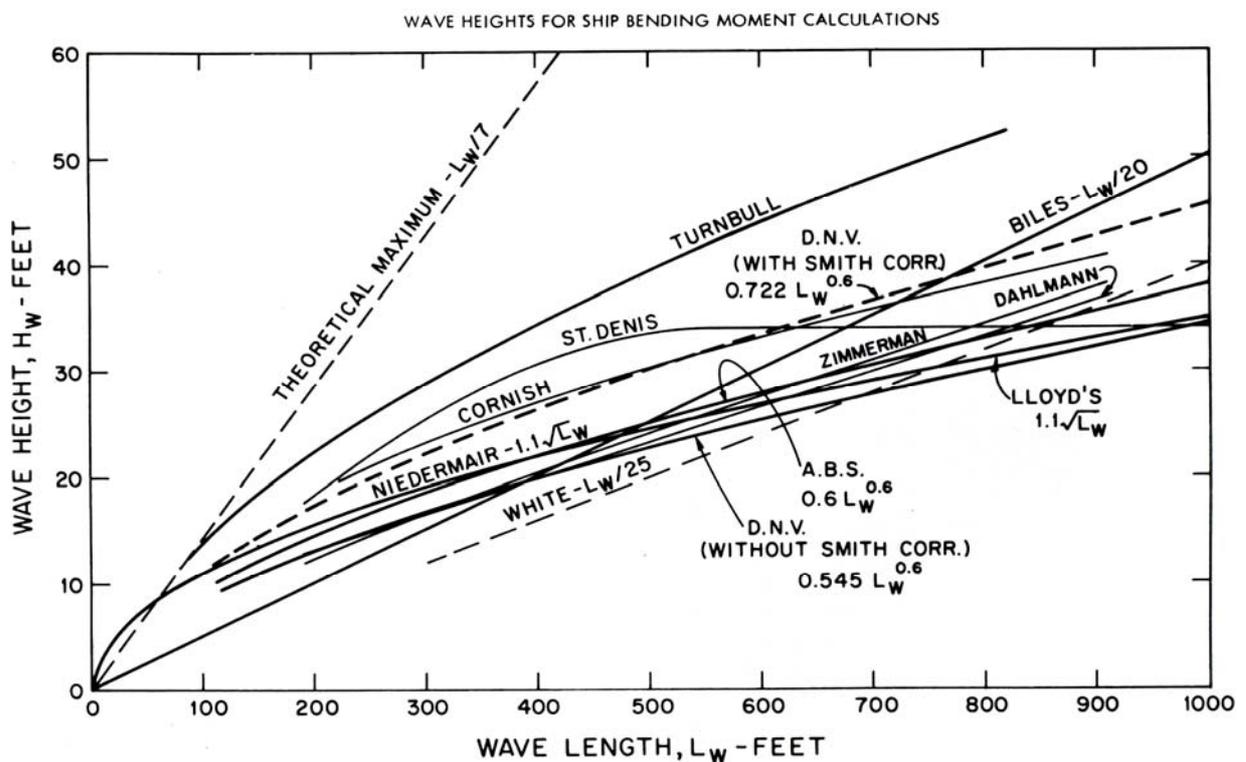


Figura 2-2 Altura de ondas para determinação dos momentos fletores verticais [8]

Como será descrito adiante neste capítulo durante a abordagem das tensões primárias de flexão, a resistência longitudinal do navio é analisada sobre suposições essencialmente estáticas, que consideram o navio pousado (estaticamente) sobre uma onda. Esta configuração permite determinar as forças de flutuação originadas pela pressão hidrostática da coluna de água embaixo do ponto em análise até a superfície livre da onda. Geralmente, as respostas estruturais do navio dependem diretamente das condições do mar, que em alguns casos podem ser minimizadas perante diferentes critérios de operação. Porém, em outras situações as solicitações atingem níveis importantes e as cargas podem ser extremamente significativas,

causando tensões elevadas com valores limites em diferentes momentos e posições da estrutura do navio.

Com referência aos pesos agindo no navio, estes são função de cargas próprias e cargas que variam com os diferentes tipos de operações realizadas pelo navio. No caso desse estudo (navio militar), serão consideradas as diferentes condições de carga para navegações descritas pelo construtor, em função das cargas variáveis limitadas aos seus consumíveis (combustíveis, víveres e munição). Com relação à distribuição dos pesos presentes no navio (os quais influenciam diretamente a resistência longitudinal), são considerados todos aqueles carregamentos permanentes e transitórios. Uma avaliação acurada deles é exigida na determinação da curva de pesos, pois da precisão desta, a análise conjugada com a curva de flutuação permitirá obter uma aproximação à resistência longitudinal, mediante o uso da teoria simples de vigas.

As cargas dinâmicas possuem relação com os diferentes movimentos que apresenta o navio na sua passagem através das ondas, com influência direta sobre a resistência longitudinal do navio. O navio tem seis graus de liberdade, dos quais três são de translação e três de rotação. Uma consequência destas movimentações é a geração de acelerações que irão desenvolver forças de inércia (associadas a forças hidrodinâmicas decorrentes do movimento das partículas de água envolta do navio) sobre a estrutura do navio, as quais têm que ser avaliadas e adicionadas às forças estáticas.

Uma forma de classificar as diferentes cargas é considerar sua variação com relação ao tempo, como, estáticas, de variação lenta e de variação rápida. A Tabela 1 apresenta uma classificação das três categorias de carga segundo Hughes [5]. Dentro das cargas que variam lentamente, a pressão dinâmica induzida por uma onda (carga tipo seis na Tabela 1), é a mais importante dentre as exibidas naquela tabela com efeito significativo sobre o momento de flexão agente sobre a viga navio. Quando analisada a viga navio, o valor dos esforços induzidos pela onda (flexão vertical) é obtido em função dos momentos presentes e da rigidez da viga.

Tabela 1 Cargas principais agentes nos navios [5]

Classificação	Descrição	No.
Cargas estáticas	Para águas tranqüilas	1
	Pressão externa (flutuação)	2
	Pressão interna (pesos)	3
	Dique Seco	4
	Térmicas	5
Cargas variando lentamente	Pressão dinâmica distribuída induzida pela onda sobre o casco conseqüência dos movimentos do navio e encontro de ondas	6
	Agitação de cargas líquida (sloshing)	7
	Embarque de águas sobre convés (green sea)	8
	Batimento de ondas em proa e costados	9
	Cargas inerciais de objetos pesados	10
	Lançamento e armazenagem de cargas	11
Cargas variando rapidamente	Batimento de proa (Slamming)	12
	Vibração forçada (hélice)	13
	Outras cargas dinâmicas	14

O final deste capítulo definirá a relevância das cargas e sua caracterização quando efetuada uma avaliação estrutural do navio, baseada numa análise do Módulo do Casco.

2.2 Tensões Primárias de Flexão

De forma geral, quando se refere à estrutura de um navio nos estágios iniciais do projeto, é comum associá-la com uma viga, conhecida como viga navio e representada por uma viga caixão. Esta deverá ser constituída por materiais resistentes e dimensões adequadas com o propósito de garantir uma resistência estrutural adequada do casco frente às diferentes forças e momentos que agirão sobre ela e que são consideradas na teoria de vigas: forças cortantes verticais, momentos fletores longitudinais nos planos verticais e horizontais, assim como os momentos de torção.

As tensões e deformações são produtos de três classes de solicitações no navio: uma corresponde à flexão da viga navio, considerando este como uma viga que deforma como um todo dando lugar à deformação primária. A partir desta, a deformação secundária fica sendo constituída pela flexão dos painéis entre anteparas e limitados pelos costados do navio, que experimentam flexão juntamente com os enrijecedores da grelha (longitudinais entre elementos transversais adjacentes). Por último, a partir da deformação secundária, está a deformação terciária, constituída pela flexão do chapeamento, que está limitado por duas hastilhas e duas longarinas adjacentes.

O primeiro a considerar o navio entre ondas como uma viga foi Piestzker [6], assim como Attwood [7], que desenvolveu a complexa viga navio representando-a como uma viga com vários flanges (equivalente). Em essência, a viga navio está constituída por elementos considerados como contínuos quando comparados com o comprimento do navio, convés e estrutura do fundo formariam os flanges da viga e chapeamento de costado, e anteparas longitudinais entre outros elementos rígidos formarão a alma da citada viga. Apesar do caráter não prismático da viga navio, a simples consideração do navio como uma viga caixão é uma prática muito usada para avaliar os esforços de primeira ordem em todo o comprimento. Para poder avaliar o navio como uma viga caixão prismática dentro da teoria de vigas simples as seguintes suposições são feitas:

- o Secções planas, que são normais ao eixo neutro da viga antes da flexão, continuam planas após flexão, desprezando-se as deformações por esforços cortantes. Esta suposição conhecida como hipótese de Euler, Bernoulli ou Navier [4], considera que tensões axiais variam linearmente ao longo da altura da secção, considerando valores de zero no seu eixo neutro até valores máximos absolutos nas fibras mais afastadas do eixo neutro; desta forma o eixo neutro não sofre deformação.
- o Se as deformações existentes por flexão são lineares, os momentos de flexão verticais e horizontais podem ser interpretados separadamente e posteriormente superpostos. Mas se a flexão vertical é altamente predominante, os esforços normais agindo ao longo dos eixos verticais e transversais na viga caixão podem não ser considerados.

- A viga experimenta deformações pequenas, de forma que as mudanças na geometria não tenham que ser avaliadas nas equações de equilíbrio. Isto implica em não considerar esforços de membrana, concordando com a suposição que só cargas transversais verticais vão agir sobre a viga.
- O material obedece a um comportamento linear elástico.
- Efeitos dinâmicos podem ser desprezados ou levados em conta, desde que no seu tratamento sejam considerados como cargas agindo estaticamente.

É importante verificar que as considerações anteriormente expostas oferecem resultados adequados em vigas longas e esbeltas, experimentando efeitos de cargas moderadas. Vigas longas são aquelas cuja relação entre o seu comprimento (comprimento do navio) e a sua altura (pontal do navio) é maior do que 10 [8]. Se a relação existente é consideravelmente menor, os efeitos gerados pelos cortantes representam um valor importante e a suposição fundamentada nas hipóteses de Navier não terá validade suficiente. Igualmente, a suposição de considerar somente os esforços longitudinais apresenta aplicabilidade suficiente em vigas cujo comprimento é muito maior quando comparado com a sua largura e altura. Para a determinação das deformações primárias será considerado o navio flutuando sem vínculos (ver Figura 2-3), admitido o conceito da flexão pura. A diferença entre a distribuição de pesos $w(x)$, junto com todas as cargas contidas nele e a flutuação do casco $b(x)$, (produto da pressão hidrostática agindo perpendicularmente), permite avaliar as forças cortantes $V(x)$, e os momentos fletores $M(x)$, agentes no comprimento do navio, como segue:

$$f(x) = b(x) - w(x) \quad (2.1)$$

$$V(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (2.2)$$

$$M(x) = \int_0^x V(x) dx \quad (2.3)$$

Sendo,

$f(x)$ = Força resultante vertical na secção x

$b(x)$ = Força de flutuação na secção x

$w(x)$ = Força dos pesos na secção x

$V(x)$ = Força cortante vertical na secção x

$M(x)$ = Momento fletor longitudinal na secção x

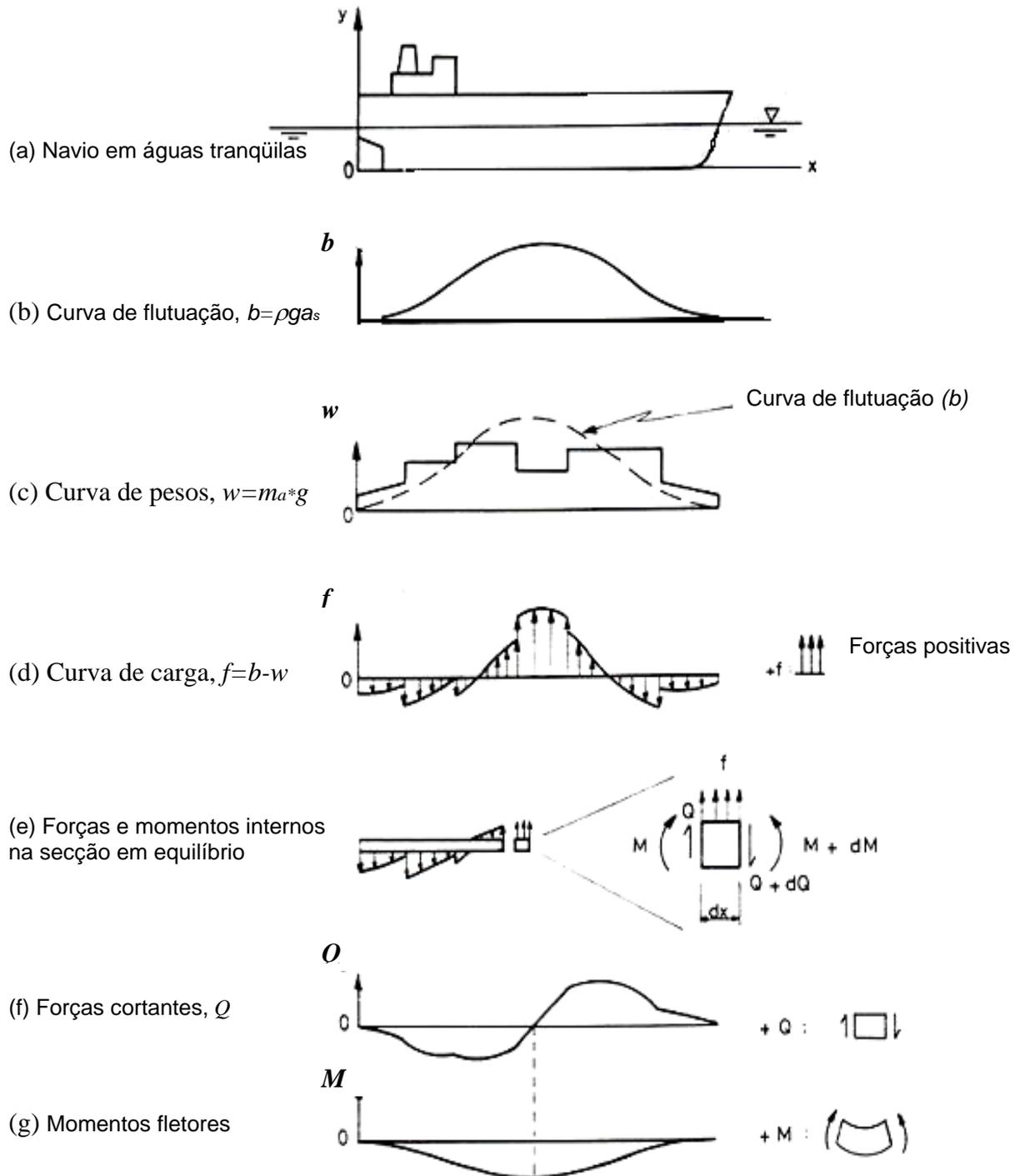


Figura 2-3 Resumo Gráfico da Flexão da Viga Navio [5]

As constantes de integração para a viga navio são zero considerando este como apoiado livre-livre, portanto, com força cortante nula nos extremos.

De forma geral, as forças cortantes agem devido a uma presença maior de flutuação ou peso e tenderão a levantar ou baixar alguma região do comprimento do navio e o momento agindo longitudinalmente no plano vertical tende a fletir o navio como se este fosse uma viga. Para a formação da estrutura primária e avaliação do módulo de rigidez, podem se considerar todos os elementos com comprimento contínuo e significativo como são as quilhas, sicordas, longarinas, anteparas longitudinais, e todo o chapeamento de conveses, fundo, duplo-fundo e costado.

Calculando os momentos e conhecendo a rigidez da viga navio, as tensões de flexão podem ser determinadas basicamente por:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (2.4)$$

Onde,

σ = Tensão de flexão da viga navio

M = Momento fletor agente na viga navio

W = Módulo de rigidez da secção do navio

As informações apresentadas na Figura 2-3 mostram a condição de avaliação do comportamento da viga navio para uma condição de águas tranquilas. As mesmas considerações têm validade para a avaliação primária do navio pousado entre ondas. Mas, neste caso, a distribuição de flutuação mudará e para isto pode se assumir o navio pousado estaticamente na condição da onda em estudo, desprezados os efeitos dinâmicos num estágio inicial. Isto gera uma modificação dos esforços cortantes e dos momentos fletores no navio. É prática comum adicionar estes aos momentos e cortantes obtidos em águas tranquilas, considerando-se como constantes em uma determinada condição de carga, para obter os momentos e cortantes resultantes finais.

Adicionalmente, as deformações secundárias associadas são geradas pelas cargas laterais no chapeamento que flexionam os enrijecedores. Uma vez que este conjunto apresenta ligações entre si, sua análise torna-se mais complexa do que avaliar os esforços primários ou terciários.

Existem diversos métodos para uma análise das tensões secundárias (σ_2' e σ_2'' , tensões em perfis pesados e leves respectivamente) e como elas são superpostas com as tensões terciárias. Inicialmente, uma determinação das tensões nos perfis leves (σ_2'') empregado a teoria simples de vigas permite obter um cálculo parcial da contribuição destes elementos dentro das tensões secundárias, levando em consideração a participação de chapa colaborante² juntamente com as hipóteses para avaliação das rotações existentes nas suas extremidades, isto considerando seu apoio nos perfis pesados. Especial cuidado para a imposição de cargas laterais agindo no chapeamento deve ser considerada.

Finalmente, a análise das tensões terciárias, como já foi descrito, corresponde à porção do chapeamento que limita com dois perfis adjacentes na direção longitudinal e dois transversais. Elas fazem parte dos painéis estruturais conformando a viga navio e poderá ser plana ou curva. Este estudo está fundamentado na teoria de placas considerando que o material permanece elástico, o plano médio da espessura não será deformado pela flexão e que nas deformações da flexão podem ser desprezadas as contribuições das tensões verticais na chapa σ_z e das tensões cisalhantes τ_{xz} e τ_{yz} .

As considerações expostas anteriormente deixam de ser válidas para estruturas trabalhando sob regime plástico, ou em casos onde a deflexão supere valores em cinquenta por cento do valor da espessura da chapa quando considerada como apoiada e setenta e cinco por cento da espessura da chapa para o caso engastado [5]. Assim, como não são comuns as chapas grossas na construção dos navios, (razões de largura e espessura ou comprimento e espessura muito menores), desprezar as contribuições descritas é válido. Basicamente pode se determinar os pontos de tensão máxima por meio da teoria de chapas para pequenas deflexões com coeficiente de Poisson $\mu=0,3$ e considerando seus lados engastados ou apoiados.

² Com o uso da teoria de vigas precisa-se que a largura efetiva da chapa associada como colaborante ao perfil conformando a viga em estudo, represente os valores das tensões máximas a ocorrer.

2.3 Tensões primárias de Cisalhamento

Os esforços cortantes em uma secção de viga causam uma ação de deslocamento ou escorregamento sobre o plano normal ao eixo da viga, contrária à deflexão resultante dos momentos fletores. Normalmente, a deflexão gerada pelos cortantes é desprezada, pois ela representa uma porcentagem muito menor quando comparada a deflexão total. A deflexão devida ao esforço cortante depende na totalidade de sua distribuição através da secção e do seu valor (τ).

Na Figura 2-4 pode se apreciar que a deflexão gerada pela ação dos esforços cortantes incrementa linearmente com o comprimento da viga, enquanto a deflexão por flexão simples evolui com a terceira potência do comprimento da viga. É por isto que a deflexão por cortante não é considerada relevante, exceto aquelas situações de comprimentos muito curtos onde a deflexão por flexão cai para valores muito menores e são as forças cortantes que apresentam valores maiores [12].

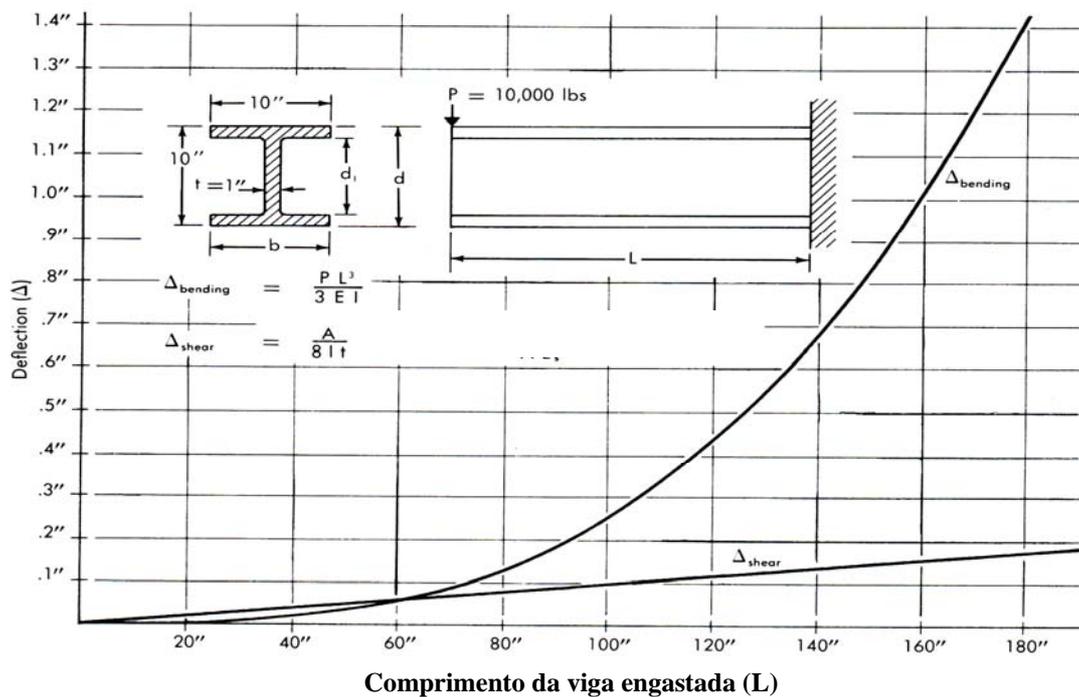


Figura 2-4 Comparação da deflexão causada pelos cortantes e pelos momentos fletores numa viga engastada com carga pontual e de dimensões médias. [12]

Na viga navio, como em qualquer viga carregada com forças verticais transversais, existe uma força cortante (V) agindo na secção transversal. Em vigas

caixão de parede delgada é importante conhecer como ela é distribuída na secção para determinar a espessura das paredes adequadamente.

Navios comerciais de águas profundas apresentam tipicamente bocas numa faixa de 1/8 a 1/6 do seu comprimento; igualmente, sua relação entre o comprimento e o pontal pode estar na ordem de 9 a 15. Em uma viga com secção transversal retangular sólida que apresente estas dimensões, pode-se desprezar os esforços cortantes transversais, já que a magnitude deles é mínima quando comparados aos grandes esforços de compressão e tração desenvolvidos pela flexão simples [8]. Mas em navios com secções abertas ou fechadas, é importante avaliar estes esforços em determinadas regiões, mesmo que estejam dentro das dimensões antes comentadas, considerando que em projetos não bem dimensionados podem ocorrer máximos esforços cortantes em chapeamento de costado ou anteparas longitudinais, gerando assim instabilidades estruturais.

Considerando a teoria elementar de vigas e avaliando na *Figura 2-5 (a)* uma viga caixão de paredes delgadas, que apresenta um corte de comprimento dx e está submetida a uma força vertical cortante Q . Pode-se ver que, existindo variação de momentos M , ao longo do comprimento da secção, existirão também ao longo da secção transversal, tensões de cisalhamento τ , como visto em (a) e (b).

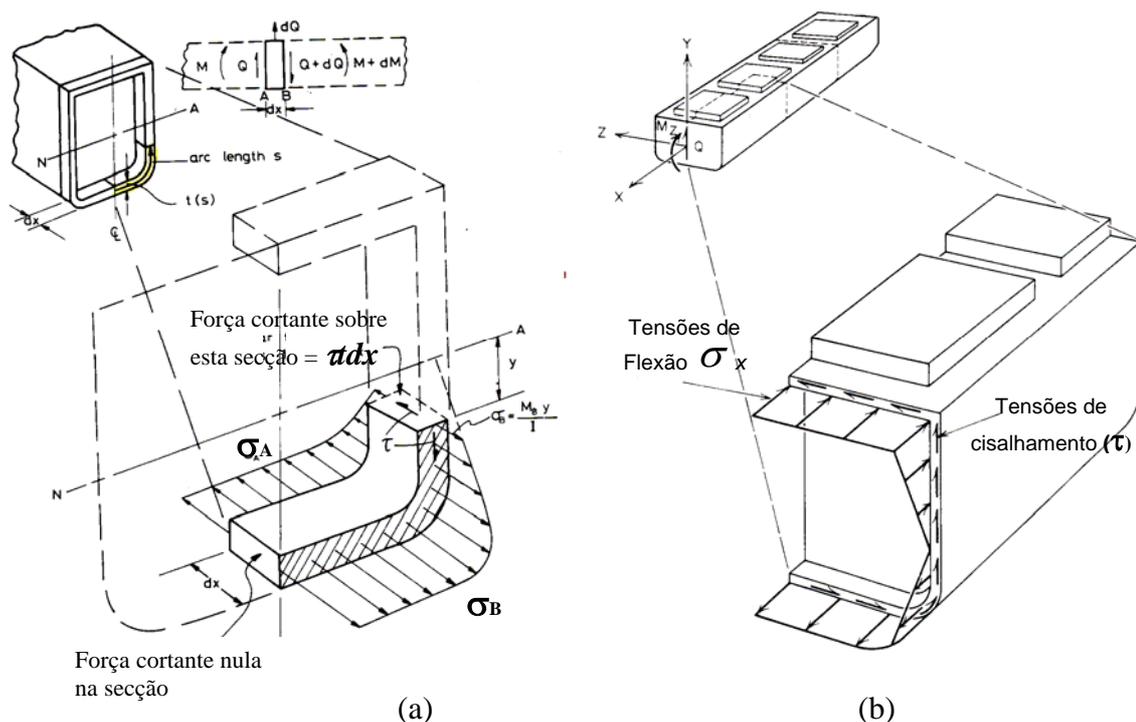


Figura 2-5 Diagrama de cortantes transversais e fluxo cortantes [5]

Portanto, a diferença existente entre as forças longitudinais internas das tensões normais σ_A e σ_B , representados em Figura 2-5 (a), serão balanceadas por forças longitudinais, produto das tensões cisalhantes ($\tau t dx$) através dos cortes na secção. No entanto, considerando a simetria da secção, o balanço de forças associadas pode não apresentar esforços cortantes no plano central de corte, portanto, o balanço de forças deve ser atingido devido às tensões de cisalhamento (τ) na outra face de corte. Portanto, o equilíbrio da secção em avaliação considera que:

$$\tau t dx = \int_0^s \sigma_B t ds - \int_0^s \sigma_A t ds \quad (2.5)$$

Expressando em função do momento as tensões σ_A e σ_B representadas em eq. (2.5) e substituindo-as com eq. (2.4) e agrupando termos constantes, obtém-se,

$$\tau t dx = \frac{M_B - M_A}{I} \int_0^s y t ds = \frac{dM}{I} \int_0^s y t ds \quad (2.6)$$

Considerando que a variação do momento (dM) no comprimento (dx) é igual à força cortante $\left(\frac{dM}{dx} = Q\right)$ e reconhecendo a expressão $\int_0^s y t ds$ como o primeiro momento estático de área (m), obtém-se finalmente a expressão para determinação dos esforços cortantes,

$$\tau = \frac{Qm}{It} \quad (2.7)$$

Quando se considera o produto de $\tau \times t$ refere-se ao Fluxo de Cisalhamento (\vec{q}), quantidade comumente usada no que o esforço de corte é gerada pelo carregamento transversal. Levando em consideração que o Cortante (Q) e a Inércia da Secção (I) são constantes para a secção toda, o fluxo de cisalhamento é diretamente proporcional ao primeiro momento estático (m).

2.4 Efeitos de Shear Lag

Continuando com a teoria elementar de vigas, consideram-se as tensões de flexão como diretamente proporcionais à distância do ponto considerado ao eixo

neutro. Logo, para a viga navio conformada por inúmeros perfis, que como vigas conformadas por alma e flanges, teriam suas tensões que ser constantes ao longo dos flanges. No entanto, em diversas situações, a flexão não é produto de um binário de forças agindo nas extremidades da viga, e sim causada por cargas transversais que serão absorvidas pelas almas e não pelos flanges da viga.

No caso da viga navio, a cargas verticais agem inicialmente sobre a chapa do fundo ou convés (flanges), sendo imediatamente transferidas ao costado (almas) pelos váus transversais e cavernas. Sob o efeito das cargas, a alma da viga experimenta uma curvatura induzindo máximas deformações nos flanges. Essas deformações são originadas na alma e atingem somente o flange por causa do cisalhamento.

A *Figura 2-6 (A)* mostra uma viga caixão em balanço com seu extremo livre sob ação de uma carga concentrada. As almas da viga caixão tendem a curvar de forma a alongar e, portanto, a tracionar consigo o chapeamento do flange superior da viga. Da mesma forma acontece na parte inferior, onde o efeito é encurtar o extremo da viga. Como resultados desses deslocamentos, aparecem forças de cisalhamento que originam tensões de cisalhamento nos flanges, produto da tração exercida nos flanges distorcendo-o de modo que o elemento mais próximo da alma da viga deve se esticar. Expressado de outra forma, a deformação no sentido longitudinal será menor do lado interno e conseqüentemente as tensões longitudinais também serão menores.

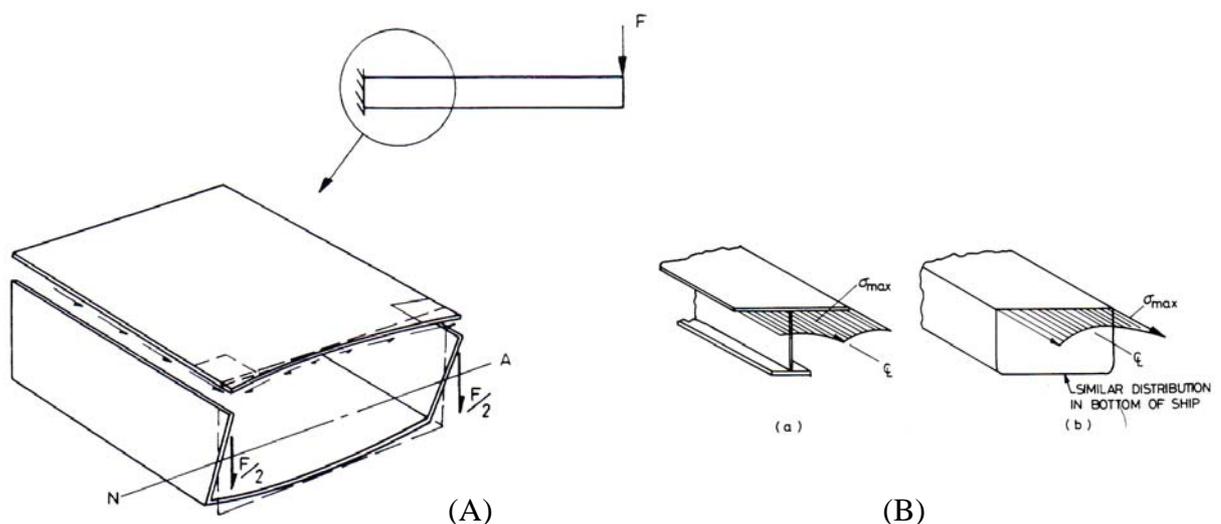


Figura 2-6 Efeito "Shear Lag" em viga caixão e flanges de vigas [5]

Citado fenômeno vai agir do bordo até a linha central, diminuindo gradualmente até atingir a linha de centro e desaparecer, considerando que as tensões de cisalhamento neste ponto são nulas. Como consequência disto, o flange vai apresentar uma distorção no plano longitudinal dando lugar ao que se conhece como “empenamento” e caracterizado pela presença de tensões menores de flexão naqueles pontos mais afastados do flange. Este fenômeno presente em vigas com flanges largas sobre cargas laterais é denominado de “Shear Lag” e caracteriza uma redução das tensões mais próximas das almas.

Em uma viga de secção aberta como a apresentada na *Figura 2-6 (B),(a)*, são os pontos mais afastados do flange menos efetivos. A magnitude dos efeitos do Shear Lag é dependente da relação da largura para o comprimento do flange, da distribuição do carregamento lateral ao longo da viga, das proporções relativas entre almas e flanges e da classe de secção. O shear lag é importante para vigas com flanges longos e almas curtas. Em vigas caixão os efeitos são consideravelmente menores e para a flexão da viga navio usualmente os efeitos do shear lag representam pouca porcentagem nos esforços totais, sendo mais importantes as considerações dos seus efeitos em superestruturas e na chapa colaborante do chapeamento.

2.5 Resposta Combinada da Viga Navio e Tensões Admissíveis

Esforços cortantes agindo em seções a proa e popa do navio vão gerar deslocamentos por cortantes, isto foi apresentado por Lockwood Taylor em 1924 [13]. Portanto, na presença de tais esforços cortantes no convés, por exemplo, que são uniformes desde a linha neutra da secção, esforços de compressão e de tração a proa e popa podem não ser constantes desde o bordo do convés até a linha central do mesmo, como é previsto na teoria simples de vigas, na qual as seções planas transversais permanecem planas [8].

A característica da distribuição de esforços cortantes (τ) resultante da hipótese de uma secção plana é mostrada na *Figura 2-7 (B), (a)*. Isto vai gerar uma distorção por efeitos do “Shear Lag” representada em *(B), (b)*, que ao adicionar os

efeitos da teoria simples de viga representados em (A), (b), gera finalmente a distorção apresentada em (C), (b), dentro dos limites elásticos e com uma distribuição de esforços por flexão simples similar.

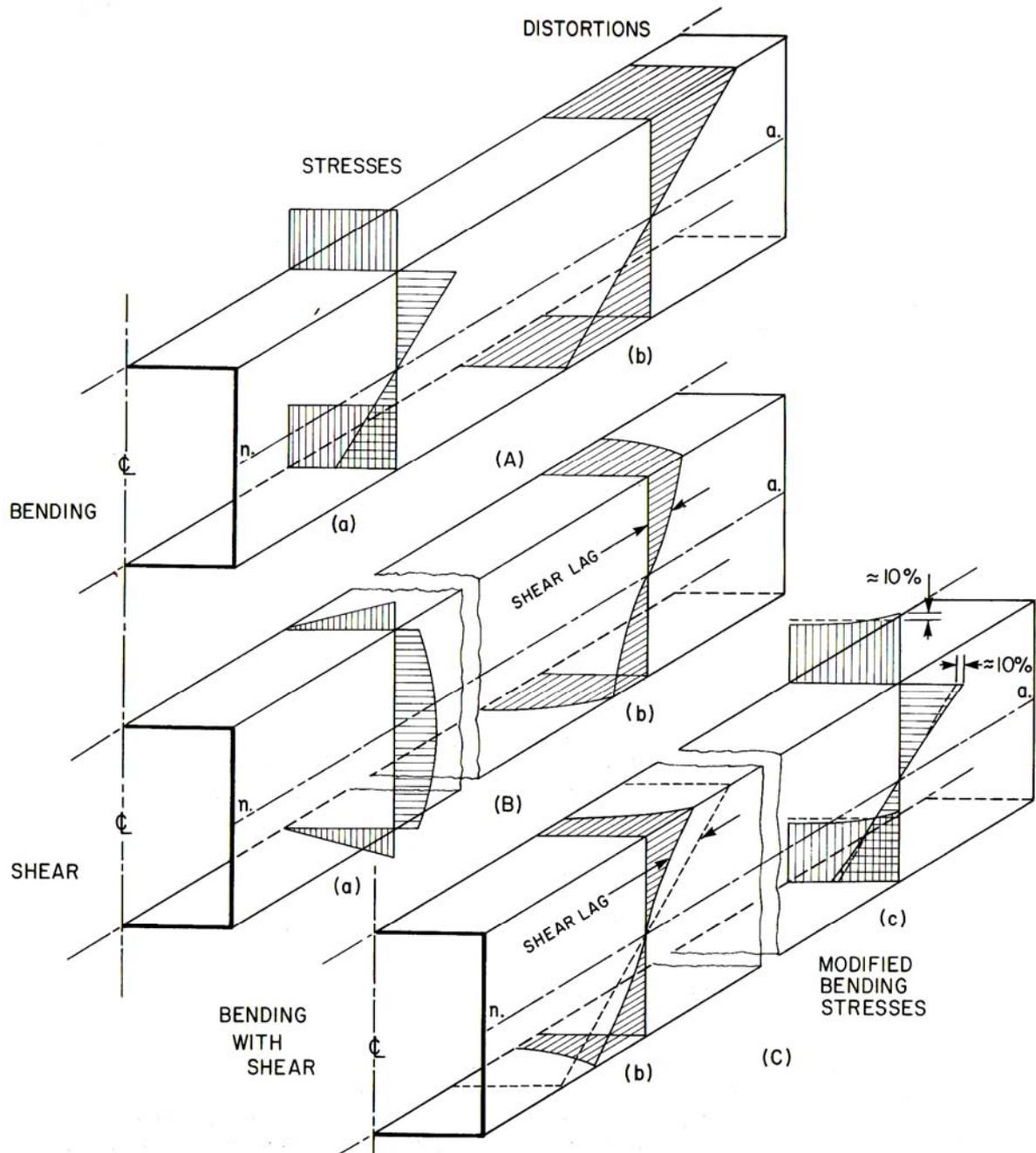


Figura 2-7 Raciocínio de Lockwood Taylor da influência dos esforços cortantes na estrutura do navio [8]

A distorção gerada pela deformação por cortantes, como o caso do “Shear Lag” deve ser sempre negativa e agir na direção de alívio das deformações e

esforços gerados diretamente pela flexão simples. Assim os momentos resultantes das forças internas dentro da viga navio devem permanecer iguais aos momentos de flexão externa impostos.

Com relação aos esforços combinados, pode ser dito que a característica de destaque sobre as diferentes modificações é o incremento das tensões na parte superior da chapa de costado e no bordo do convés. Igualmente ocorre uma redução nas tensões na linha central do convés, com maior acentuação desta característica no fundo do chapeamento. Para um caso de carregamento específico e um navio de $B/L=0,13$, Lockwood Taylor concluiu que as tensões na borda do convés experimentavam um acréscimo de 10%, enquanto que esforços na linha central diminuía aproximadamente 7% com relação aos esforços obtidos pela viga simples. Adicionando um segundo convés às tensões na borda do convés incrementavam ainda mais e contrariamente diminuía na linha central. Correções dos esforços incrementam aproximadamente com incrementos de $(B/L)^2$.

Em função das tensões finais resultantes nos diferentes componentes estruturais, uma avaliação baseada em níveis de tensões admissíveis, entre outros, será realizada para determinar o desempenho da estrutura ante os diferentes esforços solicitantes. A tensão admissível será representada por um valor limite, cujo propósito é ser um indicador para prevenir uma falha ou conjunto de falhas. Sempre que as tensões atuantes em qualquer ponto da estrutura superaram o valor admissível, considera-se logo que ocorrerá a falha. Para estimar as tensões agentes em um ponto, diversas teorias são propostas considerando o escoamento e a ruptura de materiais sob estado multiaxial de tensões. Uma teoria que permite avaliar o comportamento de materiais dúcteis sob tensões combinadas é a que considera a máxima energia de distorção [8].

A teoria proposta e adotada como padrão de avaliação para o presente trabalho é apresentada por Von Mises e Hencky. Está idealizada para materiais dúcteis e isotrópicos e é relacionada com conceitos de energia. Para esta teoria, a energia elástica total é dividida em duas partes: uma primeira associada às variações volumétricas do material e a outra capaz de provocar distorções por cisalhamento. Igualando a energia de distorção por cisalhamento no limite em tração

simples à relativa da ação de tensões combinadas, fica estabelecido o critério de escoamento para tensões combinadas. Pode-se demonstrar que a condição de escoamento para um material idealmente elástico em estado de tensão tri-axial pode ser expressada, em termos das tensões principais por:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \pm 2\sigma_{esc}^2 \quad (2.8)$$

Sendo os esforços principais, σ_1 , σ_2 e σ_3 , no ponto de avaliação e σ_{esc} o esforço limite de escoamento.

2.6 Níveis de Análise Estrutural

A seguir será introduzida a relação do Módulo do Casco e os diferentes esforços solicitantes dentro da análise do modelo de elementos finitos para uma avaliação da resistência estrutural do navio em estudo. Para interpretar as cargas agentes no navio segundo Hughes [5], elas podem ser consideradas dentro de uma análise racional que permite estabelecer quatro níveis de avaliação estrutural (ver Figura 2-8). Primeiro, a viga-navio explicada anteriormente; segundo, o módulo do casco, correspondente a uma análise de uma ou várias secções do navio usando o método dos elementos finitos; terceiro, a avaliação dos membros principais (estrutura primária e suportando primários) e um último nível de carácter local. Dentro destes níveis é possível classificar as cargas de acordo com o nível que elas atingem e a sua influência, considerando que uma carga pode envolver um ou vários níveis.

Para desenvolver a análise estática do módulo do casco, os esforços obtidos e induzidos pela onda, juntamente com os esforços obtidos da condição de águas tranqüilas (análise da viga navio), formam as cargas a serem impostas nos extremos finais do modulo do casco. As outras cargas a serem colocadas dentro desse módulo do casco são: uma pressão estática distribuída e equivalente para representar a pressão dinâmica agindo no casco e as cargas influenciadas pela gravidade como o peso da estrutura, peso de cargas, etc. Elas podem estar

influenciadas por efeitos inerciais, produto dos momentos de translação e rotação do navio e que se for considerada tem ingerência importante no comportamento em avaliação, devem ser representadas.

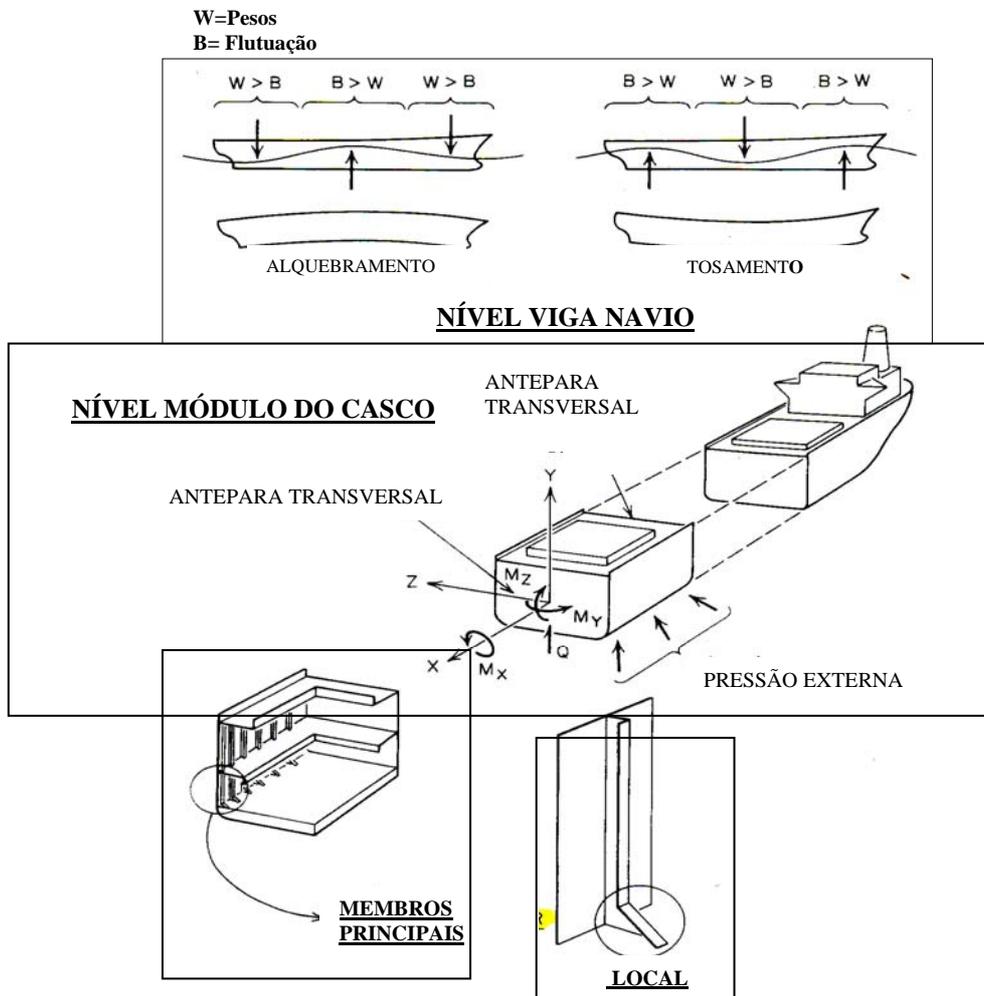


Figura 2-8 Níveis de análise estrutural [5]

As outras cargas de variação lenta, apresentadas em Tabela 1, (7, 8, 9 e 10) teriam que se derivar de uma análise de movimento do navio, mas apresentam alta não linearidade, especialmente (7), (8) e (9). Enquanto a (7) o manual da DNV de cargas e resistência de 1978 permite fazer aproximações para alguns valores. Para o embarque de água no convés, seus efeitos podem ser avaliados ao impor uma pressão hidrostática para uma altura equivalente de coluna de água. Pressões horizontais sobre casarias podem ser representadas por uma pressão estática equivalente de 0,05 MPa igual que (9). Cargas inerciais demandam conhecimento

das acelerações presentes nos diferentes pontos do navio [5]. Portanto, pode ser concluído que, na avaliação do carregamento não estático, é preciso considerar uma faixa das condições de mar e dos ângulos de incidência de ondas para se determinar a possível resposta crítica para a estrutura ser avaliada.

De forma geral, os esforços seguintes poderiam ser componentes de carga a ser calculadas para serem levadas ao nível de módulo do casco para estudo:

- Os momentos de flexão e torção induzidos pelas ondas, bem como as forças cisalhantes (vertical e horizontal) ao longo do comprimento do navio, para determinar os esforços atuantes nas seções extremas do modelo estrutural.
- A pressão de onda externa para obter a distribuição ao longo do comprimento para as diferentes condições de carga em águas tranquilas e do navio em onda.
- Acelerações nos pontos de fronteira dos tanques de carga líquida ou de lastro (vertical transversal e longitudinal)
- Acelerações para diversas posições ao longo do comprimento do navio, para obter a distribuição ao longo do mesmo.

Considerando as características do navio em estudo e o escopo do trabalho, não serão consideradas acelerações diferentes às relacionadas com a gravidade na imposição dos esforços solicitantes nos Módulos do Casco.

3 PARTICIPAÇÃO ESTRUTURAL DA SUPERESTRUTURA

Termos como superestrutura ou casaria de convés³ são considerados como arranjos estruturais agregados ao casco. Por algum tempo, estes termos foram usados invariavelmente e, mesmo hoje, seu uso não está aceito universalmente. A identificação destes dois casos é importante, pois a forma como uma ou outra interage com o casco é diferente. O problema geral é entender como a distribuição dos esforços é afetada ou qual é a contribuição sobre os esforços quando o casco suporta uma superestrutura ou casaria de convés. Uma melhor avaliação da distribuição e contribuição dos esforços oriundos da superestrutura permite determinar os escantilhões adequados para um projeto estrutural.

Para Evans [8] e alguns outros autores, a superestrutura será entendida como a estrutura cujos lados são uma extensão das chapas do casco e estão no mesmo plano, como apreciado na Figura 3-1, contrariamente à casaria de convés que será aquela cujos lados não se encontram no mesmo plano das chapas de costado do casco. Portanto, a superestrutura será entendida (para o presente trabalho) como uma casaria de convés, cuja largura (b) será igual à boca do casco (B).

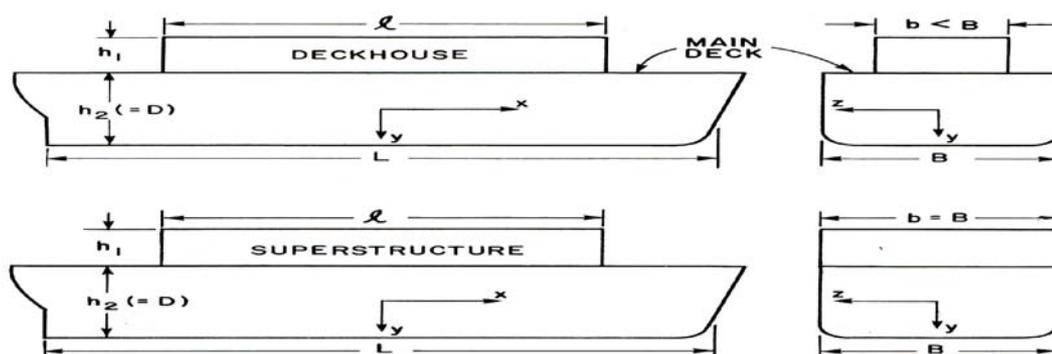


Figura 3-1 Diferença entre Superestrutura e casaria de Convés [6]

O processo de interação entre o casco do navio e uma superestrutura ou uma casaria de convés foi tema de estudo de muitos arquitetos navais [15], [19], [20],

³ O Instituto Pan-americano de Engenharia Naval (IPIN) fundado em 1956, no seu dicionário de termos navais para Inglês, Português e Espanhol, define o termo "Deckhouse" como Casaria do Convés em sua tradução ao Português. No entanto, este termo não é de uso comum entre engenheiros navais, sendo o termo superestrutura usado indiferentemente para se referir às duas estruturas.

para compreender como esta participa estruturalmente ante os diferentes esforços solicitantes que estão presentes no navio. Projetos mais antigos de navios incorporavam efeitos das acelerações por caturro e balanço, proteção ao clima e redução de peso para alturas elevadas para não comprometer a estabilidade. Na medida em que as casarias foram aumentando seu tamanho, considerações sobre sua participação nos esforços de flexão longitudinal tornaram-se importantes. Assim, o problema a tratar é a interação do casco com a casaria de convés, sob o ponto de vista da resposta estrutural primária do navio. Outros efeitos que têm relação no processo da resposta casco-casaria do convés são a flexão horizontal e transversal, a torção e efeitos dinâmicos e efeitos locais de instabilidades como a flambagem. Mas, para o presente estudo, a discussão será concentrada no comportamento estrutural primário.

3.1 Critérios de Projeto Iniciais

Segundo Evans [8], uns dos primeiros estudos estruturais levando em consideração a participação de uma superestrutura foi reportado em 1878 por Purvis [17]. A aproximação adotada considerava que a resistência de uma viga não era incrementada pelo aumento da sua altura se a área da secção transversal era mantida constante. Em seus trabalhos, ele considerava três possíveis rotas a seguir durante o projeto estrutural: superestrutura com resistência suficiente para suportar seu próprio carregamento, superestrutura considerada como independentemente do casco ou projetar o casco com resistência suficiente para suportar a casaria.

O primeiro estudo da influência das discontinuidades sobre a distribuição de esforços no navio foi realizado por Bruhn [14] e reconheceu a importância do comprimento, da largura e altura da superestrutura, sobre a distribuição dos esforços acima do convés principal. O comprimento da superestrutura determina diretamente a distribuição de tensões na sua secção central, sendo estas similares às tensões médias atingidas se os esforços forem uniformemente distribuídos na secção transversal como na flexão pura. Esta condição requer que o comprimento da superestrutura obedeça a relação:

$$l > 8\left(h_1 + \frac{b}{2}\right) \quad (3.1)$$

onde, l , h e b são definidos na Figura 3-1.

Estudo sobre os efeitos nos esforços longitudinais pela adição de material em variadas alturas acima da viga navio foi feito por Foster King, segundo Evans [8], mostrando a possibilidade de projetar uma casaria de convés para participar completamente dos esforços longitudinais do navio. Também foram discutidos temas como escantilhões leves e juntas de expansão para dar flexibilidade à casaria. Considerações sobre o projeto de uma casaria de convés tão leve e flexível que não contribua sobre os esforços longitudinais do navio ou de projetar outra que possua resistência suficiente para suportar as cargas de serviço sem dano, foram apresentados por Montgomerie [18].

A participação importante dos esforços cortantes na ligação do casco com a casaria do convés por juntas soldadas ou rebitadas foi, segundo Evans, tratada inicialmente por Hovgaard em 1930. Ele considerou a casaria como unida ao convés principal e forçada a seguir as deformações longitudinais do casco em tração e compressão gerando tensões de corte. Avaliou os esforços cortantes como nulos para a região média por simetria, com incremento destes em direção aos extremos da casaria. Considerou a avaliação dos esforços nas casarias como um conjugado gerado pela casaria estar unida a uma estrutura deformando longitudinalmente e pela flexão individual da casaria do convés, que em alguns graus é forçada a curvar juntamente com o casco.

No entanto, muitos dos fatores que influenciam o comportamento do casco do navio com as casarias de convés ainda não foram amplamente entendidos. Alguns fatores importantes devem ser levados em consideração dentro do conceito de aplicabilidade da teoria simples de vigas, tais como: rigidez do convés principal, efeitos das forças cortantes, geometria da casaria do convés, aberturas nos costados, efeitos tridimensionais e escorregamento ou movimento horizontal relativo entre o conjunto casco-casaria. Portanto, deve-se considerar como as tensões são transmitidas do casco para a casaria do convés. A flexão do casco gera neste uma curvatura e se considerar a casaria como não rigidamente unida ao casco, pode-se

considerar uma deflexão relativa entre casco e casaria. Mas considerando a casaria do convés unida ao casco, juntas tenderão a experimentar a mesma deformação com conseqüente geração de forças na união: forças verticais $N(x)$ nos costados da superestrutura para causar a mesma deflexão que no casco (ver Figura 3-2) e forças horizontais cortantes $S(x)$ por unidade de comprimento poderiam ser incrementadas causando a extensão da superestrutura.

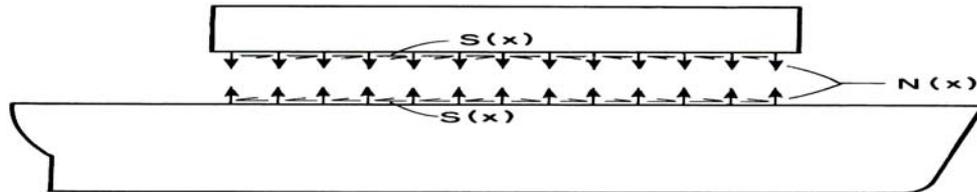


Figura 3-2 Geração de forças sobre a superestrutura [8]

3.2 Considerações sobre a Participação Estrutural

Diversos fatores devem ser considerados para avaliação de uma superestrutura usando a teoria de vigas simples, como foram citados anteriormente. Dentre tais fatores, rigidez do convés principal, os efeitos dos esforços cortantes e a geometria da casaria do convés serão detalhados a seguir.

Para entender o conceito de rigidez do convés principal $K(x)$, deve-se notar que, se avaliado pela teoria simples de vigas, as forças cortantes horizontais e verticais agindo através da junta de casco e casaria de convés, terá uma distribuição de tensões linear através de toda a secção na região média da casaria. No entanto, quando se avalia o comportamento como duas vigas simples agindo independentemente a distribuição de tensões pode não ser linear através de toda a secção apresentando uma descontinuidade ao nível do convés resistente.

Se for assumido que a presença de forças cortantes $S(x)$ é zero e só forças normais verticais $N(x)$ estão agindo sobre a estrutura, é adequado expressar $N(x)$ em termos da “rigidez vertical do convés principal” $K(x)$. A definição da rigidez vertical do convés principal ou rigidez base foi indicada por Bleich [20]: “ $K(x)$ é

definida como a força por unidade de comprimento da casaria do convés que é necessária para gerar uma deflexão relativa $\Delta y(x)$ (entre casco e casaria, ver Figura 3-3) igual a uma unidade de comprimento.”

$$N(x) = K(x)\Delta y(x) \quad (3.2)$$

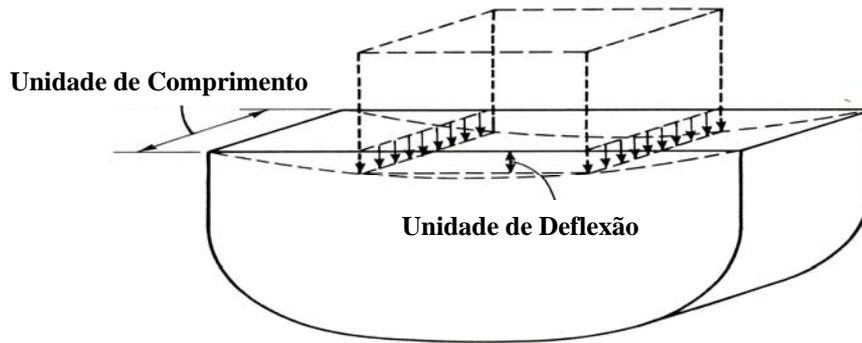


Figura 3-3 Conceito do módulo de rigidez $K(x)$ [8]

Portanto, se $N(x)$ é zero pode se considerar o convés com pouca rigidez e, por isso, não transmite cargas. Desta forma, o deslocamento relativo pode assumir qualquer valor. Se o valor de $K(x)$ for muito grande (∞), o convés será muito rígido, gerando uma curvatura no convés igual ao eixo neutro e sem transmissão de cortantes na junção com o casco. Isto geraria uma distribuição de tensões como representada na Figura 3-4.

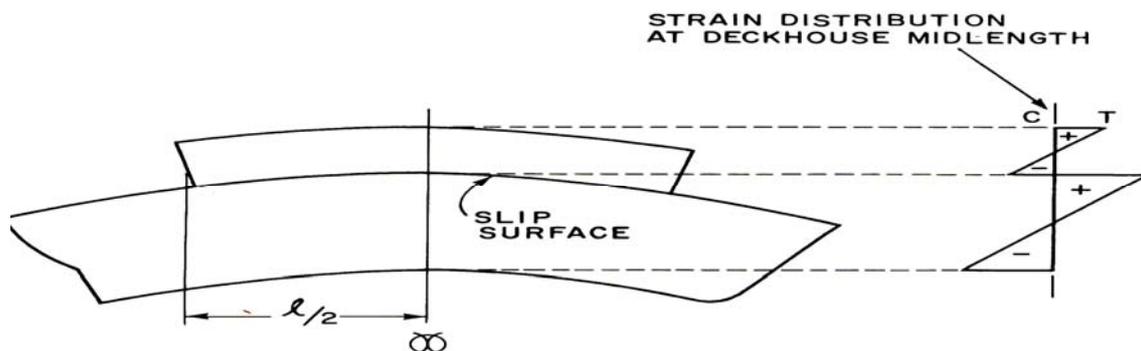


Figura 3-4 Idealização do comportamento casco-casaria com transmissão de cortante zero [8]

Igualmente é possível apreciar uma distribuição linear na região média com transmissão de forças verticais e cortantes através de toda a secção como na Figura 3-5. Nos casos mais reais pode ser mais comum apreciar um comportamento não colinear em toda a secção como na Figura 3-6.

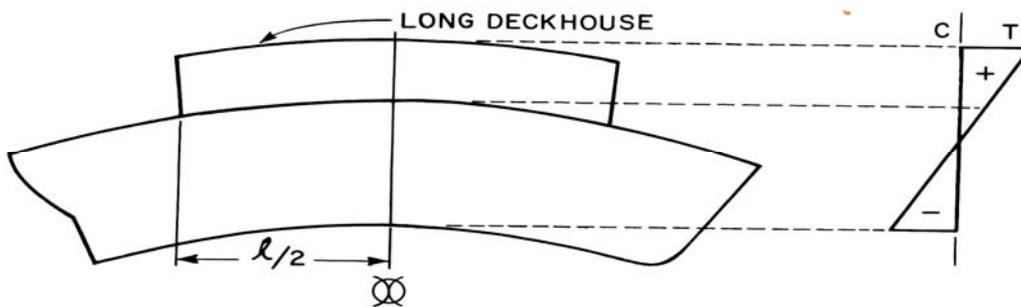


Figura 3-5 Idealização do comportamento casco-casaria como uma viga simples [8]

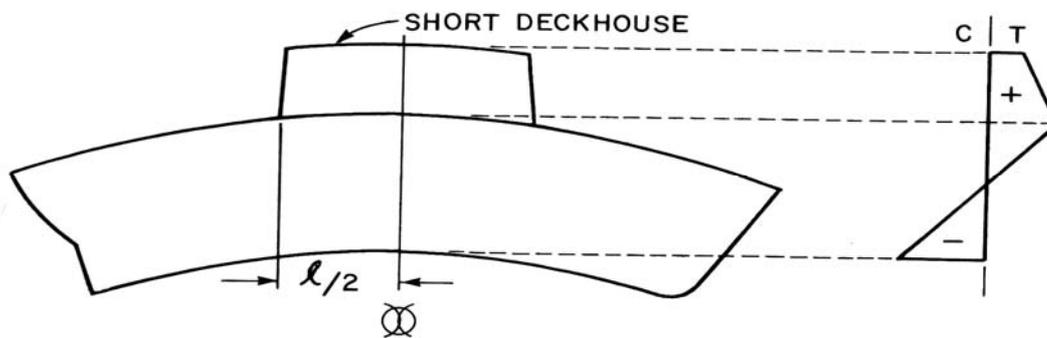


Figura 3-6 Comportamento casco casaria com distribuição não linear [8]

Assumindo que todos os suportes verticais sejam fornecidos por estruturas concentradas em estações de cavernas específicas e considerando o convés com flexibilidade finita, é possível estimar a deflexão gerada por uma unidade de carga concentrada em cada uma dessas estruturas isoladas. Adicionalmente se em cada estação essas deflexões forem iguais e o espaçamento entre esses pontos for igual ao comprimento da casaria, por conseqüência, a estimativa do módulo de rigidez $K(x)$ aplicaria de forma ideal (assumidos da teoria de Bleich). Na realidade, esta hipótese não é totalmente correta, considerando que o espaçamento e a rigidez de anteparas estruturais principais variam para alguns navios. Em termos gerais, este valor pode ser influenciado por inúmeros fatores de natureza local, arranjos estruturais do convés e suas estruturas de suporte como cavernas, cavernas gigantes e anteparas. Na metade de anteparas transversais de grande rigidez, $K(x)$, pode atingir valores infinitos, enquanto que afastado deles valores finitos. Esta ampla variação torna o conceito e uso de $K(x)$ complexo e sua utilidade pode ser discutida.

A teoria simples de vigas resulta em uma distribuição de tensões flexionais linear quando as deformações por cortantes são nulas. Entretanto, a distribuição real de tensões flexionais atuantes sobre o conjunto casco-casaria do convés é distorcida conforme ilustrado na Figura 3-7 devido ao efeito dos esforços cortantes. Tal distorção pode ser particularmente importante na avaliação estrutural da casaria do convés.

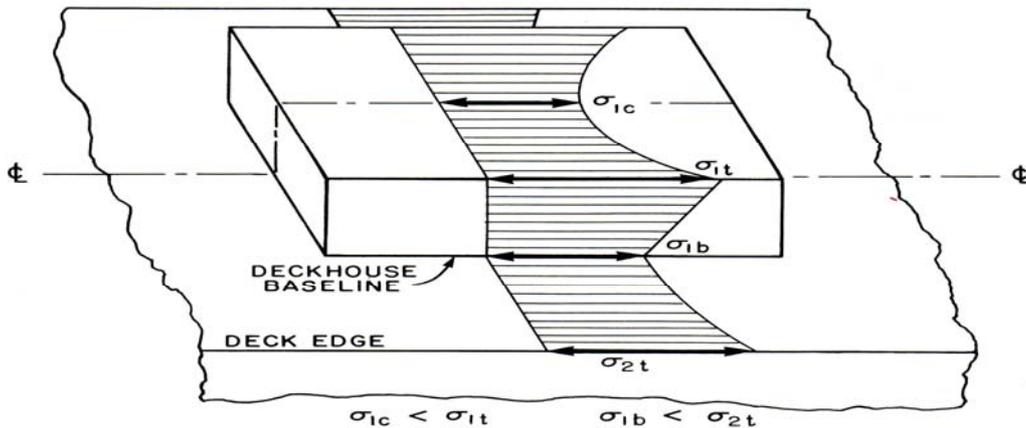


Figura 3-7 Efeito de Shear lag presente numa casaria de convés [8]

Devido ao incremento das tensões de corte à proa e à popa, nos extremos das casarias de convés, os esforços pela flexão serão menores que aqueles valores calculados pela teoria simples de vigas. Em casarias de convés os “efeitos dos extremos” geralmente estão altamente localizados e afastando-se dos extremos, os esforços tendem a seguir a teoria simples de vigas. Em função do comprimento da superestrutura, quando esta é curta, a influência dos extremos livres sobre a distribuição de esforços de flexão pode afetar grande parte do comprimento da superestrutura, ocorrendo uma diminuição dos esforços ainda maior no centro do comprimento. No caso oposto, com superestruturas compridas, estes efeitos podem ser desprezados no centro e para alguma distância nos costados, mas importantes nos extremos.

Concluindo, para considerar a contribuição total da casaria de convés à resistência longitudinal, esta deverá ser tão comprida quanto possível e sua largura próxima ou igual à boca do navio. Nesse contexto, diversos autores têm expressado

o conceito de eficiência ou efetividade da casaria do convés para medir sua contribuição nos esforços longitudinais, que será estudado a seguir.

3.3 Determinação das Tensões e Eficiência da Superestrutura

O estudo da interação entre casco e casaria de convés envolve duas aproximações: a teoria de vigas, como uma aplicação direta da resistência dos materiais e a teoria de esforços planos, como uma aplicação da teoria de elasticidade. Dentro da teoria de vigas simples, o comportamento do conjunto casco-casaria de convés é analisado por meio de duas vigas individuais em termos de esforços resultantes, momentos fletores, forças cortantes e forças verticais. Por outro lado, a teoria de esforços planos, considera o conjunto do navio construído com elementos de parede delgada unidos entre si ante tensões planas agentes, determinando assim os esforços por meio das equações fundamentais da teoria de elasticidade.

Quando se considera a primeira metodologia, a teoria de vigas simples é aplicada separadamente para casco e casaria de convés, desprezando efeitos do “Shear Lag” e requer a determinação do módulo de rigidez do convés $K(x)$. Cada viga interpretada repousa sobre uma base elástica e submetida a cargas externas distribuídas. As diferentes dimensões são representadas na Figura 3-8 e subscritas com índice de “1” para a casaria do convés e “2” para o casco juntamente.

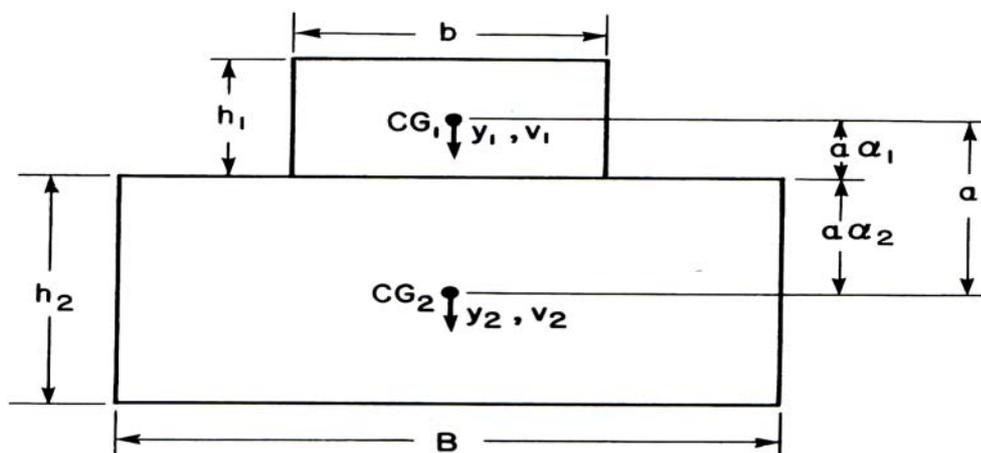


Figura 3-8 Dimensionamento na teoria de duas vigas. Interação de casco-casaria de convés [8]

Bleich's [20] assumiu uma distribuição de tensões não linear e ações parcialmente independentes juntamente com a hipótese de que a casaria poderia flexionar com alguma diferença do casco principal. Dessa maneira, a casaria vai ser afetada por forças de corte longitudinal presentes na parte superior do convés do casco, assim como cargas verticais dos suportes embaixo da casaria, estabelecendo o equilíbrio. Uma avaliação para determinar os esforços foi apresentada por Bleich's, estabelecendo duas condições de carregamento, "A" e "B". Assim mesmo, considera as propriedades geométricas da casaria do convés e do casco constantes no comprimento da casaria do convés " l ", sendo esta simétrica e localizada na seção central do navio. Bleich's avalia o módulo de rigidez $K(x)$ como a média da rigidez presente no convés resistente e faz deste um valor constante. Logo, os esforços avaliados em qualquer ponto da seção transversal para a seção média sob maiores momentos fletores, segundo o estabelecido por Bleich's, são determinados por

$$\sigma = \sigma_N + \phi \Delta \sigma \quad (3.3)$$

Onde,

σ_N = Esforço estimado em teoria de vigas, a interação entre o casco e a casaria do convés.

$$\sigma_N = \frac{My}{I} \quad (3.4)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_A \quad (3.5)$$

$$I_A = \frac{a^2 \rho_1 A_1 A_2}{A_2 + \rho A_1} \quad (3.6)$$

$$\rho_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.7)$$

ϕ = "Fator de desvio" que leva em consideração a rigidez vertical $K(x)$ dos suportes da casaria e propriedades geométricas de casco e casaria. Sua determinação é determinada por dois parâmetros não dimensionais e apresentado na Figura 3-9.

$$\mu = \frac{I_1 + \alpha_1 I_A}{I_2 + \alpha_2 I_A} \quad (3.8)$$

$$u = \left(\frac{k}{4E} \frac{1 + \mu}{\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2} \right)^{1/4} \frac{l}{2} \quad (3.9)$$

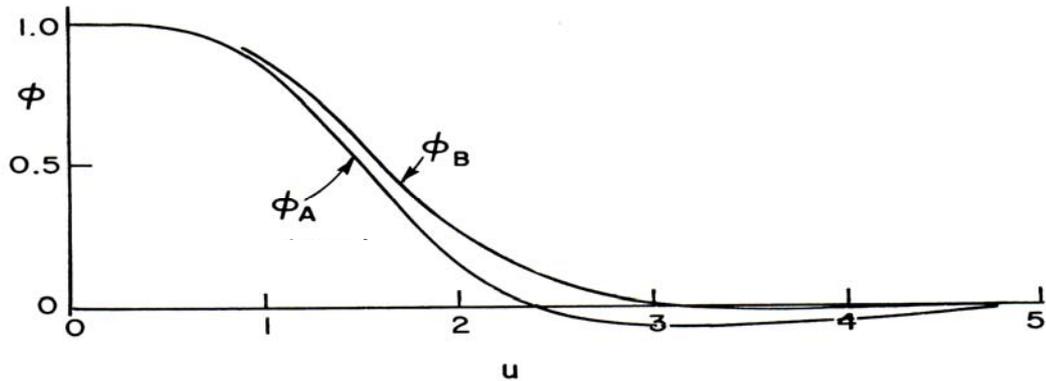


Figura 3-9 Determinação gráfica dos valores de ϕ

$\Delta\sigma$ = Correção dos esforços se a rigidez vertical dos suportes da casaria for desprezada.

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\mu M}{(1 + \mu)(\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2)} \left[\frac{I_A}{a A_2} (\alpha_1 - \mu \alpha_2) - y_1 \right] \quad (3.10)$$

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\mu M}{(1 + \mu)(\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2)} \left[\frac{I_A}{a A_2} (\alpha_1 - \mu \alpha_2) - \mu y_2 \right] \quad (3.11)$$

As duas condições de carregamento consideradas por Bleich podem ser combinadas afim de obter resultados para alguma distribuição de carregamento particular, usando a superposição da distribuição dos momentos fletores total, conforme ilustrado na Figura 3-10.

$$M_A = \frac{M_C + M_D}{2} \quad (3.12)$$

$$M_B = M_{SM} - M_A \quad (3.13)$$

Onde M_{SM} é o Momento avaliado na Secção Media

Para isto, será considerado que o esforço total para a região na metade do navio é dado por

$$\sigma_{SM} = \sigma_A + \sigma_B \quad (3.14)$$

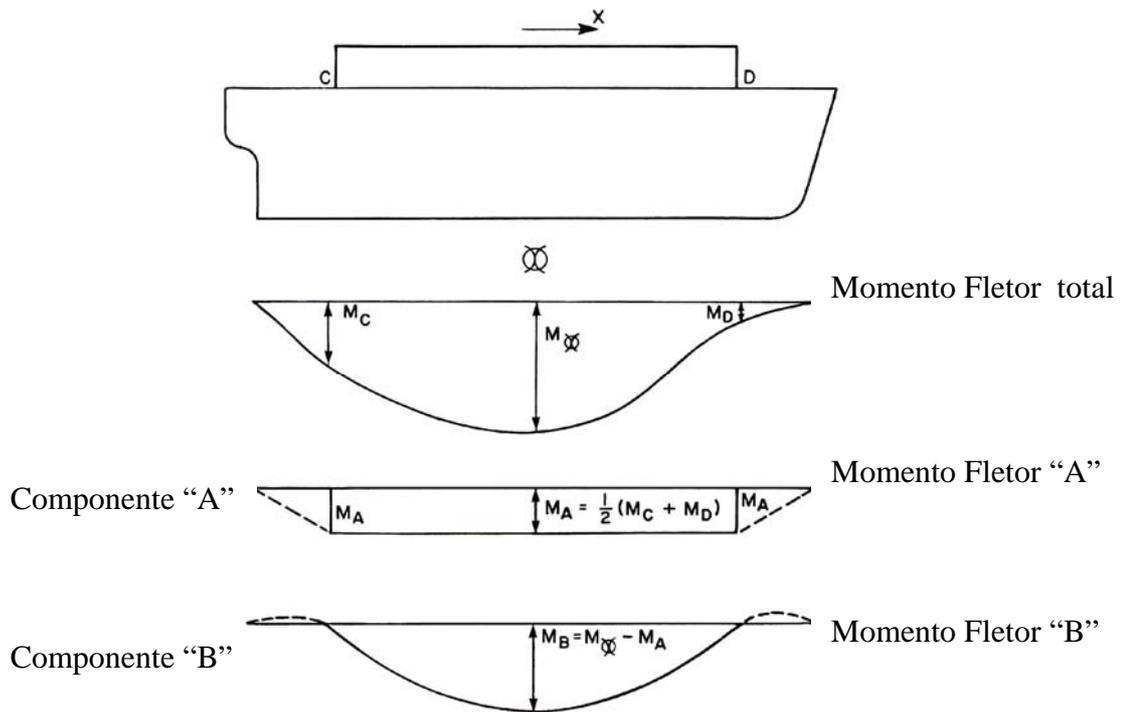


Figura 3-10 Componentes do critério de Bleich para superposição dos momentos fletores [8]

De acordo com o exposto, a casaria de convés pode experimentar esforços muito menores que aquele estimado pela teoria de flexão simples. Efeitos de rigidez do convés e os efeitos dos extremos das casarias podem estar presentes, influenciando significativamente a distribuição de esforços. Portanto, deve-se aplicar o conceito de eficiência da superestrutura. Este tema tem sido desenvolvido por alguns pesquisadores e sua interpretação pode resultar em distintas definições e alternativas para medir o nível de participação da mesma nos esforços da estrutura do navio. Entretanto, para o presente trabalho esta será definida como "a influência que representa para os esforços no convés resistente à presença de uma casaria de convés ou superestrutura".

Alguns autores apresentam propostas para medir a eficiência de uma superestrutura. Evans [8] cita diversas propostas formuladas, que têm interesse na medida da eficiência quando avaliada a viga navio ante sua resposta às solicitações primárias. Vasta apud Evans [8] caracterizou o comportamento da casaria determinando sua eficiência como a diferença entre os esforços de tensão calculados no convés resistente sem participação da casaria de convés (σ_0) e os esforços reais avaliados no mesmo ponto com participação da superestrutura ($\bar{\sigma}$).

Portanto, a eficiência como uma redução nos esforços primários está expressa da seguinte forma:

$$\eta = 100 \left(1 - \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} \right) \quad (3.15)$$

Caldwell apud Evans [8] definiu a eficiência pela extensão na qual o comprimento da casaria do convés alivia as tensões longitudinais no convés superior. Considerando o esforço no convés mais alto (σ_{sup}), considerando uma casaria de convés totalmente efetiva.

$$\eta = \frac{\sigma_0 - \bar{\sigma}}{\sigma_0 - \sigma_{\text{sup}}} \quad (3.16)$$

Terazawa apud Evans [8] expressa uma possível definição para a eficiência da casaria do convés como:

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{sup}}}{\sigma} \quad (3.17)$$

Conjuntamente a resistência do convés superior da casaria do convés estará em relação a uma medida de eficiência expressa como:

$$\eta = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} \quad (3.18)$$

Onde $\bar{\sigma}$ é a tensão longitudinal presente na parte superior da superestrutura.

Uma avaliação dos diferentes esforços presentes na estrutura do navio Nodriz em estudo é feita considerando o critério de Bleich, utilizando o conceito de teoria simples de vigas. A análise, considerações e resultados são apresentados no Apêndice I. As diferentes eficiências obtidas da aplicação dos critérios anteriormente expostos são mostrados na Figura 3-11.

Embora os critérios usados para avaliação produzam resultados com uma ampla variação, considera-se de forma geral a superestrutura como participando eficientemente nos esforços longitudinais. Isto será discutido em maior detalhe no Apêndice I.

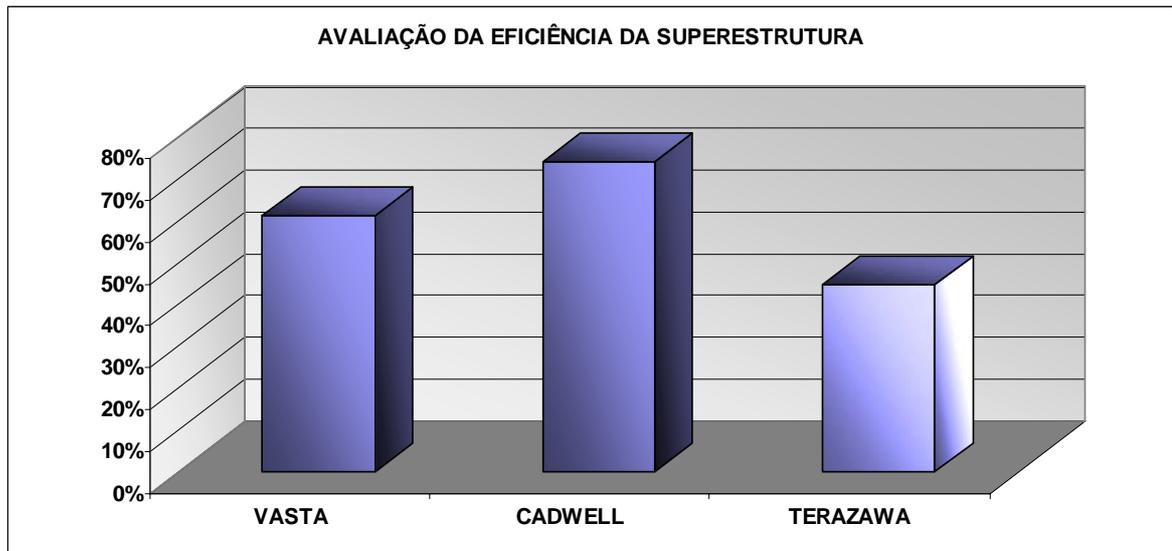


Figura 3-11 Avaliação da eficiência de participação da superestrutura

Finalmente a Figura 3-12 a seguir apresenta a eficiência da superestrutura em função do seu comprimento (como uma porcentagem do comprimento do navio) fornecida por Muckle, W. no seu estudo da influência de superestruturas parciais construídas de ligas de alumínio de 1955, que é citada por Evans [8].

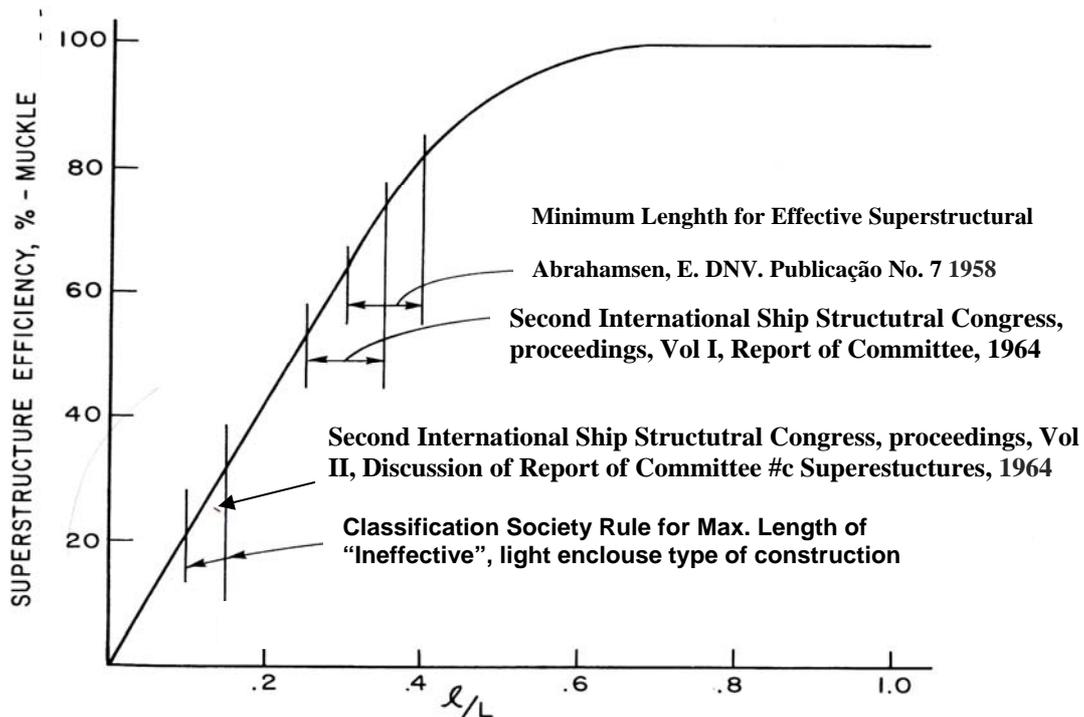


Figura 3-12 Mínimo comprimento para efetividade da superestrutura, Muckle [8]

4 ARRANJO ESTRUTURAL DO NAVIO CLASSE NODRIZA TERCEIRA GERAÇÃO

4.1 Descrição geral

O navio classe Nodriza é uma embarcação militar com capacidade para efetuar operações de controle e combate em rios, incluindo as seguintes características adicionais: i) armazenamento de suprimentos; ii) facilidades para reabastecimento; iii) reparo e auxílio na manutenção das unidades menores; iv) capacidade para pouso, reabastecimento e decolagem de helicópteros classe Bell 212; v) capacidade de navegação em águas restritas com pouca profundidade; vi) efetuar percursos e permanência em águas abrigadas costeiras e deslocamentos transitórios em águas profundas.

As características principais do navio Nodriza e capacidades são apresentadas a seguir:

Comprimento:	39,26 m
Boca:	9,50 m
Calado:	1,00 m
Pontal:	3,10 m
Deslocamento máximo:	275,00 Tons
Velocidade máxima:	9,00 Nós

Capacidades

Diesel:	32562 litros
Gasolina:	21123 litros
Jet A-1	7571 litros
Água	22296 litros
Propulsão:	02 Detroit Diesel Series 60 400 BHP a 1800 RPM com Sistema "hidrojato"

4.2 Arranjo estrutural

O navio Nodriza possui um arranjo estrutural longitudinal que está definido em função do menor vão existente entre os elementos de reforço mais repetitivos. O navio possui 39 balizas numeradas (ver Figura 4-2) de popa a proa e a maioria dos perfis estruturais são padronizados. O material para o chapeamento, convés, casco e anteparas é aço ASTM A 131 Gr A. Os reforços longitudinais e transversais constam de elementos estruturais primários classe “T” constituindo as sicordas nos convés e como elementos secundários longitudinais um arranjo de perfis classe “HP” 80 mm X 6 mm constituindo os enrijecedores do chapeamento em geral.

A estrutura transversal do convés na região central do navio contém duas (02) sicordas, uma para cada bordo a 2400 mm da linha central constituindo um vão entre elas de 4800 mm. Estas sicordas podem ser consideradas apoiadas nas anteparas transversais com um vão máximo de 8400 mm entre elas. Porém, considerações subseqüentes relativas à influência da resistência transversal dos anéis e sua interação com as sicordas permitirão avaliar a contribuição destes anéis como pontos de apoio. Da mesma forma, enrijecedores longitudinais do chapeamento encontram apoio nas cavernas.

Os anéis estruturais (ver Figura 4-1) constituídos por hastilhas, vaus transversais e cavernas possuem arranjo e escantilhões constantes em todo o comprimento do navio, com um vão entre anéis estruturais transversais de 1200 mm para a região central e uma redução para 900 mm e 850 mm nas regiões de proa e popa respectivamente. Não existem cavernas gigantes e os módulos seccionais dos perfis das cavernas, vaus e sicordas são iguais. Portanto, doravante será dada especial atenção sobre a avaliação estrutural destes membros, considerando o processo de transmissão de carregamento entre eles. A seguir, apresenta-se o arranjo estrutural dos diferentes componentes de avaliação da região central do navio.

Estrutura do Costado

Chapeamento do costado: Chapa 6.35 mm (1/4")

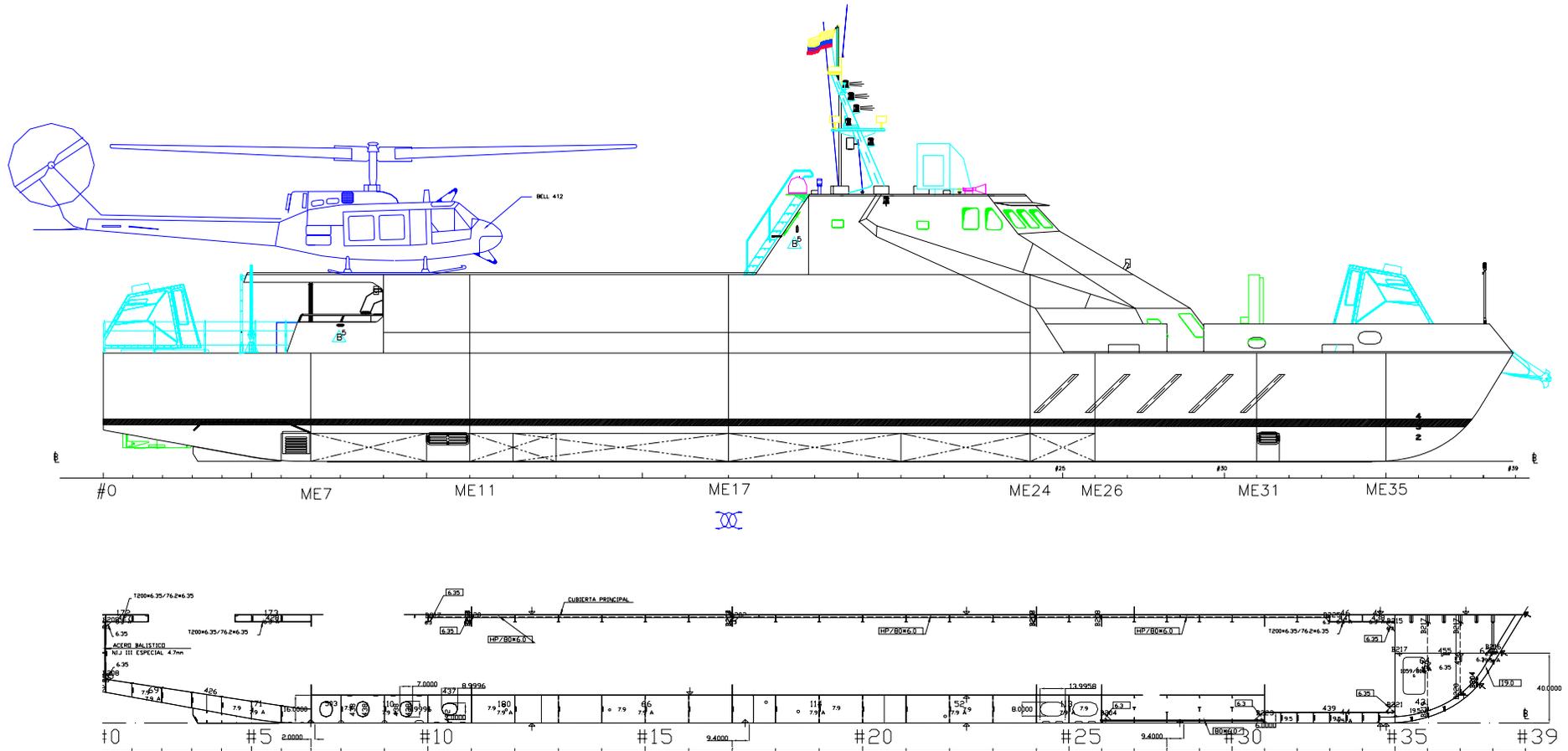


Figura 4-2 Vista de perfil geral e vista estrutural na linha central

Reforços:

Arranjo longitudinal conformado por perfis classe bulbo HP 80 X 6 e cavernas em forma de "T" de 200 mm X 6,35mm / 76,2mm X 6,35mm.

Separação entre cavernas de 1200 mm.

Duas escoas a proa entre cavernas 26 e 37 em forma de "T" de 200x6,35/76,2x6,35 mm

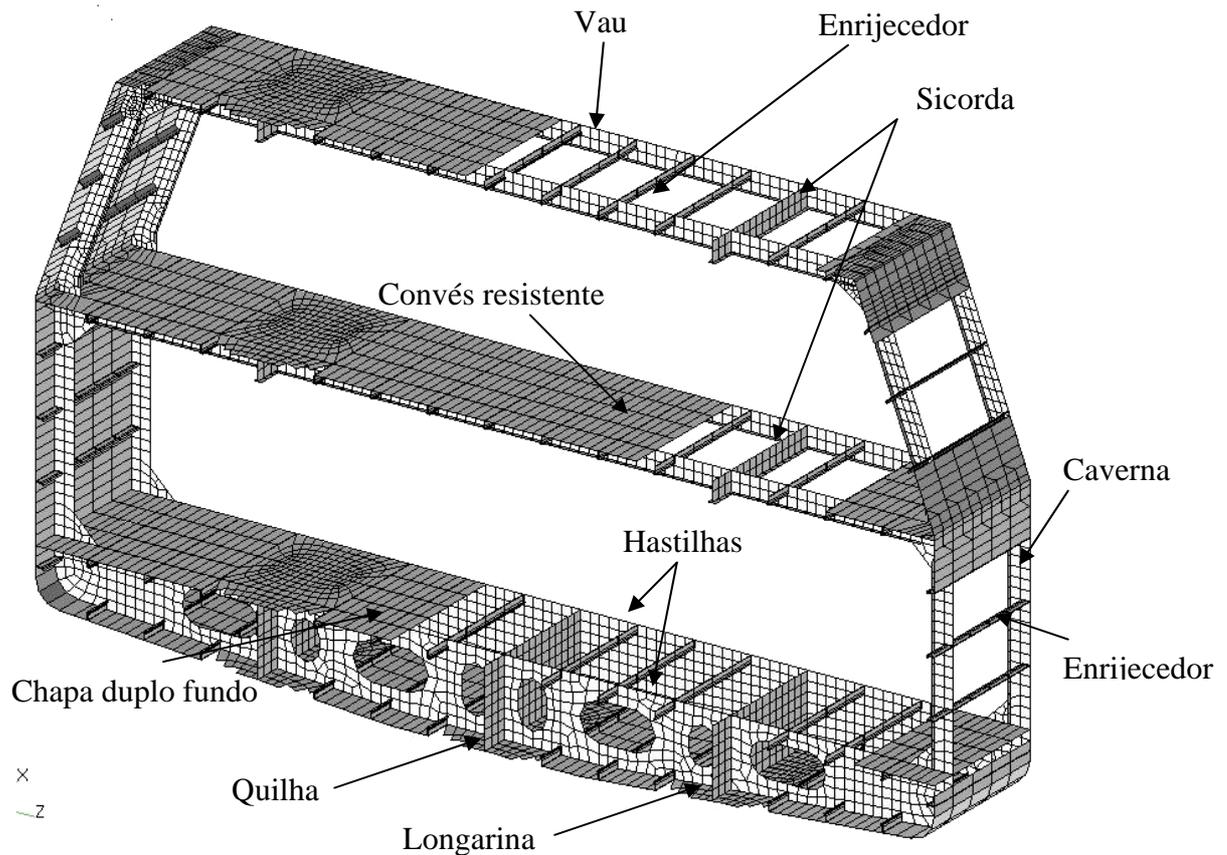


Figura 4-3 Ilustração dos componentes estruturais participantes na região central do navio Nodriza

Estrutura do Fundo

Chapeamento do fundo: Chapa 6.35 mm (1/4")

Chapa quilha: Chapa 8,00 mm

Chapa quilha praças máquinas: Chapa 9,50 mm

Reforços: Quilha central vertical e longarina de 800 mm X 8,00 mm para cada bordo a 2400 mm da linha central.

Arranjo longitudinal composto por perfis classe bulbo HP 80 X 6 com separação de 600 mm
 Hastilhas sólidas de 6,35 mm de espessura com espaçamento de 1200 mm, mudando na proa para 900 mm e na popa a 850 mm

Duplo Fundo

Chapeamento duplo fundo: Chapa 6.35 mm (1/4")
 Reforços: Arranjo longitudinal conformado por perfis classe bulbo HP 80 X 6.

O duplo fundo está a uma altura de 800 mm sobre a linha de base e estende-se entre as balizas 11 e 24. Portas de visita estanques estão presentes para acesso a tanques de combustíveis (diesel, gasolina e Jet-A1) e para acesso a tanques de água doce e águas servidas.

Convés principal

Chapeamento do convés: Chapa 6.35 mm (1/4")
 Reforços: Uma sicorda em "T" de 200 mm x 6,35mm / 75 mm x 6,35 mm localizada a 2400 mm da linha central em cada bordo.
 Arranjo longitudinal formado por perfis classe bulbo HP 80X6 com separação de 600 mm
 Estrutura mista nas regiões de popa e proa.

Uma escotilha estanque de fechamento rápido de 600 mm x 600 mm para acesso ao pique de proa.

Uma escotilha estanque de fechamento rápido de 800 mm x 800 para acesso ao armazém do contra mestre.

Quatro tampas parafusadas estão instaladas na popa para o acesso ao sistema Schottel, motores propulsores e geradores.

Convés 01

Chapeamento do convés 01: Chapa 6.35 mm (1/4")

Reforços:

Chapa 9,50 mm (área de pouso)

Uma sicorda em "T" de 200 mm x 6,35mm / 75 mm x 6,35 mm localizada a 2400 mm da linha central em cada bordo.

Arranjo longitudinal composto por perfis classe bulbo HP 80 X 6 com separação de 600 mm

Arranjo longitudinal formado por perfis classe bulbo HP 100 X 6 com separação de 600 mm (área de pouso).

Vaus em "T" de 200 mm x 6,35mm / 75 mm x 6,35 mm

O convés de vôo é localizado a popa da antepara 17 (localizada próxima a secção média do navio, ver *Figura 4-2*) e é reforçado para suportar as cargas de um helicóptero classe Bell 412 cuja massa estabelecida em condição de carga plena é 6,804 toneladas. Uma escotilha de fechamento rápido de 600 mm x 600 mm, com braçola de 300 mm, aço ABS Gr A, para acesso ao equipamento de provisionamento do helicóptero

Convés 02

Chapeamento do convés 02: Chapa 6.35 mm (1/4")

Reforços: Arranjo longitudinal formado por perfis classe bulbo HP 80 X 6 com separação de 600 mm

Vaus em "T" de 200 mm x 6,35mm / 75 mm x 6,35 mm.

Este é o convés que estabelece o limite superior da ponte e deve suportar uma arma automatizada de 1,5 toneladas

Anéis Estruturais

Os anéis estruturais constituindo a estrutura principal do navio estão espaçados na região central do navio a 1200 mm formados por cavernas, vaus e hastilhas, da seguinte forma:

Vaus: "T" 200 mm x 6,35mm / 76,2 mm x 6,35mm

Cavernas: "T" 200 mmx 6,35mm / 76,2 mm x 6,35mm
 Hastilhas: Chapas de 800 mm X 6,35 mm

Não existem anéis gigantes que suportam as sicordas, assim como os perfis constituindo os vaus e cavernas, as sicordas (longitudinais) possuem as mesmas características seccionais.

Anteparas estruturais

O navio possui sete (07) anteparas estanques com espessura de 6,35 mm, localizados nas balizas No. 7, 11, 17, 24, 26, 31 e 35.

Reforços: Arranjo vertical formado por perfis classe bulbo HP 80 X 6 com separação de 600 mm

Pontal

Dois pontais estão instalados no convés principal na linha das sicordas e a antepara estanque No. 7 e cujo propósito é transmitir as cargas do convés de vôo para a antepara. Construídos em tubulação de diâmetro nominal de três polegadas (3") de escala 80 ASTM A53 [26].

Estrutura do costado da superestrutura e ponte (Material balístico)

Chapeamento do costado: Chapa 4,70 mm de aço NIJ Nível III especial, testado sob norma NIJ STD0108.01 [27]

Reforços: Arranjo longitudinal formado por perfis classe bulbo HP 80 X 6 e cavernas em forma de "T" de 200 mm X 6,35mm / 76,2mm X 6,35mm. (ASTM A36) [28]
 Vão entre cavernas de 1200 mm.

5 AVALIAÇÃO CONVENCIONAL DA RESISTÊNCIA LONGITUDINAL DO NAVIO NODRIZA GERAÇÃO III

O Navio Militar Nodriza abordado neste estudo corresponde a uma terceira geração de desenvolvimentos sobre um casco, cuja estrutura foi avaliada pelas Regras da Sociedade Classificadora Bureau Veritas 1996 para navegação em águas abrigadas de navios de menos de 65 metros em comprimento [29]. Este capítulo apresenta os resultados da determinação dos escantilhões mínimos constituintes da secção mestra para o Navio Nodriza de Terceira Geração, baseada nas exigências das Regras de Sociedades. Além disso, uma estimativa dos módulos seccionais requeridos dos elementos estruturais constitutivos da secção mestra, fundamentada na aplicação de métodos racionais (Teoria Simples de Vigas) é elaborada com o intento de estabelecer diferentes critérios de comparação dos valores requeridos por estas Sociedades Classificadoras. Tais análises permitirão avaliar a adequabilidade estrutural do Navio Nodriza para sua nova condição de operação.

As Sociedades Classificadoras usadas são: Bureau Veritas para Navios Menores de 65 metros de comprimento [29] e a Nippon Kaiji Kiokay para Navios de Aço menores de 90 metros de comprimento para navegação em águas não restritas [30]. Os resultados obtidos das avaliações feitas por elas juntamente com os resultados do método racional servirão de base para uma análise comparativa do Módulo do Casco, que será desenvolvida no Capítulo 6 do presente trabalho. É importante destacar que para o desenvolvimento da avaliação convencional da resistência longitudinal pelas citadas regras, estas apresentam considerações especiais em relação as formas, proporções e áreas de navegação, que indicam implementar requerimentos usados para navios entre 65 e 90 metros de comprimento, como é o caso da norma Bureau Veritas.

5.1 Antecedentes

O surgimento das sociedades classificadoras remonta a datas anteriores à construção de navios de aço, sendo a mais antiga segundo Muckle [15] a Lloyd's

Register of Shipping, fundada em 1760. Atualmente existe um grande número de regras de sociedades classificadoras em diferentes países com representação mundial. Para citar algumas, temos a sociedade japonesa, Nippon Kaiji Kiokay (NKK), a sociedade norueguesa, Det Norske Veritas (DNV), a americana, American Bureau of Shipping (ABS), e a francesa, Bureau Veritas (BV).

As sociedades classificadoras possuem extensivas regras para determinar os escantilhões das diferentes partes estruturais em um navio, que tem base na experiência fundamentada em muitos anos com navios no mar, em processos continuados de pesquisa. Juntamente com a teoria estrutural, estas regras permitem uma avaliação estrutural segura, que continuamente é ajustada e complementada com base nas experiências e nos novos desenvolvimentos na construção naval. As regras das Sociedades Classificadoras definem os escantilhões mínimos da secção mestra como constantes ao longo de aproximadamente quarenta por cento do comprimento do navio, que são determinantes para a estimar o peso do casco ou para uma aproximação preliminar das especificações do material.

Segundo Ventura, Gordo e Soares [33], a metodologia usada pelas Sociedades Classificadoras até meados dos anos oitenta baseava-se no cálculo do módulo resistente da secção mestra por análise elástica e permitia obter um valor que deveria exceder a referência denominada como mínimo módulo de secção. Posteriormente, o cálculo do módulo resistente incorporou o conceito de largura efetiva da chapa associada aos perfis (Faulkner [34]), representando uma redução significativa na estimativa do módulo resistente. No entanto, existem muitas incertezas na estimativa da resistência longitudinal, razão pela qual há tendência crescente na utilização do método dos elementos finitos (MEF). Considerações modernas das sociedades classificadoras concentram a atenção sobre os cálculos da resistência longitudinal baseados em condições de carregamento. Isto motivado pelo contínuo desenvolvimento de novas e maiores construções.

5.2 Sociedade Classificadora Bureau Veritas

Para efetuar o cálculo dos escantilhões pela presente sociedade classificadora foi usada a norma BV 1996 I-1-034 [29]. Dadas as características do

navio em estudo, foi referenciada a Parte II, Capítulo 6 da norma para navios menores de 65 metros de comprimento, que estabelece os escantilhões para os membros primários e secundários de cada sistema de construção longitudinal ou transversal em uma região avaliada dentro de quarenta por cento do comprimento na região central.

Em geral, a resistência longitudinal para navios menores que 65 metros (comprimento) não apresenta grande relevância para a Sociedade Classificadora. No entanto, considerações adicionais (BV 6-35) [29] com relação aos momentos verticais por onda, devem ser avaliadas e são citadas nesta regra do Bureau Veritas para navios de formas especiais e com notação de navegação em áreas fluviais e de águas profundas. Basicamente, é critério da sociedade sua aplicação ou não, após revisão. Neste sentido, não são exigidas considerações de avaliação com relação a momentos horizontais ou de torção presentes na estrutura para navios de comprimento menor a 65 metros.

O convés resistente para esta regra é definido como o convés completo e contínuo mais alto ou o convés mais alto da superestrutura, que contribui com a resistência longitudinal, se existir. Todos os membros longitudinais abaixo do convés resistente serão levados em consideração nos cálculos do momento de inércia da secção. A definição da superestrutura para esta regra é interpretada como a estrutura anexada ao convés de borda livre, cujas chapas de costado se estendem de um costado para o outro, sem que estas se encontrem dentro do bordo mais de 0,04 vezes a boca do casco. Casaria do convés será aquela que não cumpre o anterior e, portanto, não considerada dentro da avaliação da resistência longitudinal. Cabe destacar que a largura do convés da superestrutura finaliza dentro do bordo 0,09 vezes considerando que as chapas de costado da superestrutura não estão no mesmo plano das chapas do casco.

As cargas a serem usadas para avaliação dos escantilhões são estabelecidas em função de alturas de colunas de água ou do carregamento específico e avaliadas nas partes inferiores do elemento em estudo, assim como na região central do vão. Diferentes condições de cargas são adotadas para determinar os módulos seccionais dos componentes do navio, considerando o valor mais crítico de carga

entre as possíveis opções. De forma geral, a espessura das chapas é determinada pelo maior valor calculado dentro dos seguintes critérios de avaliação: mínima espessura exigida pela regra de acordo com o elemento estrutural, critérios de pressão lateral ou de provas de tanques e considerações especiais para cargas concentradas. Igualmente, o conceito básico para os reforços secundários é a estimativa do maior módulo seccional sob pressão lateral, provas de tanques e/ou cargas concentradas. Requerimentos mínimos para almas e flanges são exigidos pela norma para cada reforço presente, considerando ainda a classe de conexões nos extremos. A chapa efetiva para a norma é avaliada de acordo com a classe de união do membro nos extremos e em função dos vãos longitudinais e transversais. Os requerimentos da norma estão baseados para materiais usados na construção de navios com resistência mínima garantida de 235 N/mm².

Para estas regras existem duas classes de arranjos estruturais, longitudinal e/ou transversal, que são definidos pelo menor espaçamento dos reforços paralelos contínuos repetitivos. Os navios são construídos com um sistema de cavernamento longitudinal ou transversal ou uma combinação dos dois. No entanto, a regra define que estruturas complexas devem ser calculadas por métodos diretos e aprovados pela mesma sociedade (como é o caso do navio em estudo). Os reforços secundários são definidos como suportados por vigas definidas como membros primários, que incluem: hastilhas, quilhas, longarinas, sicordas, cavernas gigantes, vaus de convés e almas verticais e reforços horizontais sobre anteparas.

Foi realizada a avaliação de todos os critérios estruturais da regra para a região central do navio, calculando os escantilhões para as três condições de navegação possíveis, dentro dos interesses do presente trabalho. Considerando a extensão dos cálculos realizados (ver Apêndice II), a seguir se apresenta na Tabela 2 o resumo contendo os resultados dos elementos principais participantes dentro do módulo do casco, que será posteriormente analisado. Dentro desta avaliação e em função do critério estabelecido pela norma, o arranjo na secção central do navio Nodriza é longitudinal. No entanto, este arranjo (para a norma) considera a presença de anéis gigantes de maior módulo seccional que brindem suporte às sicordas, para que de igual forma as sicordas se constituam como um apoio dos vaus transversais. Um inconveniente observado é que os anéis transversais instalados no navio são

homogêneos em todo o comprimento (com igual módulo seccional que as sicordas) e com um espaçamento superior aos critérios exigidos para o cavernamento transversal. Portanto, neste sentido não fica claro a avaliação das sicordas e dos vaus transversais constituindo o arranjo do navio Nodriza.

Tabela 2 Cálculo pela BV dos módulos seccionais de elementos participantes na resistência longitudinal para navio Nodriza em estudo.

Mínimos Exigidos	MÓDULOS SECCIONAIS			
	Condição de navegação	Águas profundas	Costeira	Fluvial
Elementos longitudinais	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³
Quilha Central (Fundo)	3353,01	3017,71	2850,05	
Longitudinal de fundo	16,03	14,24	13,62	
Longitudinal Leve do Costado	16,03	14,24	13,62	
Longitudinal leve do Duplo Fundo	13,50	12,15	11,47	
Sicordas convés resistente (assumido engaste nas anteparas)	2370,82	2133,73	2015,19	
Longitudinal leve do Convés	6,97	6,27	5,92	
Sicordas assumida apoiada nos vaus	48,38	43,55	41,13	
Sicordas convés de vôo (assumido engaste na anteparas)	2370,82	2133,73	2015,19	
Longitudinal leve do Convés de vôo	24,19	21,77	20,56	
Elementos transversais				
Hastilha Sólida	747,59	672,83	635,45	
Caverna (Máx 0,625 metros)	53,99	48,59	45,89	
Caverna Gigante (4,8 metros, não presentes)	215,97	194,38	183,58	
Vau (assumido engastado nos costados)	606,48	545,83	515,51	
Vau (assumido apoiado nas sicordas)	154,82	139,35	131,60	

São evidenciados na tabela anterior os altos módulos seccionais requeridos para as sicordas, quando assumidos seus suportes nas anteparas, considerando que os vaus possuem os mesmos módulos seccionais. Além disso, os vaus transversais não podem ser considerados como parte de anéis gigantes, pois não suportam as sicordas. O mesmo acontece para os módulos seccionais requeridos para os vaus transversais quando se consideram suportados nas cavernas e não em sicordas.

É assim que se pode denominar para esta regra a estrutura como complexa e cálculos de avaliação por métodos diretos para aprovação de citada Sociedade teriam que ser feitos, considerando critérios de cargas e de esforços permissíveis

por elas. Posteriormente, será analisado seu comportamento estrutural com maior exatidão com base no módulo do casco.

Em relação às espessuras avaliadas para o chapeamento deste navio, alguns dos valores calculados e obtidos são menores ao mínimo geral requerido pela norma. A *Tabela 3* apresenta os resultados das espessuras mínimas obtidas, uma vez que as margens de corrosão não estão sendo consideradas. Existe ainda um incremento adicional por estes critérios a realizar e que são de responsabilidade do projetista para manter estes valores dentro dos mínimos exigidos. Assim pode ser verificado que, com relação às espessuras instaladas, não são atingidos alguns dos critérios exigidos para navegação em águas profundas.

Tabela 3 Espessuras do chapeamento para navio Nodrizza avaliados pela BV

Cálculo de Espessuras Mínimas Exigidas			
	Águas profundas	Costeiro	Fluvial
	mm	mm	mm
Chapa do fundo	6,37	5,74	5,42
Chapa da quilha	8,53	7,68	7,25
Chapa convés resistente	6,18	5,56	5,25
Chapa convés de vô (agindo como resistente)	6,18	5,56	5,25
Chapa de Costado (abaixo do convés)	7,06	7,05	7,05
Chapa de Costado acima do convés	6,28	6,27	6,26
Espessura quilha central	7,17	6,46	6,10
Espessura Longarinas	5,02	4,52	4,27
Espessura hastilhas	5,02	4,52	4,27

O estudo deste navio com possibilidade de experimentar ciclos de águas profundas obriga a ter um tratamento neste sentido. Pela regra, considerações relacionadas a momentos verticais devem ser avaliadas, mas outros possíveis efeitos como momentos horizontais e de torção, assim como acelerações, não são consideradas relevantes. A Tabela 4 apresenta o resumo dos momentos, módulos e inércias seccionais requerido por esta norma. Referente à avaliação dos momentos verticais de onda quando o navio efetua navegação fluvial, costeira e em águas profundas, adota-se a avaliação referida e exigida pela sociedade para uma condição de águas não abrigadas.

Tabela 4 Avaliação de momentos verticais e mínimos módulos seccionais do navio Nodriza pelo Bureau Veritas

Mínimos Exigidos	Águas profundas	Costeiro	Fluvial
Momento de Inércia mínimo na Secção Mestra (m ⁴)	0,10	0,09	0,09
Módulos Seccionais mínimo na secção Mestra (m ³)	0,09	0,08	0,07
Modulo seccional presente no convés de borda livre (m ³)	0,11	0,10	0,09
Modulo seccional presente no convés vôo (m ³)	0,03	0,03	0,03
Modulo seccional presente na chapa do fundo (m ³)	0,05	0,04	0,04
Momento vertical alquebramento (kN-m)	8574,05	-	-
Momento vertical tosamento (kN-m)	9561,62	-	-

Um aspecto de particular interesse refere-se a participação da superestrutura dentro da resistência longitudinal. Para esta regra (também) a superestrutura será levada em consideração para a estimativa dos escantilhões, se ela possuir um comprimento superior a 0,15L. No entanto, este critério aplica-se localmente, pois outros critérios claramente estabelecem o convés completo contínuo e resistente ligado ao pontal como constituinte da viga navio na avaliação da resistência longitudinal.

Com relação às tensões admissíveis para esta sociedade dentro do processo de avaliação estrutural, seus limites são influenciados pela condição de navegação, como apresentados na *Tabela 5*.

Tabela 5 Tensões admissíveis para avaliação estrutural para navio Nodriza

	Águas profundas	Costeiro	Fluvial
Máximo esforço elementos longitudinais	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Esforço de flexão	125,00	138,89	147,06
Esforço cortante	85,00	94,44	100,00
Esforços combinados	150,00	166,67	176,47
Máximo esforço elementos transversais	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Esforço de flexão	150,00	166,67	176,47
Esforço cortante	100,00	111,11	117,65
Esforços combinados	175,00	194,44	205,88
Máximo esforço anteparas	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Esforço de flexão	235,00	235,00	235,00
Esforço cortante	135,00	135,00	135,00

5.3 Sociedade Classificadora Nippon Kaiji Kyokai (NKK)

A norma a usar neste estudo é a regra japonesa NKK para avaliação e construção de navios de aço, Parte CS, Construção do Casco e Equipamentos para Navios Menores, de 1980 [30]. Dentro das generalidades, esta norma aplica-se a navios de aço de formas e proporções normais menores a 90 metros em comprimento e classificado para um serviço não restrito. Como anotação, a norma estabelece que para navios de formas e proporções não comuns (não são especificadas as características de tais), os requisitos referentes à construção do casco, arranjo e escantilhões serão determinados individualmente baseados nos princípios gerais aplicados na norma. Portanto, adota-se os critérios desta norma para avaliação dos escantilhões.

Para os escantilhões de forma geral, o módulo de secção requerido considera o valor da chapa efetiva como dez por cento do vão; no entanto, este não pode ser superior a cinquenta por cento do espaçamento entre membros. Para esta norma, o convés resistente está definido como o convés mais alto para o qual as chapas do costado do casco são estendidas dentro de alguma parte do comprimento do navio.

No caso de superestruturas inferiores a quinze por cento do comprimento do navio, o convés resistente será o convés contínuo inferior ao da superestrutura. Esta norma deixa à interpretação do projetista considerar ou não o convés da superestrutura como resistente, caso o seu comprimento supere quinze por cento do comprimento do navio. O convés de borda livre é considerado como o convés contínuo mais alto e, assim como para as outras normas, o pontal é função deste último.

Na *Tabela 6* é apresentado um resumo dos principais módulos seccionais avaliados pela norma. Igualmente para esta norma, considerações são feitas para duas classes de arranjos, longitudinal ou transversal, mas estruturas especiais devem seguir os critérios das regras e serem avaliadas e aprovadas pela sociedade. No caso das sicordas e vaus transversais, como foi particularizado nos cálculos anteriores pelo Bureau Veritas, sua avaliação não considera claramente um caso

como o que existe no navio em estudo. Portanto, são assumidos dois cálculos dentro das possibilidades da norma para determinação dos módulos seccionais, o apoio entre anteparas ou entre cavernas respectivamente. Igualmente ao procedimento anterior, os valores deverão ser estimados por cálculos diretos e submetidos a aprovação da Sociedade Classificadora. Posteriormente, dentro da análise do módulo do casco a avaliação destes componentes será estudada.

Tabela 6 Avaliação pela NKK dos escantilhões de membros primários participantes da resistência longitudinal.

Mínimos Exigidos	MÓDULOS SECCIONAIS (cm ³)			
	Condição de navegação	Águas profundas	Costeiro	Fluvial
Elementos longitudinais	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³
Quilha Central (Fundo)	2182,92	1970,03	1970,03	1970,03
Longitudinal de fundo	14,72	13,25	11,78	11,78
Longitudinal Leve do Costado	47,29	42,56	43,05	43,05
Longitudinal leve do Duplo Fundo	12,51	11,26	11,26	11,26
Sicordas convés resistente (assumido engaste anteparas)	1397,93	1188,24	1188,24	1188,24
Longitudinal leve do Convés	12,58	11,32	11,32	11,32
Sicordas assumida apoiada nos vaus	28,53	24,25	24,25	24,25
Sicordas convés de vôo (assumido engaste na anteparas)	1397,93	1188,24	1188,24	1188,24
Longitudinal CV leve do Convés	38,71	34,84	34,84	34,84
Elementos transversais				
Hastilha Sólida	914,29	838,10	838,10	838,10
Caverna (Máx 0,625 metros)	72,07	72,07	72,07	72,07
Caverna Gigante alma (4,8 metros, não presentes)	102,02	91,82	73,45	73,45
Vau (assumido engastado nos costados)	591,32	591,32	591,32	591,32
Vau (assumido apoiado nas sicordas)	150,96	150,96	150,96	150,96

A espessura do chapeamento é considerada em função da exposição à corrosão pela localização e/ou condição especial de serviço. Portanto, o chapeamento terá que se incrementar adequadamente dentro dos critérios do projetista. A *Tabela 7* apresenta o resumo das espessuras mínimas determinadas pela presente norma não incluindo as margens por corrosão. Deve-se manter o requisito mínimo da espessura por meio de esquemas de proteção e/ou incremento da mesma. De igual forma, os níveis requeridos por esta sociedade para navegação em águas profundas não conseguem se satisfazer em maior número de elementos quando comparados às exigências da Bureau Veritas e espessuras instaladas no navio Nodriza.

Tabela 7 Avaliação das espessuras do chapeamento pela NKK

Cálculo de Espessuras Mínimas Exigidas			
	Águas profundas	Costeiro	Fluvial
	mm	mm	mm
Chapa do fundo	7,26	6,00	6,00
Chapa da quilha	7,66	7,27	6,13
Chapa convés resistente	6,37	5,37	5,37
Chapa convés de vôo (agindo como resistente)	6,37	6,05	5,00
Chapa de Costado (abaixo do convés)	7,26	6,90	6,54
Chapa de Costado acima do convés	7,26	6,90	6,54
Espessura quilha central	7,89	7,94	7,10
Espessura Longarinas	6,49	6,17	5,84
Espessura hastilhas	6,80	6,12	5,44

Dentro do contexto de resistência longitudinal, a norma permite estabelecer o mínimo módulo de secção requerida, assim como a inércia da secção mestra, ver Tabela 8. Procedimentos determinísticos para estimativa dos momentos verticais por onda ficam condicionados ao método que a Sociedade Classificadora considere conveniente para avaliar as diversas condições de carga e lastro.

Tabela 8 Avaliação dos módulos seccionais mínimos requeridos pela NKK

Mínimos Exigidos	Águas profundas	Costeiro	Fluvial
Momento de Inércia na Secção Mestra (m ⁴)	0,15	0,14	0,13
Módulo Seccional mínimo na secção Mestra (m ³)	0,13	0,12	0,12
Modulo seccional convés de borda livre (m ³)	0,15	0,14	0,14
Modulo seccional convés vôo (m ³)	0,04	0,04	0,04
Modulo seccional chapa do fundo (m ³)	0,07	0,07	0,06

Esta norma na avaliação da resistência longitudinal dispensa alguns critérios de maior exigência para navios menores de 60 metros, em particular para avaliação dos módulos seccionais mínimos requeridos.

5.4 Teoria Simples de Vigas

A seguir apresenta-se um resumo da avaliação estrutural realizada pela teoria simples de vigas do navio Nodriza. Serão determinados os módulos seccionais

mínimos requeridos correspondentes a um estágio inicial de projeto, assim como serão avaliados os esforços presentes em função da estrutura atual instalada.

As curvas de pesos, flutuação, força cortante e momentos fletores necessárias para estes cálculos foram avaliadas por meio do software Ship Hull Characteristics Program (SHCP) [31], para as diferentes condições de carregamento. Foram levados em contas maiores valores determinados na condição mais crítica. Os cálculos de inércias e módulos seccionais usados estão apresentados no Apêndice V.

Tabela 9 Resultados da avaliação dos momentos verticais

Valores dos Momentos Obtidos e da Avaliação de Esforços			
Momento em águas tranqüilas (SHCP)	Msw	568.785,82	N-m
Momento em Alquebramento (SHCP)	Mvw(alq)	4.658.159,72	N-m
Momento em Tosamento (SHCP)	Mvw(tos)	-6.256.644,01	N-m
Mv(final) = Msw + Mvw (Alquebramento)	Mvf(alq)	5.226.945,54	N-m
Mv(final) = Msw + Mvw (Tosamento)	Mvf(tos)	-5.687.858,19	N-m

5.4.1 Estimativa dos Módulos Seccionais

A seguir são determinados os Módulos Seccionais Mínimos dos membros primários e de suporte dos primários. Para a estimativa do Módulo Seccional Mínimo são usados os valores obtidos da *Tabela 9* correspondentes aos Momentos fletores máximos obtidos da avaliação da resistência longitudinal. Assim mesmo, também foi estimado um esforço primário máximo permissível (ver *Tabela 10*) considerando um esforço de escoamento de 210 MPa e um fator de segurança de 1,5 tipicamente empregados nestes cálculos.

Para a estimativa dos módulos correspondentes aos membros longitudinais e transversais da estrutura primária serão usadas cargas críticas de projeto, a fim de obter valores que considerem níveis de segurança apropriados. Adicionalmente o esforço permissível usado corresponde a um valor de 210 MPa com um fator de segurança de 1,25 como é recomendado por diversos autores (Ver *Tabela 11*).

Tabela 10 Módulos Seccionais Mínimos Requeridos da Secção Mestra

Estimativa do Módulo Seccional Mínimo Requerido da Secção Mestra			
Momento Fletor Máximo	F.S	σ_x Permissível	M.S
N-m		N/m ²	m ³
5,69E+06	1,5	1,40E+08	0,0406

Tabela 11 Estimativo dos módulos seccionais dos membros estruturais Navio Nodriz

Estimativa dos módulos seccionais dos membros estruturais Navio Nodriz												
No.	Elementos	Esp. (S)	Vão (l)	Fixação	Col. Água (h)		Carga Distribuída		Momento	F.S	σ_x Permissível	M.S
		m	m	Fator	m	m	N/m	N/m	N-m			cm ³
	Unidades			Eng/Apoio	Sup.	Aba.	Superior	Inferior				
Longitudinais												
1	Quilha Central (Pesado)	2,00	8,40	12	0,00	2,28	0,00E+00	4,58E+04	2,70E+05	1,25	1,68E+08	1604,24
2	Longitudinal de fundo	0,60	1,20	12	0,00	2,28	0,00E+00	1,38E+04	1,65E+03	1,25	1,68E+08	9,82
3	Longitudinal Leve do Costado	0,60	1,20	12	0,00	2,28	0,00E+00	1,38E+04	1,65E+03	1,25	1,68E+08	9,82
4	Longitudinal leve do Duplo Fundo	0,60	1,20	12	2,30	0,00	1,39E+04	0,00E+00	1,66E+03	1,25	1,68E+08	9,90
5	Sicordas assumido engaste nas anteparas	4,80	8,40	12	1,00	0,00	4,82E+04	0,00E+00	2,84E+05	1,25	1,68E+08	1687,56
6	Longitudinal leve do Convés	0,60	1,20	12	1,00	0,00	6,03E+03	0,00E+00	7,23E+02	1,25	1,68E+08	4,31
7	Sicordas assumido apoio nos Vãos	4,80	1,20	8	1,00	0,00	4,82E+04	0,00E+00	8,68E+03	1,25	1,68E+08	51,66
8	Convés 02											
9	Sicordas convés 02 assumido apoio nas cavernas	4,80	1,20	8	1,00	0,00	4,82E+04	0,00E+00	8,68E+03	1,25	1,68E+08	51,66
10	Longitudinal leve do Convés heliporto	0,60	1,20	12	1,00	0,00	6,03E+03	0,00E+00	7,23E+02	1,25	1,68E+08	4,31
11	Anel											
12	Hastilha sólida	1,2	4,5	12	0	2,28	0,00E+00	1,03E+05	1,74E+05	1,25	1,68E+08	1035,22
13	Caverna	1,2	2,3	8	0	2	0,00E+00	4,62E+04	3,06E+04	1,25	1,68E+08	181,87
14	Vau (assumido engaste nos costados - caverna)	1,2	9,5	12	1	0	1,21E+04	0,00E+00	9,07E+04	1,25	1,68E+08	539,62
15	Vau (assumido apoio nas sicordas)	1,2	4,8	8	1	0	1,21E+04	0,00E+00	3,47E+04	1,25	1,68E+08	206,64

5.4.2 Determinação de Esforços Presentes na Estrutura do Navio Nodriza

O processo de avaliação das tensões primárias considera duas condições: uma considerando a participação da superestrutura na resistência longitudinal e outra considerando a viga-navio até o convés resistente conformado pelo convés de borda livre. A primeira abordagem obedece a hipótese de que a superestrutura é efetiva dentro de quarenta por cento do comprimento do navio. Os resultados obtidos para as tensões primárias (σ_1) ou também denominadas de área⁴ são apresentados em Tabela 12.

Tabela 12 Resultados de avaliação das tensões primárias no navio Nodriza

Determinação dos Esforços Primários para Superestrutura Efetiva						
	Msw	Mvw(Tos)	Mvw(Alq)	Mod. Sec.	σ_1 [N/m ²]	
	N-m	N-m	N-m	m ³	Tosamento	Alquebramento
Convés de Vóo	5,69E+05	-6,26E+06	4,66E+06	4,32E-01	-1,32E+07	1,21E+07
Convés de borda livre	5,69E+05	-6,26E+06	4,66E+06	1,42E+00	-4,02E+06	3,69E+06
Fundo	5,69E+05	-6,26E+06	4,66E+06	6,64E-01	8,57E+06	-7,88E+06
Determinação dos Esforços Primários para Superestrutura não Efetiva						
	Msw	Mvw(Tos)	Mvw(Alq)	Mod. Sec.	σ_1 [N/m ²]	
	N-m	N-m	N-m	m ³	Tosamento	Alquebramento
Convés de borda livre	5,69E+05	-6,26E+06	4,66E+06	2,44E-01	-2,33E+07	2,14E+07
Fundo	5,69E+05	-6,26E+06	4,66E+06	3,89E-01	1,46E+07	-1,34E+07

Para as tensões secundárias, conjunto chapa mais perfil constituindo o sistema de reforços do casco, está sujeito a uma distribuição linear de tensões, mas não distribuída de forma uniforme na altura do perfil. Duas tensões são avaliadas: tensão dos perfis pesados σ_2' , e tensão dos perfis leves σ_2'' . Neste caso, o perfil pesado e o perfil leve experimentam tensões de compressão e tração, produto da deformação secundária. Posteriormente seus efeitos são superpostos para determinação do valor final (ver Figura 5-1)

⁴ Considerando a altura dos diferentes elementos longitudinais que constituem a viga caixão quando comparada com as distâncias desses mesmos elementos à linha neutra do navio, pode-se avaliar a tensão primária como constante em toda a área dos elementos de reforço e da espessura do chapeamento.

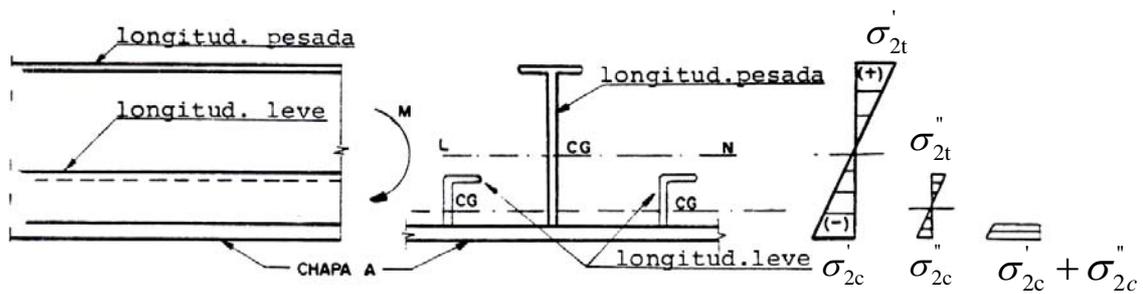


Figura 5-1 Avaliação de tensões secundárias em sistema chapa-perfil (pesado e leve) [3]

Os cálculos correspondentes à tensão secundária dos diferentes elementos são expostos na Tabela 13 juntamente com as tensões primárias e terciárias. As tensões terciárias são estimadas para as chapas do casco mediante a teoria de placas para pequenas deformações submetidas à pressão lateral uniforme [10].

Tabela 13 Resumo da avaliação de esforços em membros principais para o navio Nodriz com participação da superestrutura, aplicação da teoria de vigas.

Avaliação com Superestrutura								
No.	Elemento	Esf. Primário		Esf. Secundário		Esf. Terciário	Esforços Resultantes	
		Flange	Chapa	Flange	Chapa		Flange	Chapa
	Elementos	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
Longitudinais								
1	Quilha Central (Pesado)	-4,80	-7,61	10,32	-5,86	69,52	5,52	56,05
2	Longitudinal de fundo	-7,61	-7,61	22,41	-3,21	69,52	14,80	58,70
3	Longitudinal Leve do Costado	-5,40	-5,40	7,94	-1,14	69,52	2,54	62,98
4	Longitudinal leve do Duplo Fundo	-4,80	-4,80	31,59	8,29	30,49	26,79	33,98
5	Sicordas assumido engaste nas anteparas	3,69	3,69	839,05	-124,80	30,49	842,75	-90,62
6	Longitudinal leve do Convés	3,69	3,69	263,17	-126,83	30,49	266,86	-92,65
7	Sicordas assumido apoio nos Vaus	3,69	3,69	51,37	-7,64	30,49	55,06	26,54
Convés 02								
8	Sicorda convés 02 assumido apoio na antepara	12,11	12,11	51,37	-7,64	3,05	63,48	7,52
9	Longitudinal leve do Convés heliporto	12,11	12,11	91,50	-8,80	3,05	103,61	6,36
Anel								
10	Hastilha sólida			29,32	-16,38	100,19	29,32	83,82
11	Caverna			59,72	-8,88	100,19	59,72	91,31
12	Vau assumido engaste nos costados			187,81	-27,93	43,94	187,81	16,01
13	Vau assumido apoio nas sicordas			143,84	-21,39	43,94	143,84	22,55

Considerando os módulos de secção formando as vigas do conjunto sicordas – vaus, são os mesmos para o navio Nodriz, dentro desta avaliação uma tentativa

básica para estimar os esforços presentes neste conjunto como vigas isostáticas fora realizada, sem desprezar a natureza hiperestática do conjunto, que será avaliada de forma acurada dentro da análise do módulo do casco.

5.5 Resumo Comparativo

A seguir é apresentado na Tabela 14 o resumo geral da avaliação convencional para o navio Nodriza. Pode ser contemplado que os critérios das regras usadas dentro da avaliação não apresentam considerações especiais para estruturas como a que possui o navio em estudo. Isto obriga o uso de procedimentos mais específicos como requerimento das sociedades para uma posterior avaliação e aprovação das mesmas. A avaliação de elementos importantes interagindo na resistência longitudinal como Sicordas e Vaus aplicando critérios de regras e de teoria simples de vigas não permitiram obter valores satisfatórios. Com referência aos valores correspondentes ao chapeamento requerido pelas distintas regras e dos métodos diretos, não estão inclusos nos valores apresentados possíveis incrementos a serem considerados por efeitos de corrosão.

Uma consideração importante, discutida posteriormente no capítulo 7 de resultados, pode ser vista com relação aos valores exigidos como mínimos para o módulo da secção mestra e seus elementos constitutivos. Esta exigência é superada satisfatoriamente pelo Módulo da Secção Mestra do Navio Nodriza, especialmente quando considerada a participação da superestrutura. No entanto, a maioria dos elementos constitutivos da resistência longitudinal não satisfaz os requisitos mínimos exigidos pelas regras usadas, como são as sicordas, chapas de fundo, convés e de costado, assim como os vaus participantes da rigidez estrutural primária, mesmo não considerados na avaliação da secção mestra.

Tabela 14 Comparação da Avaliação Convencional Estrutural do Navio Nodriza

DESCRIÇÃO ELEMENTOS		MODULOS SECCIONAIS MÍNIMOS EXIGIDOS (cm³)						Instalados Com Chapa Col
		Bureau Veritas			Nippon Kaiji Kiokay			
		A. Abertas	Costeiro	Fluvial	A. Abertas	Costeiro	Fluvial	
No.	Elemento							
1	Quilha Central (Fundo)	3353,01	3017,71	2850,05	2188,92	1970,03	1970,03	7333,05
2	Longitudinal de fundo	16,03	14,24	13,62	14,72	13,25	11,78	25,53
3	Longitudinal Leve do Costado	16,03	14,24	13,62	47,29	42,56	34,05	25,53
4	Longitudinal leve do Duplo Fundo	13,50	12,15	11,47	12,51	11,26	11,26	25,53
5	Sicordas Engastada em Anteparas	2370,82	2133,73	2015,19	1397,93	1188,24	1188,24	168,95
6	Longitudinal leve do Convés	6,97	5,44	5,14	12,58	11,32	11,32	25,53
7	Sicordas Apoiada nos Vaus	48,38	43,55	41,13	28,53	24,25	24,25	168,95
8	Sicordas CV Engastada em Anteparas	2370,82	2133,73	2015,19	1397,93	1258,14	1258,14	168,95
9	Longitudinal leve do Convés Vôo	24,19	21,77	20,56	38,71	34,84	34,84	84,01
10	Hastilha Sólida (espessura)	747,59	672,83	635,45	914,29	838,10	838,10	2619,26
11	Caverna(Máx 0,625 metros)	53,99	48,59	45,89	72,07	72,07	72,07	168,95
12	Caverna Gigante (4,8 metros)	215,97	194,38	183,58	102,02	91,82	73,45	168,95
13	Vau engastado nos costados	606,48	545,83	515,51	591,32	591,32	591,32	168,95
14	Vau apoiado nas sicordas	154,82	139,35	131,60	150,96	150,96	150,96	168,95
15	Seção Mestra Sem Superestrutura (m³) *	0,089	0,078	0,074	0,129	0,123	0,116	0,244
16	Seção Mestra Com Superestrutura (m³) *	0,089	0,078	0,074	0,129	0,123	0,116	0,434
DESCRIÇÃO ELEMENTOS		ESPESSURAS CHAPEAMENTO (cm)						Instalados
		Bureau Veritas			Nippon Kaiji Kiokay			
		A. Abertas	Costeiro	Fluvial	A. Abertas	Costeiro	Fluvial	
17	Chapa do Fundo	6,372*	5,735*	5,416	7,261*	6,000*	6,000	6,350
18	Chapa Quilha	8,527*	7,675*	7,248	7,657*	7,274*	6,125	7,900
19	Chapa Convés Resistente	6,178*	5,560*	5,251	6,371*	5,371*	5,371	6,350
20	Chapa convés de Vôo (Resistente)	6,180*	5,560*	5,251	6,371*	6,052*	5,000	6,350
20	Chapa de Costado (abaixo do convés)	7,061*	7,052*	7,047	7,261*	6,898*	6,535	6,350

* Valores de espessuras requeridas não incluem possíveis incrementos por considerações de efeitos de corrosão na condição de águas profundas.

* Os módulos mínimos requeridos da secção mestra dentro da avaliação convencional está em função das dimensões principais, L, B e h. Portanto, não é considerado o convés resistente na sua determinação.

6 ANÁLISE ESTRUTURAL DO NAVIO CLASSE NODRIZA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para obter um projeto adequado do navio é necessário considerar todas as interações possíveis a se apresentar na estrutura. No entanto, esse processo é muito complexo e para entender o verdadeiro comportamento em nível estrutural, grandes esforços são requeridos. Considerando os avanços em termos computacionais, é possível efetuar uma avaliação mais acurada da resposta estrutural do navio por métodos diretos, que constitui o tema do presente capítulo. Para lograr isto, geralmente são analisadas subestruturas do navio, que são segmentos completos do navio, suficientemente longas e autônomas na sua resposta, nos seus estados limites e efeitos sobre o navio de forma global. Desta forma, as características significativas da estrutura como um todo não são perdidas e, ao mesmo tempo, é possível considerar a iteração dos sub-blocos com maior precisão.

Hughes [5] introduziu o conceito de “Módulo de Casco” para analisar as subestruturas de um navio. Estes modelos são basicamente estruturas tridimensionais compostas por vigas e chapas representadas em um modelo de elementos finitos, cujo comprimento dentro do navio como um todo será determinado pelas condições de contorno possíveis de avaliar e estabelecer. A análise da viga navio fornece as condições de contorno (ou de fronteira) e o carregamento agente para os módulos do casco isolados. Os efeitos resultantes destas análises fornecem as condições de contorno e as cargas para a análise dos membros principais. Finalmente, os resultados destas últimas análises fornecem as condições para avaliação dos membros a nível local, conforme a hierarquia apresentada na Figura 2-8.

Uma vez que há um complexo processo de interação entre as condições de contorno dos diferentes módulos do casco analisados isoladamente, seus efeitos podem ser minimizados se localizados os limites nas anteparas transversais. De forma geral, a escolha do número de módulos, comprimentos e localizações são

dependentes de cada projeto e cada um estará submetido às diferentes combinações de carga próprios do comportamento do navio no mar. Uma análise da resistência avaliando um módulo do casco pelo MEF considerará as seguintes etapas, que doravante serão discutidas com maior profundidade: (i) Determinação do objetivo, categoria e extensão da análise; (ii) Modelagem da estrutura e condições de contorno; (iii) Determinação e modelagem das cargas agentes; (iv) Análise e (v) Avaliação dos resultados.

O propósito do presente capítulo é apresentar o desenvolvimento total do módulo do casco do navio Nodriza dentro do processo de avaliação da resposta elástica do navio ante às diferentes solicitações e com particular atenção ao efeito da superestrutura. Diferentes critérios na modelagem para estabelecer todas as condições adequadas dentro das diferentes fases de construção do módulo do casco serão expostos dentro de um processo simplificado para o navio de pequeno porte Nodriza. Para a modelagem será usada como ferramenta computacional o programa MSC. Patran [39] para as fases de pré-processamento e pós - processamento. A solução linear elástica do modelo para determinação das tensões e deformações utilizará o programa MSC. Nastran [40].

6.1 Introdução ao Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é reconhecido como uma das mais importantes ferramentas tecnológicas no campo da engenharia para a análise de estruturas. O MEF é particularmente interessante no caso de navios e embarcações devido a sua complexidade estrutural e a natureza não prismática da viga navio. Antes do MEF surgir como um método de avaliação, a análise dos meios contínuos era realizada por resolução direta dos sistemas de equações diferenciais que regem o fenômeno, tendo em consideração as necessárias condições de contorno. Para facilitar a aplicação desta técnica sobre problemas não elementares, era comum recorrer a séries de Fourier. Estes procedimentos complexos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples. A substituição de diferenciais exatos por diferenciais aproximados, calculados com base em grelhas de pontos era uma tentativa para contornar alguma das limitações. O método das diferenças finitas

resulta da aplicação desta técnica que, antes do aparecimento dos computadores, apresentava o inconveniente de requerer a resolução de grandes sistemas de equações lineares.

O Método dos Elementos Finitos envolve a modelagem de uma estrutura discretizada em pequenos elementos e ligados entre si por nós. Existem duas aproximações associadas à aplicação do MEF. A primeira é o método da flexibilidade (ou Força), baseado no uso de forças internas como incógnitas do problema e que utiliza equações de equilíbrio e compatibilidade para obter as equações governantes. A segunda aproximação é o método de deslocamentos ou método de rigidez, que considera os deslocamentos nodais como incógnitas do problema e que são a base para constituir a equação governante. Estabelecem-se as equações de equilíbrio e se obtém as matrizes de rigidez K_e e o vetor de carregamento f_e para cada elemento discretizado. A partir destes, constroem-se a matriz de rigidez global K para toda a malha dos elementos finitos e o vetor de carga f , sobre os nós. Gerando assim o sistema de equações resultante

$$[K]\{D\} = \{f\} \quad (6.1)$$

Este sistema é resolvido para determinar as variáveis incógnitas correspondentes aos deslocamentos nodais (D) da malha. A partir da determinação dos movimentos nodais, continua a seguir a determinação das deformações e das tensões para cada elemento utilizando uma lei constitutiva para o material.

Alguns aspectos que devem ser considerados na fase que antecede a análise de uma estrutura são as alterações geométricas, material constituinte e ações aplicadas. Uma característica fundamental do MEF é que suas aplicações dependem, em parte, das simplificações inerentes a cada classe de problema. As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, espera-se que a análise de uma estrutura tenha obrigatoriamente de levar em conta os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática.

Na análise de uma estrutura sólida é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos se comparados as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, i.e., todo o estudo é feito com base na geometria inicial não deformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também freqüente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer aos algoritmos específicos de análise não linear do material [24].

6.2 Elementos Utilizados e Características da Modelagem

Inicialmente pode ser dito que o uso dos elementos está condicionado à classe de análise que vai ser desenvolvida. Contudo, as diferentes propriedades e características dos elementos a se usar devem ser capazes de representar de forma adequada e acurada a rigidez e os esforços resultantes na estrutura em avaliação, constituindo-se como requisito o conhecimento adequado dos mesmos dentro dos diferentes programas disponíveis. A Tabela 15 ilustra de forma geral os diferentes elementos disponibilizados nas bibliotecas do MEF.

Tabela 15 Elementos gerais disponíveis para análise de elementos finitos

Elemento	Dimensões	Características
Treliça (truss)	1D	Rigidez axial, mas sem rigidez flexional.
Viga (Beam)	1D	Rigidez axial, cortante, flexional e de torção
Placa de Membrana (plane stress)	2D	Rigidez de membrana no plano
Casca (Shell and bending plate)	2D	Rigidez de membrana, flexional e de torção
Sólidos (solid)	3D	Componentes Totais

A avaliação deste trabalho está baseada em elementos lineares de dois nós e cascas de três ou quatro nós, consideradas suficientes para representar a estrutura do casco. Uma das considerações que exige atenção no uso dos elementos é a compatibilidade entre eles nas funções de deslocamentos, assim como a adequada transferência das cargas e esforços nas fronteiras, especialmente com o uso de

elementos com ou sem rigidez de flexão nos nós. Igualmente e considerando o nível de avaliação (como no caso das análises locais), com possíveis cargas em diferentes planos, todas as componentes de rigidez são geralmente significantes para obter resultados mais apurados. Para elaboração do modelo foi usado o software MSC Patran [39] como ferramenta de pré-processamento e foram selecionados elementos próprios da biblioteca do programa MSC Nastran [40] para constituir o modelo tridimensional. Considerando as características dos carregamentos a impor e os resultados esperados a serem avaliados, foram selecionados elementos de viga, CBEAM de dois nós e elementos de casca, SHELL de quatro e três nós. As propriedades e características de citados elementos serão explicados a seguir.

6.2.1 Elementos CBEAM

Este é um elemento 1D que conecta dois pontos. O elemento CBEAM é o mais completo da biblioteca de elementos de viga do MSC. Nastran, já que ele não tem limitações em relação às propriedades que podem não ser constantes ao longo do comprimento, o centro de corte e os eixos neutros não precisam coincidir (seções assimétricas) e efeitos de encurvamento (warping) são recuperados. Para este caso a orientação do elemento é muito importante dentro da análise, já que sua contribuição a rigidez de uma estrutura varia segundo a orientação no espaço (ver Figura 6-1-a). Deste modo, é necessário especificar a orientação do elemento além de suas propriedades e pontos de localização espacial.

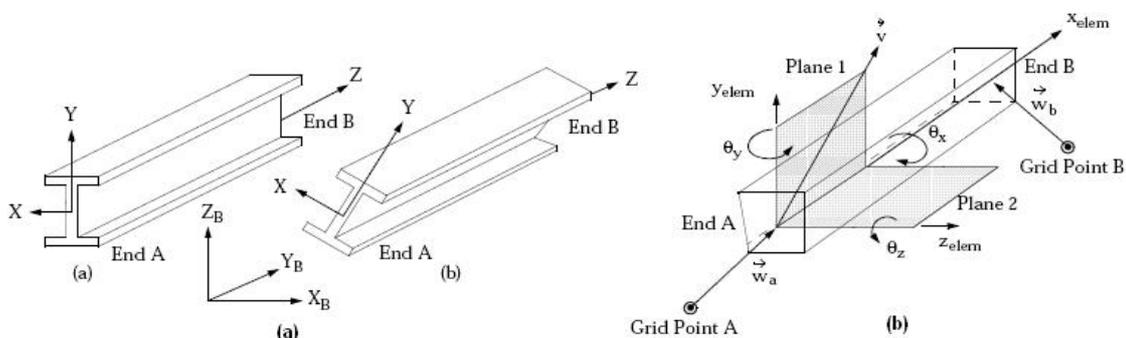


Figura 6-1 Características do elemento CBEAM

A definição da orientação do elemento no espaço é feita com o uso de um vetor orientação (\vec{v}), que define desta maneira o sistema local de coordenadas. O

vetor de orientação define um plano de referência chamado de “plano 1”, como mostra a *Figura 6-1-b*. O eixo base “x” está definido pela linha que conecta os centros de corte da seção em cada extremo. O eixo “y” é definido pelo usuário de tal forma que pertença ao plano 1 e seja perpendicular ao eixo base “x”. O plano 1 assim formado contém o eixo base “x” e a orientação do vetor \vec{v} . Depois de definir este plano, gera-se pela regra do produto vetorial da mão direita o eixo “z” do elemento viga, ficando definido dessa maneira um plano “2” que contém o eixo “x” e “z”. As forças e esforços são computados e reportados no sistema de coordenada do elemento. Os esforços são possíveis de avaliar para diferentes pontos e são gerados pela flexão e pelas forças axiais presentes. As forças que podem ser recuperadas incluem o torque total e torque por encurvamento (warping).

6.2.2 Elementos SHELL

O Nastran disponibiliza 6 elementos planos (2D) para representar as chapas do navio. Os elementos são: CQUAD4, CTRIA3, CQUAD8, CTRIA6, CQUADR e CTRIAR. Estes elementos diferem essencialmente em sua forma, número de pontos para defini-los e número de pontos internos para recuperar os esforços. Cada tipo de elemento pode ser usado para modelar membrana e casca. A importante distinção entre os elementos é a exatidão que é obtida com cada um deles, por este motivo dentro da presente modelagem será usado o elemento de casca (Shell, Ver *Figura 6-2*).

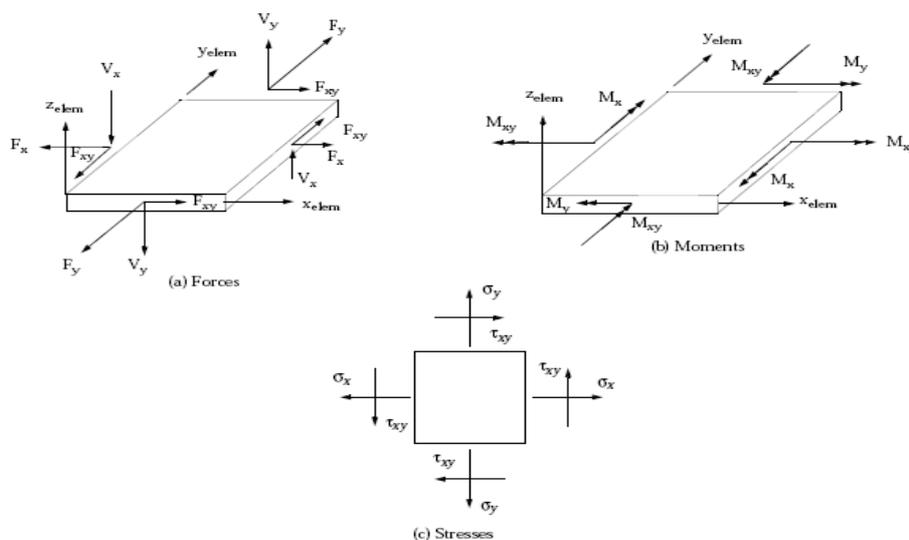


Figura 6-2 Direções positivas das forças, momentos e esforços em um elemento de chapa, *Manual Nastran 2005, [40]*

Na Figura 6-2 se mostram as direções positivas de forças, momentos e esforços para um elemento casca. É importante mencionar que as forças geradas para os elementos são dadas por unidade de comprimento. Ademais, a Figura 6-2 (c) mostra os esforços gerados para um elemento de chapa. O elemento utilizado na análise enxerga três componentes de esforço, duas normais e uma cortante. Além disso, podem ser requeridos como dados de saída os esforços principais, o ângulo entre o eixo x e o eixo principal maior, os esforços de Von Mises, deformações, etc.

O uso exclusivo dos elementos 1D e 2D mais completos no que se refere à recuperação de esforços, CBEAM e SHELL da biblioteca do MSC. Nastran 2005 [40], permitem obter uma adequada avaliação dos esforços agentes no navio. A conjugação deles apresenta boa confiabilidade pelas características de deslocamentos translacionais e rotacionais que possuem, particularmente para a estrutura conformada por painéis enrijecidos sob cargas de pressão lateral. Finalmente, os elementos usados dentro do modelo de elementos finitos estão listados na Tabela 16.

Tabela 16 Sumário dos elementos usados na modelagem do navio Nodriza

Casco e Superestrutura		
Item	Elemento Estrutural	Elemento - MEF
1	Chapa do Fundo	Shell (3 e 4 nós)
2	Chapas do Costado	Shell (3 e 4 nós)
3	Chapa do Duplo Fundo	Shell (3 e 4 nós)
4	Chapa do Convés de borda Livre	Shell (3 e 4 nós)
5	Chapa do Convés de Vão	Shell (3 e 4 nós)
6	Quilhas	Shell (3 e 4 nós)
7	Longarinas	Shell (3 e 4 nós)
8	Sicordas	Shell (3 e 4 nós)
9	Hastilhas	Shell (3 e 4 nós)
10	Borboletas	Shell (3 e 4 nós)
11	Vaus	Shell (3 e 4 nós)
12	Cavernas	Shell (3 e 4 nós)
13	Reforços Escotilhas e Aberturas	Shell (3 e 4 nós)
14	Pontais	Shell (4 nós)
15	Reforços leves de Fundo, Duplo Fundo, Convés de Borda Livre, Convés de Vão, Costado e Bojo	CBEAM (2 nós)

6.2.3 Características da Modelagem

Módulos do casco para avaliação da resistência longitudinal podem ser desenvolvidos com modelos feitos com malhas grosseiras, sem maior nível de detalhe estrutural e até desprezando a modelagem de diversos elementos estruturais, em função de simplificações. Basicamente podem ser definidos diferentes níveis de construção de um modelo. Entre algumas referências, a ABS [37] recomenda que podem ser desenvolvidos modelos em dois passos. Inicialmente, um modelo com malha grosseira permite avaliar esforços e deslocamentos gerais, que é complementado com análises posteriores locais utilizando níveis de refinamento elevado e aproveitando as condições de contorno (deslocamentos) obtidas do modelo grosseiro. Outra possibilidade é uma modelagem única que considera níveis de detalhes maiores e densidades de malha mais altas, capazes de simplificar análises locais, mas com utilização de maior tempo na modelagem e processamento.

A seguir apresentam-se características gerais do módulo do casco do navio Nodriz, que, considerando o escopo e a natureza acadêmica do presente trabalho foram orientadas a obter um nível de refinamento alto (com grande detalhamento estrutural), baseado nas observações obtidas anteriormente no capítulo da avaliação convencional. Desenvolveu-se, portanto, um modelo único com um nível global suficientemente refinado em função da densidade de malha, porém sem grande detalhamento local da ligação entre os membros estruturais ver Figura 6-3.

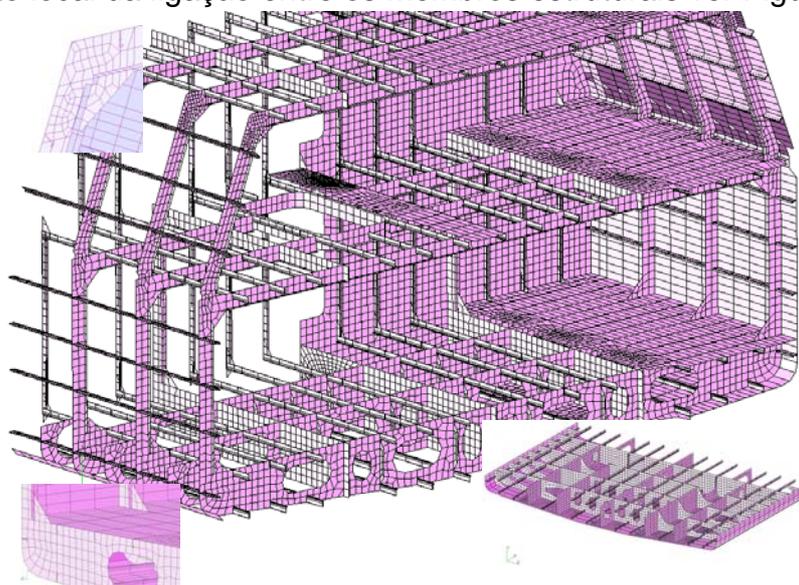


Figura 6-3 Nível de Detalhe Modelado para o Navio Nodriz

Foram levadas em consideração e implementados diversos critérios de modelagem existentes e recomendados pelas Sociedades Classificadoras para navios maiores, ver Tabela 17, [22],[23],[38]. Com base nisto pode ser dito que o Módulo do Casco do Navio Nodriza está modelado com uma densidade de malha elevada para a região correspondente a 55% do navio. Além disto, os níveis de detalhe estrutural incluem todos os reforços instalados na estrutura da região de avaliação. Entre os elementos modelados estão as anteparas internas longitudinais, reforços verticais e horizontais de anteparas, borboletas ligando longitudinais leves, pesados e transversais, reforços verticais em hastilhas e a totalidade de aberturas foram igualmente modeladas, excetuando os cortes para passagem de reforços. Aberturas de escotilhas foram modeladas com seus respectivos reforços.

Tabela 17 Valores Recomendados de Malha para Modelo Global

Valores Recomendados de Malha para a Modelagem de Navios (ABS-IACS [23])						
Membro Estrutural	Transversal e/ou vertical		Longitudinal		Transvers. e/ou Vert.	Longitudinal
	ABS	CSR-IACS	ABS	CSR-IACS	Nodriza	Nodriza
Comprimento a modelar	B ou B/2	B ou B/2	3 porões	3 porões	B	55% Compr.
Longitudinais leves	N/A	N/A	ws/2 a ws/4	2 x s	-	ws/8 a ws 48
Longarinas e quilhas	3 elem	3 elem	ws/2 a ws/4	2 x s	8	ws/36 a ws 48
Chapa Costado	1 x s	1 x s	ws/2 a ws/4	2 x s	s/6	ws 16 a ws 20
Chapa Fundo	1 x s	1 x s	ws/2 a ws/4	2 x s	s/6	ws/16 a ws 48
Chapa Duplo Fundo	1 x s	1 x s	ws/2 a ws/4	2 x s	s/6	ws/16 a ws 48
Chapa Convés	1 x s	1 x s	ws/2 a ws/4	2 x s	s/6	ws/16 a ws 48
Anteparas Longitudinal	1 x s	1 x s	ws/2 a ws/4	2 x s	s/6	Ws/24 a ws/36
Anteparas Transversal	1 x s	1 x s	N/A	N/A	s/6	N/A
Hastilhas	3 elem	3 elem	N/A	N/A	8	N/A
Cavernas Gigantes	3 elem	3 elem	N/A	N/A	2	N/A
Cavernas	1 x s	1 x s	N/A	N/A	s/6	N/A
Vaus Gigantes	3 elem	3 elem	N/A	N/A	2	N/A
Vaus	1 x s	1 x s	N/A	N/A	s/6	N/A
Aberturas em hastilhas, quilhas e longarinas						Modeladas

Onde,

S= espaçamento entre reforços longitudinais

ws= espaçamento entre cavernas gigantes

A Tabela 17 mostra as diferentes recomendações para modelagem e avaliação da resistência por intermédio de Sociedades Classificadoras para Navios petroleiros e

aquelas que foram impostas no desenvolvimento do modelo. Para citar como exemplo, a ABS recomenda para longarinas e quilhas constituir pelo menos três elementos verticalmente, além disto, e longitudinalmente eles não devem ser maiores a $ws/2$. No caso do navio Nodriza existem 8 elementos verticalmente e longitudinalmente sendo que cada elemento tem uma medida entre $ws/36$ a $ws/48$

Para garantir a qualidade dos resultados da análise, o modelo obedece à requisitos de modelagem para elementos finitos que foram respeitados para maioria da estrutura modelada. No caso do chapeamento se verificou:

- Relação de aspecto <3
- Relação lados (taper) <10
- Distorção angular (warp) <5°
- Ângulo interno >30°
- Inexistência de bordos livres por ligações erradas de elementos
- Inexistência de nós ou elementos duplicados
- Inexistência de elementos sobrepostos

Finalmente os dois modelos foram construídos obtendo um número de nós e elementos descritos como segue:

Tabela 18 Composição de Nós e Elementos para os Módulos do Casco

Modelo com Superestrutura		Modelo sem Superestrutura	
Nós	127553	Nós	88344
Elementos	138930	Elementos	96525
4 Nós	93,6%	4 Nós	93,8%
3 Nós	1,2%	3 Nós	1,2%
Viga	5,2%	Viga	5,2%

Os resultados dos tempos de processamento e das diferentes características das avaliações são discutidos no capítulo seguinte.

6.3 Determinação dos Esforços

Para a análise da resistência longitudinal da estrutura do navio e avaliação dos escantilhões dos membros estruturais longitudinais representados no módulo do casco, assim como de membros suportando primários e de anteparas dentro da região média do navio, três condições de análises em função de cargas são consideradas, uma estática (E), uma dinâmica (D) e outra combinando efeitos estáticos e dinâmicos ($E+D$).

A primeira avaliação está baseada em uma condição estática crítica (E), onde são consideradas e impostas no módulo do casco as cargas de pressão hidrostáticas sobre o casco submerso para uma condição de águas tranquilas nas duas condições de operação (correspondente aos calados em carga plena e leve) e considerando a densidade de água do mar de $1,025 \text{ ton/m}^3$. Igualmente são impostas cargas de pressão estáticas em tanques e nos diferentes convéses correspondentes às cargas líquidas e pesos internos respectivamente. A estrutura considera os pesos fixos da estrutura modelada mediante a imposição da aceleração correspondente à gravidade e considerando uma densidade do aço de $7,85 \text{ Ton/m}^3$. Igualmente, são estabelecidas as condições de contorno em função dos resultados obtidos na avaliação da resistência longitudinal (SHCP).

Uma segunda consideração quase estática (D) considera os diferentes carregamentos próprios de cada condição de navegação e uma distribuição de pressões hidrodinâmicas ao longo do modelo representando a situação do navio entre ondas. Para obter uma boa representação do padrão da onda trocoidal (obtido da avaliação da resistência longitudinal do programa SHCP) agindo no chapeamento do casco submerso, a modelagem da onda no comprimento do navio, está representada por uma pressão constante que varia para cada duas balizas e cujo valor corresponde à pressão média na região central de citadas balizas.

De forma similar, o momento flexional vertical por onda, assim como os esforços cortantes gerados desta mesma condição e obtidos na avaliação da resistência longitudinal, constitui-se nas condições de contorno nas áreas de corte do navio.

As situações do navio entre ondas mais críticas para tosamento e alquebramento são aquelas a serem impostas no módulo do casco. Portanto, para atingir níveis de carregamentos, capazes de garantir que a estrutura está sendo submetida a esforços suficientes para uma avaliação dentro dos requisitos estipulados para satisfazer os níveis de esforços exigidos pelas Sociedades Classificadoras (dentro de uma avaliação do navio entre ondas). Esforços de flexão adicionais ($M_{VW(Adição)}$) serão impostos dentro do módulo do casco na condição *dinâmica* (D), além dos determinados inicialmente na avaliação da resistência longitudinal ($M_{VW(SHCP)}$). Os valores máximos de avaliação são os requeridos pela sociedade classificadora Bureau Veritas [29] ($M_{VW(BV)}$) e são acrescentados nas condições de contorno ao modelo, depois de carregado totalmente para cada condição de ondas em estudo.

$$M_{VW(BV)} = M_{VW(SHCP)} + M_{VW(Adição)} \quad (6.2)$$

Adicionalmente aos esforços solicitantes, momentos flexionais horizontais foram impostos dentro de um processo determinístico tomado das regras da Bureau Veritas para navios maiores de 65 metros de comprimento para navegação em águas não restritas, com a finalidade de apreciar seus efeitos na estrutura. No entanto, só correspondem a avaliações de casos particulares e os seus efeitos não são considerados nos resultados finais.

Finalmente, e considerando a linearidade da presente análise, efeitos estáticos e quase estáticos são combinados ($E+D$) para obter o valor das tensões presentes resultantes, como resposta às solicitações sob a qual o navio em estudo está sendo submetido para as diferentes condições de operação. Considera-se que efeitos primários críticos dentro do módulo do casco são exigidos com o incremento dos níveis de esforço para as condições de alquebramento e tosamento exigidos pelas sociedades classificadoras.

$$M_{Total} = M_{SW} + M_{WV(BV)} \quad (6.3)$$

M_{Total} = Momento total presente ao longo do módulo do casco avaliado para a condição de cargas combinadas ($E+D$).

M_{SW} = Momento em águas tranqüilas correspondente à avaliação da resistência longitudinal (SHCP).

$M_{VW(BV)}$ = Momento vertical de onda exigido pela norma Bureau Veritas e atingido ao longo do modelo, na condição (D).

O parágrafo anterior estabelece para as condições em estudo que momentos em águas tranqüilas são constantes para uma determinada condição de carga, e uma parcela gerada as ondas pode ser estimada e adicionada à parcela de águas tranqüilas. De forma geral, a resposta secundária e terciária do módulo do casco é avaliada de forma global; todas as cargas internas são representadas dentro das possíveis condições de operação, assim como sua interação com o carregamento externo.

6.3.1 Pesos Agentes

Primeiramente foi preciso estimar a distribuição de todos os pesos internos para as diferentes condições de navegação ao longo do comprimento e altura do navio. Para que, conseqüentemente, as cargas a considerar dentro da avaliação da resistência longitudinal fossem impostas igualmente na modelagem do módulo do casco. Para a localização das cargas, estas foram discriminadas espacialmente ao longo do comprimento do navio, da extensão da boca e da sua altura. Foram então conformados grupos principais constituídos pelo fundo, duplo fundo, convés resistente, convés de vôo e convés da ponte de governo. Cada grupo foi referenciado e dividido no comprimento do navio por meio das balizas do projeto. Com isto e considerando o peso próprio do aço por regiões entre balizas, foi gerada uma tabela considerando o peso agente em cada convés, duplo fundo e fundo, para cada espaçamento entre baliza. Finalmente, foi obtido para cada espaço entre balizas um peso final, que se constituiu na base de dados para obtenção da resistência longitudinal e assim mesmo estabelece as cargas em detalhe que serão impostas no módulo do casco.

A Tabela 19 apresenta os carregamentos impostos no modelo e que foram extraídos das tabelas de pesos usadas para avaliação da resistência longitudinal.

Não obstante, deve ser esclarecido que dentro do processo de estimativa da resistência longitudinal, os pesos do navio em estudo foram representados como cargas de pressão -colunas de água- distribuídas sobre as diferentes áreas formando os compartimentos, considerando as particularidades do arranjo do navio Nodriz. Esta observação forçou a elaboração de uma distribuição dos diferentes pesos por áreas, aproveitando a discriminação que foi feita dos pesos por volumes compreendidos entre balizas e conveses. Este nível de detalhe permitiu a estimativa da resistência longitudinal com um nível de carregamento no módulo do casco modelado por MEF igual ao imposto.

Tabela 19 Valores de cargas agentes no modulo do casco para a condição de carga plena

Valores de carregamento agente no módulo do casco			Valores extraídos de tabela de pesos para condição de carga plena (full load)		
Pressão chapa do Fundo			Pressão chapa duplo Fundo		
Tanques	Capacidade	Pressão		Coluna	Pressão
	Toneladas	Pa		m	Pa
Tq Agua No 1(3-14-2-W)	4,42	7520,14	Corredor	0,20	1960,00
Tq Agua No 2(3-14-1-W)	4,42	7520,14	Praça de Maquinas	0,40	3920,00
Tq Agua No 3(3-17-2-W)	6,64	7531,48	Praça Geradores	0,40	3920,00
Tq Agua No 4(3-17-1-W)	6,64	7531,48	Sala de Controle Eng.	0,20	1960,00
Tq MGO No. 1(3-21-2-F)	6,67	7565,51	Banheiros	0,21	2058,00
Tq MGO No. 2(3-21-2-F)	6,67	7565,51	Cabinas	0,23	2254,00
Tq MGO No. 3(3-24-2-F)	6,67	7565,51	SSBB	1,00	9800,00
Tq MGO No. 4(3-24-1-F)	6,67	7565,51	Praça de Bombas Gasolina	0,50	4900,00
Tq MGO SD1	2,74	5383,21	Paiol Proa	1,00	9800,00
Tq MGO SD2	2,74	5383,21	Praça Maquinas Auxiliares	0,55	5390,00
Tq Jet A1	6,40	5411,43			
Box Cooler No 1(3-11-1-Q)	0,91	7017,63			
Box Cooler No 2(3-11-4-Q)	0,37	7109,80			
Box Cooler No 3 (3-11-3-Q)	0,34	6296,30			
Box Cooler No 4(3-11-8-Q)	0,30	7821,98			
Tq águas oleosas (3-11-6-F)	0,29	5463,28			
Tq águas pretas N1(3-13-1-K)	1,53	6941,67			
Tq águas pretas N2(3-13-2-K)	1,53	6941,67			
Cofferdam 3-26-0-V	6,05	6860,00			
Pressão chapa convés vôo			Pressão chapa convés principal		
	Coluna	Pressão		Coluna	Pressão
	m	Pa		m	Pa
Helicóptero	6,87	259126,90	Convés Livre	0,06	588,00
Convés livre	0,10	980,00	Lavanderia	0,30	2940,00
Camarim de comunicações	0,14	1372,00	C.Aprov. Helo	0,20	1960,00
Ponte Governo	0,14	1372,00	Cozinha	0,25	2450,00
			Armazenagem viveres	0,30	2940,00
			Refeitório	0,25	2450,00
			Freezer	0,50	4900,00
			Cabinas, Enfermaria, Cto	0,13	
			Radio		1274,00
			Armazém	0,40	3920,00
			Corredor	0,20	1960,00

Na Tabela 19 são apresentados somente valores de cargas participantes no módulo do casco, que representam cargas de pressão estáticas (Psta) agindo na área do chapeamento correspondente. No caso de tanques, cargas adicionais de pressão nas paredes laterais foram impostas. O cálculo do peso do aço foi computado discriminadamente na avaliação de pesos geral, mas no caso do módulo do casco uma carga inercial correspondente ao valor da gravidade está presente agindo em cada componente modelado em função de sua densidade. Como resumo geral, os pesos do Módulo do Casco são de 83,21 toneladas correspondentes aos elementos modelados; o valor dos pesos impostos por carregamento internos no modelo soma 168,73 toneladas. Estes dois valores totalizam 251,93 toneladas (região modelada) para uma condição de navegação máxima com um deslocamento de 385,20 ton.

A seguir, é ilustrada uma distribuição dos tanques de armazenamento de combustíveis e líquidos, assim como “cofferdams”, dos quais mais dos 90% de sua capacidade está incluída no módulo do casco.

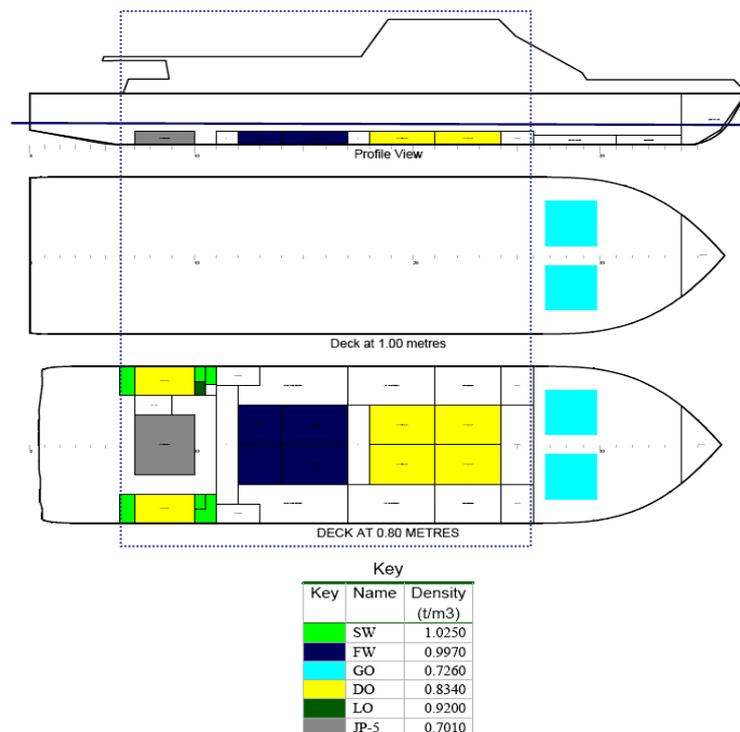


Figura 6-4 Distribuição de tanques geral do navio em estudo

A simbologia empregada é SW para água salgada, FW para água doce, GO para gasolina, DO para diesel, LO para lubrificantes e JP-5 para combustível de helicóptero. A distribuição geral do navio é apresentada no Apêndice VI.

6.3.2 Cargas Hidrostáticas

Em processos simplificados para definir os casos de carga, podem ser usadas as recomendações especificadas nas regras de Sociedades Classificadoras. Por outro lado, podem ser usados cálculos diretos de cargas e movimentos em ondas irregulares como aqueles baseados no domínio da frequência e avaliados com apoio do método espectral ou cálculos baseados no domínio do tempo. Em geral, casos de carga devem representar condições de carregamentos severos e padrões de onda críticos. Uma vez obtida a distribuição dos pesos, procedeu-se à avaliação da resistência longitudinal por meio do software Ship Hull Characteristic Program (SHCP) [31], que permitiu gerar as formas do casco e introduzir os valores de carregamento para as diferentes condições consideradas. Este programa desenvolve cálculos de carga, esforços cortantes e momentos fletores ao longo do comprimento do navio, em condições de águas tranquilas e condições de alquebramento e tosamento usando um padrão de onda trocoidal representado na Figura 6-5.

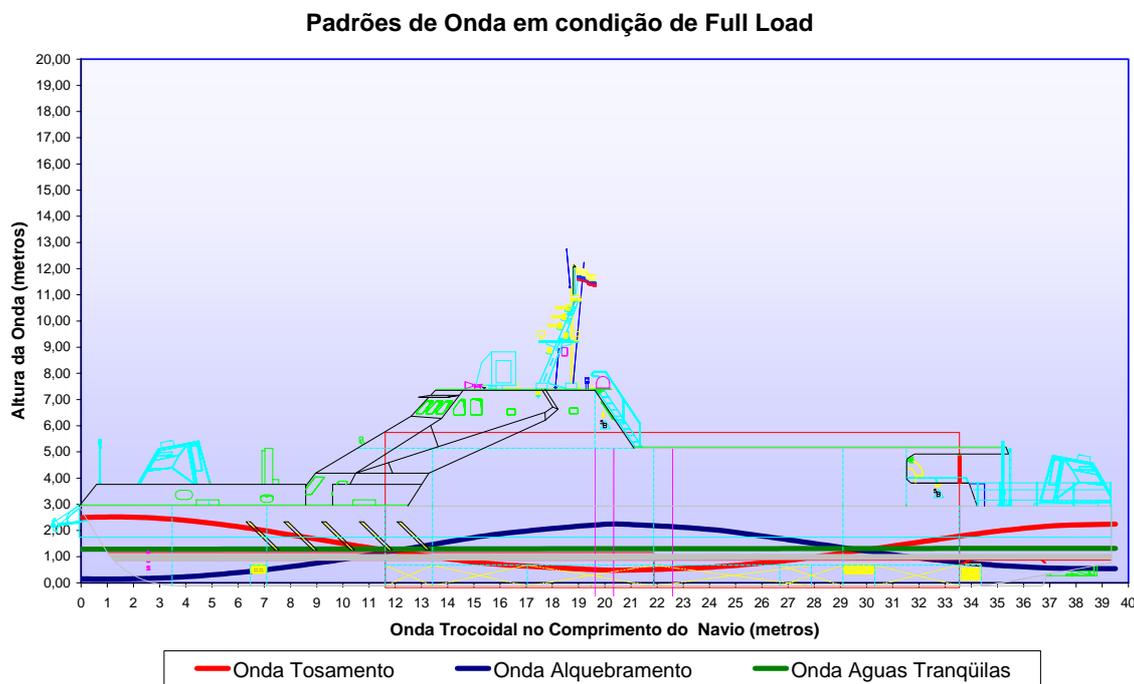


Figura 6-5 Padrões de ondas trocoidal em carga plena

Internamente no programa foram estabelecidas trinta e quatro balizas para gerar as formas do casco e se constituíram dez grupos de pesos ao longo do comprimento do navio, que agrupam os diferentes pesos correspondentes às balizas

em secções adjacentes e se estendem entre os limites extremos das formas do casco a proa e popa. Basicamente, para cada condição de carregamento avaliada para o navio em ondas, é gerada uma ordenada da onda em cada baliza, permitindo uma condição final de equilíbrio entre pesos e forças de flutuação. Foi usada uma onda trocoidal de altura de uma vigésima parte do comprimento entre perpendiculares igual a 1,86 metros.

A resistência foi estimada para quatro condições de carregamento do navio de acordo com o manual de estabilidade (peso leve, mínima condição de operação, carga plena e máxima condição de operação) e posicionando o centro da onda desde a perpendicular de proa em 3 posições ao longo do comprimento do navio em $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$, tanto para alquebramento como para tosamento. A Figura 6-5 representa o padrão de onda gerado na condição de carga plena com a onda no centro do LBP para as condições de tosamento e alquebramento. Depois da avaliação das diferentes condições de carga e de onda ao longo do comprimento do navio, foram obtidos valores máximos em condição de peso leve e carga plena com a onda na região média do navio. Os cálculos subseqüentes serão baseados nestas duas condições de operação. Os valores dos cortantes e momentos, para esta última estão representados em Figura 6-6 e Figura 6-7.

Curva de Esforços Cortantes

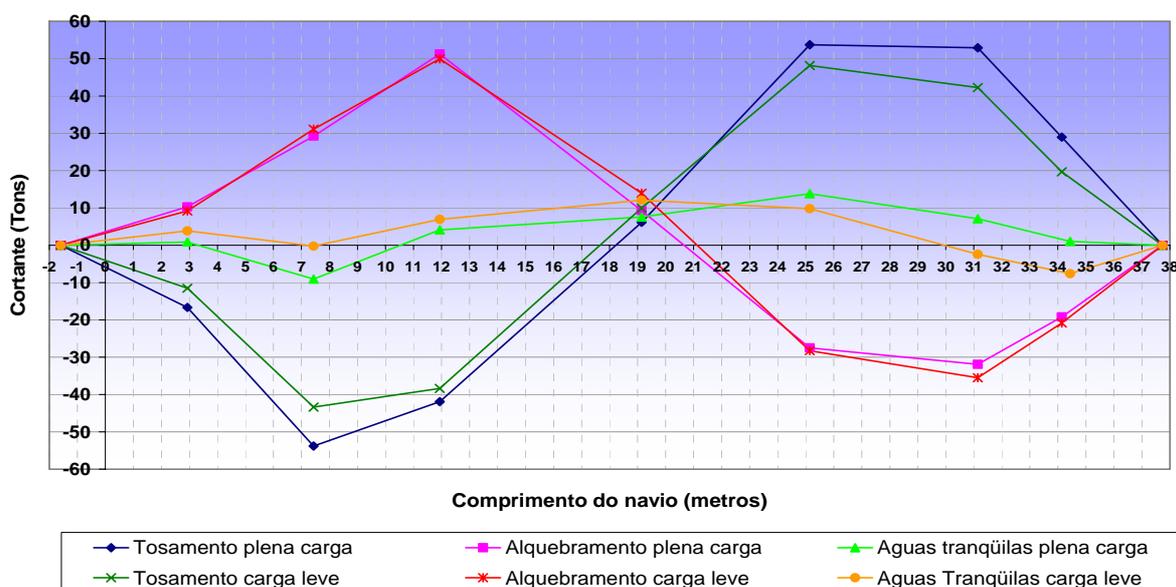


Figura 6-6 Forças cortantes resultantes para condição de “carga plena e carga leve”

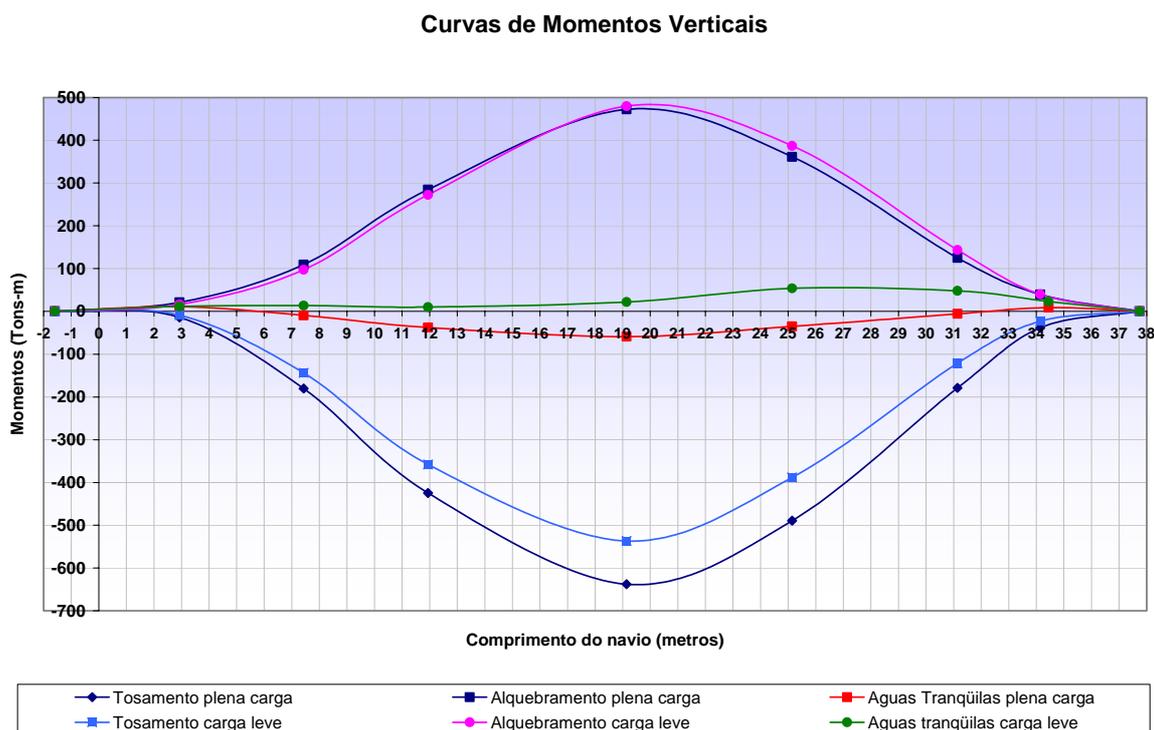


Figura 6-7 Momentos fletores verticais resultantes avaliação resistência longitudinal viga navio para condição “carga plena e carga leve”

6.3.3 Considerações de Carregamento Dinâmico

Como foi explicada no capítulo 2, a resposta dinâmica do navio em ondas é um problema muito complexo de analisar, seja pela quantidade de variáveis envolvidas no estudo ou pelas fortes relações não lineares existentes. O problema das cargas induzidas por ondas em um navio no mar consiste na determinação das condições dinâmicas de equilíbrio de forças e momentos que nele atuam, assim como a movimentação do corpo elástico num meio irregular de dois diferentes tipos (água e ar).

Atualmente existem ferramentas computacionais desenvolvidas com o objetivo de analisar o comportamento do navio em ondas. Um exemplo é o programa SCORES que avalia a resposta estrutural do navio em ondas aplicando a teoria de faixas (Strip Theory) e determina os momentos de flexão vertical e horizontal, assim como o momento de torção. Esta teoria de faixas analisa cada seção do navio como

parte de um cilindro de comprimento infinito com o propósito de calcular as forças hidrodinâmicas. Portanto, uma série de problemas individuais de duas dimensões pode ser resolvido separadamente e depois combinado para obter uma solução total. A idéia foi originalmente introduzida por Korvin-Kroukosky [41].

Recentemente, Marin [35] fez uma estimativa do momento fletor dinâmico para um navio tanque de 96 metros de comprimento utilizando o programa SCORES. Uma comparação com os valores de momento fletor proposto pela DNV, permite concluir que a Sociedade Classificadora apresenta uma margem de segurança de 20%, aproximadamente. Portanto, para determinar as forças e momentos dinâmicos é necessário resolver os movimentos⁵ acoplados do navio no plano vertical (afundamento e caturro) e horizontal (jogo, guinada e de través), cálculo que foge do escopo desta pesquisa.

Desta forma, serão impostos esforços suficientes para atingir o momento fletor vertical da Bureau Veritas exigido para o navio em estudo em uma condição de avaliação de águas profundas, levando em consideração que o presente trabalho não estima especificamente as diferentes forças e momentos dinâmicos que podem ocorrer na estrutura. No entanto, estimam-se seus efeitos (dinâmicos) são representados com segurança ao atingir valores críticos exigidos pelas Sociedades Classificadoras nos momentos verticais por onda. Deve-se destacar o fato de que, para navios menores a 65 metros, não existem formulações determinísticas disponibilizadas para considerar e avaliar citados efeitos dinâmicos, pois sua participação na estrutura não é de grande relevância, em função do seu comprimento.

6.4 Condições de Contorno

A avaliação da resistência longitudinal constitui uma fase importante dentro da modelagem do módulo do casco, ela estabelece os valores dos momentos fletores e

⁵ O movimento de avanço é normalmente considerado como não acoplado dos outros numa análise da resposta dinâmica do navio.

dos esforços cortantes existentes na área de corte do modelo, representando os efeitos das condições de contorno ou de fronteira.

As condições dos carregamentos para águas tranquilas, tosamento e alquebramento são efetuadas através da imposição de momentos e forças cortantes controlados e aplicados em todos os nós da extremidade do modelo considerado dentro da resistência longitudinal. Estes são aplicados em um ponto de referência e transmitidos a toda extremidade de carga. O ponto de referência foi posicionado no eixo neutro. Pela grande rigidez das anteparas constituindo os extremos do modelo assume-se que esta secção permanece plana e normal à linha neutra durante o carregamento. Mas especificamente para impor as condições de contorno no módulo do casco correspondentes aos momentos fletores e força cortante presente nas áreas de corte definidas nas anteparas sete (07) e vinte seis (26), foram usados elementos de restrição múltipla MPC-RBE1 da biblioteca de MSC. Nastran. O elemento estrutural RBE1 define um corpo rígido ligado a um número arbitrário de nós, sendo possível determinar um número arbitrário de termos dependentes. Cada termo consiste em um nó e uma lista de graus de liberdade. Igualmente, qualquer número de termos independentes pode ser determinado, se os graus de liberdade especificados em todos os termos independentes são iguais a seis.

Um nó independente foi gerado na linha neutra da secção dos extremos do modelo e este nó foi ligado a um elemento MPC-RBE1. Desta forma, foram designados como nós dependentes todos aqueles elementos próprios que contribuem na resistência longitudinal na área de fronteira (chapa de costado, convés, quilhas, longarinas, sicordas, longitudinais leves), como representado na Figura 6-8. Para os dois modelos construídos, as cargas nas áreas de corte, foram imposta para a viga caixão formada até o convés resistente, a fim de estabelecer um padrão de comparação na participação estrutural da superestrutura.

Para o elemento MPC-RBE1 independente foi imposto o valor do momento fletor vertical e da força cortante obtidos da avaliação da resistência longitudinal e avaliados para as condições estáticas (E), dinâmicas (D) e combinadas (E+D). Conseqüentemente todos os termos designados como dependentes foram influenciados pelos valores de momento e cortante de forma distribuída.

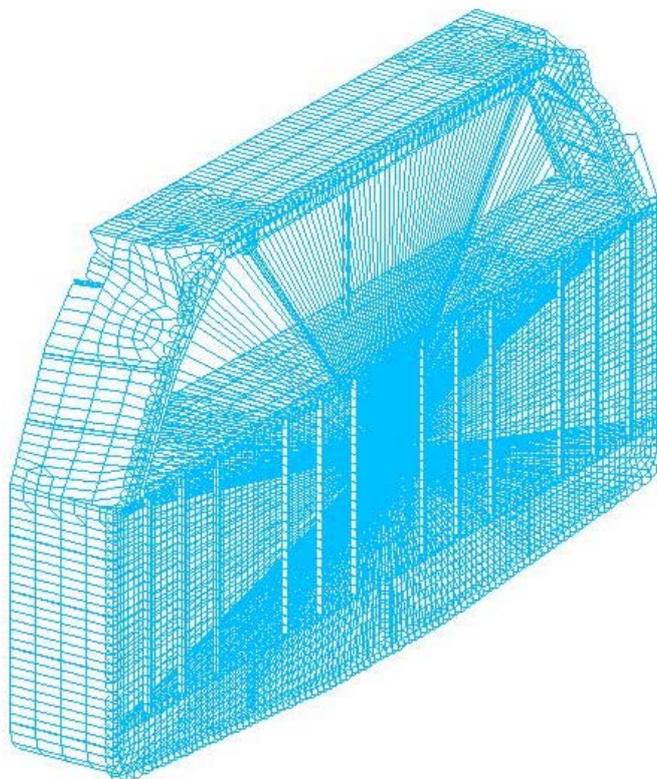


Figura 6-8 *Imposição de Momentos Fletores Verticais nas condições de contorno para o modelo com superestrutura.*

Uma avaliação do comportamento do MPC-RBE1 na forma como distribui os momentos de flexão e de forças cortantes foi feita para modelos simples de vigas formadas por elementos de viga e outro por elementos de casca sob a influência de momentos e/ou cortantes, comparando seus resultados com os valores teóricos da teoria de vigas e considerando seus resultados como satisfatórios.

6.5 Modelo Numérico da Viga Navio

Os esforços e deformações correspondentes ao navio podem ser classificados em função das condições da estrutura e da análise a ser desenvolvida como segue:

- Modelos globais do navio que permitem que carregamentos possam ser aplicados em forma realista, assim como as interações complexas da estrutura;
- Modelos parciais do navio, aplicáveis à análise de esforços globais e componentes primários estruturais, permitindo analisar o complexo comportamento tridimensional (Módulos do Casco);
- Modelos de grelhas aplicáveis à análise dos esforços de estruturas planas compostas por chapas reforçadas. O escopo da análise é a transferência de cargas laterais aos contornos das grelhas e seus respectivos esforços e deformações associadas;
- Modelos de cavernas usados para as análises dos esforços das estruturas agindo como vigas transversais no navio. O propósito é avaliar o comportamento à flexão das estruturas no plano transversal à viga navio;
- Modelos locais usados na avaliação dos esforços em elementos secundários e, também, em detalhes estruturais e descontinuidades para determinar concentrações ou incrementos nas tensões. Podem ser diferenciadas três classes de esforços: esforços máximos em “notch root”, esforços em “hot spot” definidos para juntas soldadas e esforços especiais para avaliação de “crack tips”[17].

Dentro do escopo do presente capítulo, serão avaliadas as tensões globais, as forças e as deformações resultantes na estrutura compreendida na região central do navio, que caracteriza a resistência longitudinal de forma geral. Este será representado em um módulo do casco, dentro de uma análise estática linear, assumindo linearidade geométrica (pequenas deformações dos membros em estudo) e linearidade do material (deformações presentes na faixa elástica). A avaliação considera a totalidade dos componentes estruturais primários longitudinais e transversais, assim como as anteparas transversais. Poucas simplificações físicas em relação ao modelo de elementos finitos e a estrutura real serão efetuadas (cortes de chapas para passagem de reforços, nível de detalhe na junta de borboletas, etc).

A análise pretende determinar o grau de influência que exerce a presença da superestrutura dentro da avaliação dos esforços solicitantes em nível primário no navio Nodriza. Para isto, as análises globais da resistência do navio serão

consideradas sobre dois modelos tridimensionais de elementos finitos representados na figura 6-9.

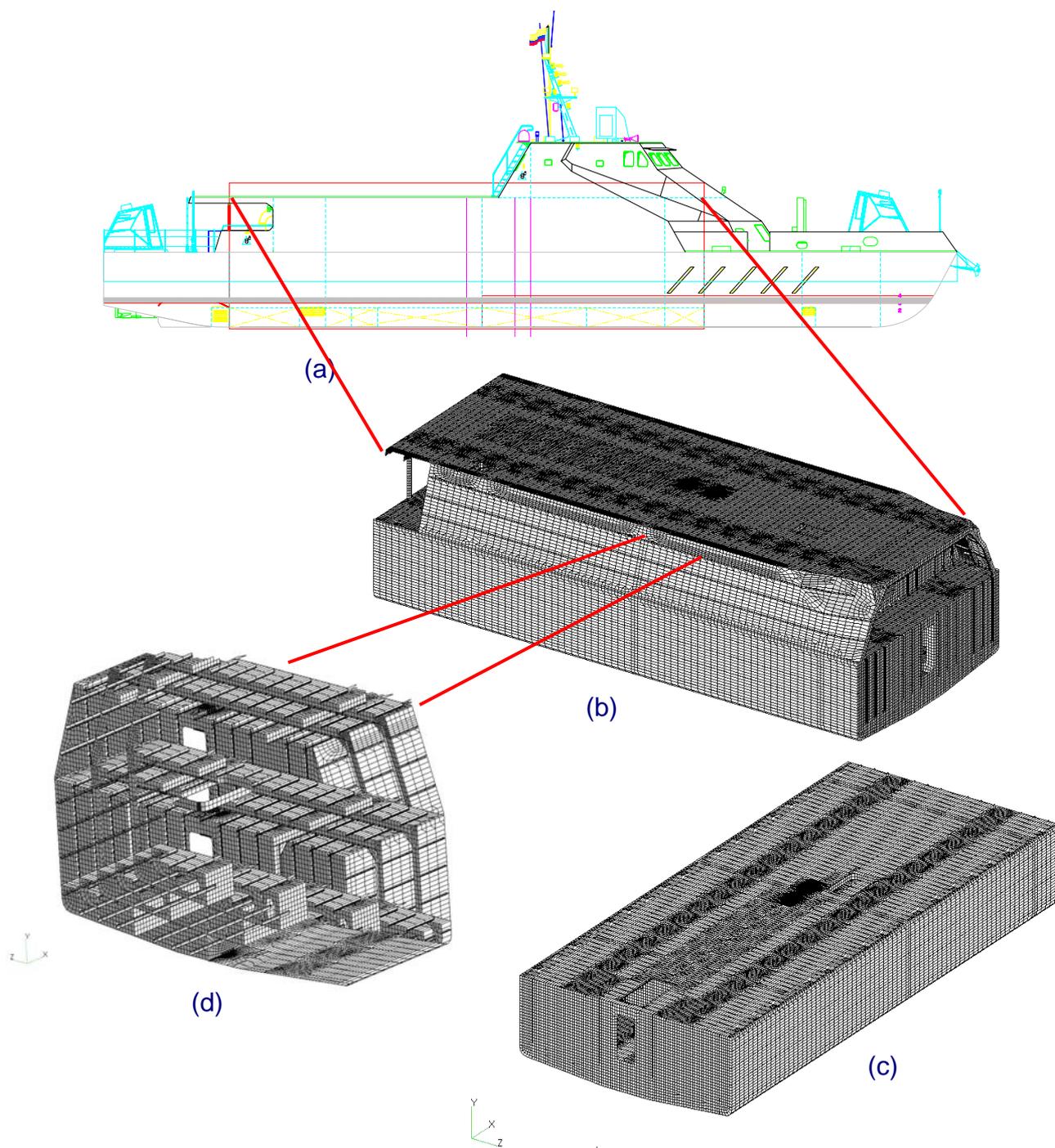


Figura 6-9 Módulo do casco em análise (a) Vista lateral do navio Nodriza demarcando extensão da região central para avaliação pelo MEF. (b) Módulo do casco com participação da superestrutura. (c) Módulo do casco sem superestrutura. (d) Detalhe da modelagem na secção central.

Um modelo constituído pela estrutura toda na região central conformando o navio até o convés de borda livre, neste caso coincidente com o convés resistente. Outro módulo do casco representando dentro da mesma região toda a estrutura até o convés da superestrutura constituindo o convés resistente. No sentido do comprimento, as anteparas localizadas em balizas 7 e 26 (ver Figura 6-10), foram selecionadas para delimitar a extensão do modelo e estabelecer as condições de contorno.

A partir destas considerações, explica-se o modelo numérico correspondente ao módulo do casco modelado. As cargas que são impostas nas condições de contorno do módulo e que são obtidas das análises da viga navio são os esforços na secção transversal na área de corte. Basicamente são impostas duas classes de esforços: esforços longitudinais agindo em direção normal à secção transversal e esforços cortantes agindo no plano da secção transversal. Em teoria, espera-se que o fato de aplicar estas forças externas nos contornos do modelo, poderia estabelecer uma condição de equilíbrio se estas forças sem imprecisões representassem os efeitos para o resto do navio. Mas, é esperado que não exista equilíbrio e algumas restrições tenham que ser impostas para evitar a movimentação de corpo rígido.

A imposição de suportes negando deslocamentos ou rotações serve para suprimir a movimentação do corpo rígido, assim como avaliar a interação com áreas estruturais adjacentes. Em todo caso, é garantido que citados suportes não causaram uma restrição irreal às translações ou rotações e, para isto, os suportes têm que estar arrançados com espaçamentos longos entre eles, tanto quanto possível. As forças geradas em citados suportes podem ser eliminadas através da geração de cargas de balanceamento. Condições de suporte geram reações que devem ser verificadas para determinar se os valores das forças e momentos presentes podem ser desprezados ou estão afetando a área em avaliação.

A Figura 6-10 representa o modelo numérico do módulo do casco correspondente a uma secção da viga navio constituída pelo casco e superestrutura e onde os diferentes esforços agindo na estrutura estão representados estabelecendo uma condição de equilíbrio.

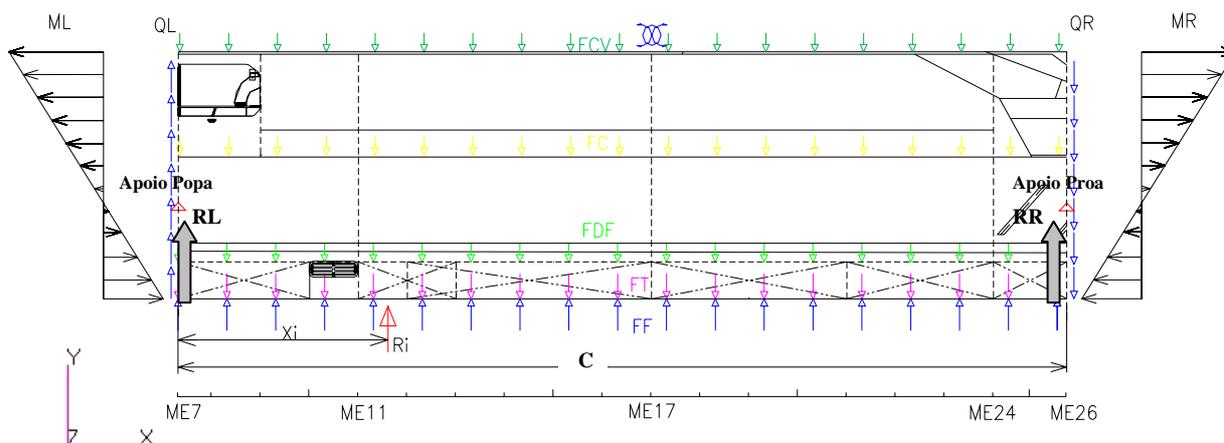


Figura 6-10 Modelo Numérico da Viga Navio para Resistência Longitudinal

Onde,

- QL e QR : Forças cortantes a popa e proa respectivamente
 ML e MR : Momentos fletores verticais a popa e proa
 R_i : Força resultante vertical agindo a uma distancia X_i
 X_i : Distancia a partir da popa do modelo
 FF : Forças de flutuação.
 FT : Pesos agindo no fundo
 FDF : Pesos agindo no duplo fundo
 FC : Pesos agindo no convés de borda livre
 FCV : Pesos agindo no convés de vôo
 RL : Reação dos apoios de popa $U_y = U_z = 0$
 RR : Reação dos apoios de proa $U_x = U_y = 0$

Para este caso, forças de corte (QL e QR) e momentos fletores (ML e MR) obtidos da avaliação da resistência longitudinal são impostos a proa e popa, estabelecendo a condição mais desfavorável e próxima a uma condição de equilíbrio do modelo. No modelo apresentado na Figura 6-10, R_i , representa a força resultante vertical agindo a uma distância X_i , a partir da popa do modelo, produto dos diferentes pesos e da flutuação agente nesse ponto, de acordo com a equação (6.4). Os valores RL e RR das reações dos suportes serão considerados quando X_i corresponda à avaliação em qualquer um dos pontos de suporte.

$$\sum Ri = FFi - FDFi - FCi - FCVi \quad (6.4)$$

Se o momento ML e a Força cortante QL são especificados para o contorno a popa do modelo, as forças e momentos seccionais no contorno à proa são obtidos por:

$$MR = ML - QL \times C - RL \times C - \sum [Ri(C - Xi)] \quad (6.5)$$

$$QR = QL + RL + RR + \sum Ri \quad (6.6)$$

Quatro suportes estão localizados à altura do eixo neutro (calculado) nas chapas de costado a proa e popa e estão definidos com graus de rotação livres, porém as translações à popa são nulas para $Uy = Uz = 0$; e a proa é nula para $Ux = Uy = 0$, afim de evitar o movimento de corpo rígido. Posteriormente, será visto que os valores das reações nodais são desprezíveis para os eixos “X” e “Z”. As reações no sentido vertical “Y” possuem um valor que representa alterações nas tensões das áreas próximas dos pontos de suporte. No entanto, este desequilíbrio gerado das diferenças entre as forças verticais é compensado. As potenciais diferenças são geradas por imprecisão na avaliação inicial das forças cortantes obtidas da resistência longitudinal e impostas no modelo, assim como pelas possíveis imprecisões dentro da modelagem da onda e dos pesos internos no navio. As diferenças em forças verticais são determinadas considerando os valores obtidos nas reações nodais dos pontos de suporte. Para estabelecer uma condição próxima ao equilíbrio e minimizar as reações no sentido vertical, uma força de compensação às forças cortantes nos contornos é imposta eliminando pontos de concentração de tensões nas áreas próximas aos apoios e garantindo o equilíbrio estático do modelo.

Os valores correspondentes aos momentos e forças cortantes impostos nos modelos são representados pelas seguintes condições: estática (E), dinâmica (D) e de efeitos combinados (E+D). A Tabela 20 sumariza de forma geral os principais esforços solicitantes agindo no módulo do casco e que constituem as diferentes cargas presentes no modelo numérico antes descrito e que formam o critério para a avaliação da resistência estrutural do navio.

Tabela 20 Resumo geral de esforços agentes no módulo do casco

Componente de Carga/Combinação de Carga	E	D	E+D
Momento Vertical Total (ML+MR)	Msw	Mvw	Msw + Mvw
Momento Horizontal Total (MH)*	-	Mhvw*	Mhvw*
Força Cortante (QL +QR)	Qsw	Qvw	Qsw+Qvw
Pressão Externa do Casco (FF)	Phs	Phd	Phs+Phd
Pressão Interna tanques (FT)	Pint	Pint	Pint
Pressão Convéses (FDF, FC, FCV)	Psta	Psta	Psta

*Carga solicitante considerada nos efeitos estruturais particulares, mas não levada em conta dentro da avaliação da influência da superestrutura na resistência longitudinal.

Onde,

- Msw : Momento em águas tranqüilas
- Mvw : Momento vertical de onda mínimo requerido por Sociedade Classificadora (BV)
- Mhvw : Momento horizontal requerido por Sociedade Classificadora (BV)
- Qsw : Força cortante em águas tranqüilas
- Qvw : Força cortante para navio em alquebramento ou tosamento
- Phs : Pressão hidrostática nas chapas externas do casco em condição estática (E)
- Phd : Pressão hidrodinâmica nas chapas externas do casco com navio entre ondas (D)
- Pint : Pressão interna em tanques
- Psta : Pressão estática agente nos convéses e duplo-fundo.

A tabela anterior permite a apreciação das diferentes cargas que estão sendo levadas em conta dentro da avaliação de cargas combinadas (E+D), dentro do processo racional implementado para obter a resposta estrutural adequada na análise do módulo do casco ante os diferentes esforços solicitantes. No entanto, deve ficar entendido que para esta condição, onde efeitos de águas tranqüilas são somados aos efeitos de onda (explicada no capítulo da determinação de esforços, 6.3), particularmente, as unidades do chapeamento externo do casco vão ser submetidas simultaneamente às cargas de pressão hidrostáticas e hidrodinâmicas. Isto vai gerar cargas de pressão nas chapas do fundo superiores às cargas geradas por uma onda nas condições de alquebramento ou tosamento, portanto, incrementando significativamente a pressão e, conseqüentemente, as tensões de ponto nos painéis do fundo, onde para uma área mais crítica, ocorre uma pressão externa equivalente à pressão gerada para uma coluna de água igual ao pontal do navio.

7 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA LONGITUDINAL

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos da avaliação estrutural do Navio Nodrizza da Marinha Colombiana por meio da análise de dois módulos do casco, que representam o estudo do comportamento desse navio experimentando ciclos de águas não abrigadas. As análises são desenvolvidas com o propósito de determinar a influência que tem a casaria do convés nos diferentes componentes estruturais, especialmente no processo de avaliação da resistência longitudinal do navio. Portanto, uma avaliação baseada só nos critérios permissíveis para escoamento será desenvolvida para determinar se os níveis de esforços presentes no navio Nodrizza, podem ser considerados seguros. Para a análise do módulo do casco três critérios são importantes para uma “Avaliação Total da Resistência”: escoamento, flambagem e fadiga, como são especificadas pelas diferentes Sociedades Classificadoras dentro de uma análise estrutural [22], [23], [29], [38]. Critérios de flambagem e fadiga não são avaliados dentro do escopo do presente trabalho.

Também estará em destaque o fato de ser considerada a superestrutura dentro da modelagem dos módulos do casco, permite obter uma resposta mais acurada do comportamento estrutural do navio, sendo encontradas diferenças amplas e significativas perante os mesmos esforços solicitantes.

A Tabela 21 sumariza as diferentes avaliações realizadas previamente que permitiram determinar a condição de navegação mais crítica para o navio, constituindo-a como referência para estabelecer a influência da superestrutura no comportamento estrutural. Inicialmente, foi efetuada uma análise quase estática para o navio pousado entre ondas nas quatro condições de operação propostas pelo construtor, sendo obtidos os maiores valores de esforços nas condições de “Carga Leve” e “Carga Plena” dentro da avaliação da resistência longitudinal. Essas condições foram estabelecidas para serem estudadas mediante módulos do casco. Posteriormente, módulos do casco com e sem superestrutura foram desenvolvidos representando citadas condições, permitindo apreciar maiores tensões e deformações na condição avaliada como Carga Plena.

Tabela 21 Tabela resumo das avaliações consideradas

Condição/Caso	Águas tranquilas			Alquebramento			Tosamento		
	SHCP	ACR	MEF	SHCP	ACR	MEF	SHCP	ACR	MEF
Carga Leve	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Mínima Condição de Operação	SIM		-	SIM		-	SIM		-
Carga Plena	SIM		SIM	SIM		SIM	SIM		SIM
Máxima Condição de Operação	SIM		-	SIM		-	SIM		-

Onde,

SHCP: Avaliação quase estática da resistência longitudinal mediante o uso do software Ship Hull Characteristic Program para diferentes posições de onda no comprimento.

ACR: Análise Convencional por Regras de Sociedades Classificadoras considerando três condições possíveis de navegação: Águas Abrigadas, Águas Costeiras e Águas Não Restritas.

MEF: Análise de um Módulo do casco maior dos 50% do navio conformado na secção media mediante o uso dos Métodos de Elementos Finitos usando o programa MSC. Patran e Nastran.

Dentro desta mesma condição de carga plena foi estabelecida como mais crítica aquela conformada por cargas combinadas em alquebramento (E+D).

7.1 Validação do Modelo

O processamento deve ser feito, uma vez que o módulo do casco foi desenvolvido de acordo com os critérios descritos no capítulo anterior. A resposta deverá indicar ou demonstrar que o modelo está construído adequadamente e o processo de avaliação estrutural oferece suficiente precisão para tornar os resultados plausíveis.

As formas e proporções deste navio fazem deste um caso particular, assim como a atual avaliação que permite estudar a conveniência para operação em águas não restritas, após ser projetado inicialmente para águas abrigadas. Considerado pioneiro dentro do seu gênero, este navio não tem semelhante e, principalmente, não possui estudos do comportamento estrutural ou que abordem as mudanças de um critério inicial de navegação fluvial para águas não abrigadas. Portanto,

estabelecer padrões de comparação com navios semelhantes não é plausível para o presente trabalho, dentro da pesquisa do autor.

Para garantir que os resultados finais obtidos dos módulos do casco possam ser considerados, uma visualização e verificação geral serão efetuadas para determinar a magnitude e distribuição das deformações e tensões em resposta aos diversos esforços solicitantes, que se encontram numa margem esperada. Também serão consideradas as condições de contorno, de suporte e carregamentos. Os esforços são avaliados com relação aos critérios que a seguir serão definidos como permissíveis, segundo o caso em análise. Igualmente, mudanças dos esforços entre os centros e bordos dos elementos serão levadas em consideração, permitindo apreciar efeitos por carregamentos locais, juntamente com as simplificações relacionadas ao modelo real que foram usadas na sua criação [23].

7.1.1 Critérios para Avaliação da Resistência

Para iniciar a verificação prévia do modelo de elementos finitos, a seguir se estabelecem os valores determinados como permissíveis para os esforços, em função das propriedades do material. Para a avaliação geral, será considerado o mínimo valor de escoamento dos dois materiais presentes no navio e representado pelo aço 131 grado A, sendo este de 235 N/mm².

Valores proporcionados pela IACS-DNV nas regras comuns para Navios petroleiros do ano 2006 [23], especialmente direcionadas à análise de modelos de MEF apresentam diferentes critérios de avaliação para os esforços permissíveis em função do escoamento, flambagem e fadiga. De forma geral, para avaliação do critério de escoamento da IACS-DNV para as condições de cargas “Estáticas” e combinadas “Estáticas + Dinâmicas” como é o caso em estudo, os fatores de segurança estão representados na Tabela 22. Para os elementos de casca (Shell) modelados do navio Nodriza é determinado em geral um fator de uso (λ_y), em função do critério de escoamento:

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{\sigma_{yd}} \quad (7.1)$$

Para os elementos de viga em geral é:

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{rod}}{\sigma_{yd}} \quad (7.2)$$

Onde,

σ_{vm} Esforços de Von Mises calculados nas tensões de membrana (N/mm²)

σ_{rod} Esforços axiais em elementos de viga (N/mm²)

σ_{yd} Esforço de Escoamento especificado como mínimo (235 N/mm²)

Tabela 22 Máximos fatores de uso e esforços combinados permissíveis para avaliação da resistência por escoamento, IACS-DNV[23]

Componente Estrutural	Combinação Estática (E)	Combinação estática + Dinâmica (E+D)
Estrutura interna em tanques		
Chapeamento de todos os membros estruturais não estanques, estrutura de cavernamento transversal, hastilhas, longarinas, quilhas e reforços	$\lambda_y \leq 0.8$ 188 N/mm ²	$\lambda_y \leq 1.0$ 235 N/mm ²
Estrutura Sobre fronteiras dos Tanques		
Chapas de convés, costados, anteparas longitudinais, bojo, hastilhas solidas, longarinas e reforços.	$\lambda_y \leq 0.72$ 169 N/mm ²	$\lambda_y \leq 0.9$ 211 N/mm ²
Chapa do duplo fundo, fundo, anteparas transversais.	$\lambda_y \leq 0.64$ 150,4 N/mm ²	$\lambda_y \leq 0.8$ 188 N/mm ²

Outros valores determinados como permissíveis da Sociedade Classificadora Bureau Veritas foram apresentados na Tabela 5 do capítulo 5, correspondentes aos valores limites estabelecidos dentro da avaliação do projeto estrutural. No entanto, o critério a usar será o determinado pela IACS-DNV para uma combinação E+D por ser orientado especificamente à análises por meio do MEF.

7.1.2 Avaliação da Resposta Global em Condição de Cargas Combinadas E+D

Quando uma análise pelo MEF tem lugar no estudo de um navio, as tensões de flexão e os padrões de deflexão do navio a nível primário observam um comportamento de acordo com a teoria clássica de vigas. Portanto, os valores obtidos do Módulo do casco a nível global podem ser associados e referenciados para verificar sua plausibilidade. Como foi estabelecida neste estudo a condição de carga (E+D) está conformada pela combinação de valores máximos permissíveis para águas tranquilas, conformando a condição estática (E) e os valores máximos permissíveis para cargas combinadas obtidos da avaliação na condição do navio entre ondas (D).

A seguir são apresentados os resultados gerais da avaliação das tensões de Von Mises na totalidade do modelo (com e sem superestrutura), para a condição estática (E). Esta condição será apenas indicada no presente capítulo mediante as Figura 7-1 e Figura 7-2, pois como foi explicada e referenciada na Tabela 20, ela está incluída dentro da condição de cargas combinadas (E+D), que é mais severa e se constitui na condição para verificar a influência da superestrutura no comportamento estrutural do navio.

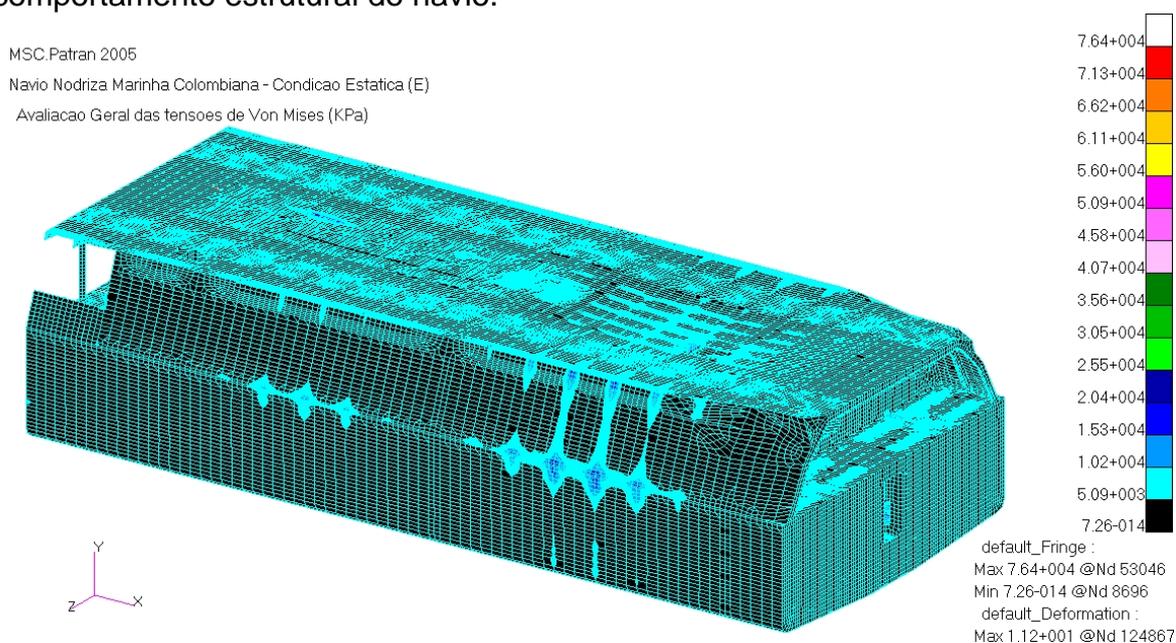


Figura 7-1 Avaliação geral das tensões de Von Mises para o Módulo do Casco com superestrutura na condição estática (E)

Embora valores elevados possam ser apreciados nas escalas dos diferentes modelos, estes correspondem aos pontos críticos que não denotam o comportamento geral da estrutura. Estes pontos serão estudados na condição (E+D) mais detalhadamente. Nos dois casos, os valores correspondentes às tensões de Von Mises para o navio em geral com e sem superestrutura encontram-se dentro dos limites permissíveis para a análise por escoamento.

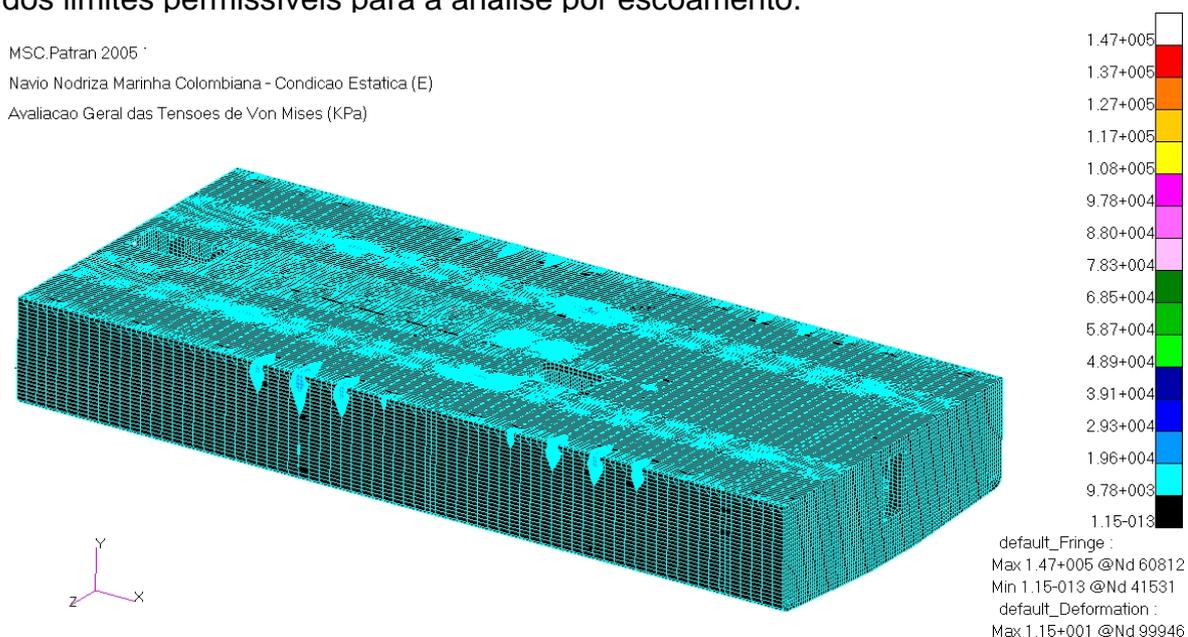


Figura 7-2 Avaliação geral das tensões de Von Mises para o Módulo do Casco sem superestrutura na condição estática (E)

Para ambas as análises, o maior valor está concentrado nas áreas das borboletas suportando vau de cavernas a proa da secção central, identificáveis nos gráficos anteriores para as áreas de maior tensão próximas aos trincanis (junta da chapa do casco com convés de borda livre). As deflexões primárias para o navio com superestrutura na região central correspondem a 0,048 mm (avaliadas parte inferior chapa de costado, baliza 17) e para o navio sem superestrutura a deflexão corresponde a 0,754 mm (avaliadas parte inferior chapa de costado, baliza 17). É possível apreciar maiores valores nas tensões de projetos avaliadas globalmente para o caso do navio sem superestrutura, quando comparados as diferentes áreas do modelo com superestrutura.

Para estabelecer a condição dinâmica (D), os procedimentos e considerações calculadas permitiram atingir os níveis exigidos para uma avaliação estrutural apropriada. Posteriormente, serão mencionadas as principais considerações que

garantem que a estrutura está sendo exigida adequadamente nas condições de estudo. Para a condição de navio entre ondas, às estruturas modeladas (MEF), são impostas as diferentes cargas solicitantes agindo de acordo a cada condição de navegação. Entre estas cargas estão os esforços correspondentes aos momentos verticais por onda obtidos da avaliação da resistência longitudinal usando SHCP [31] para as condições de alquebramento e tosamento em carga plena e leve, assim como as forças cortantes presentes nas áreas de corte, que são impostas como condições de fronteira nos módulos do casco.

Considerando que a estrutura deve atingir níveis de esforços suficientes para sua avaliação em uma condição crítica de onda, esforços de flexão vertical adicionais são introduzidos nas condições de fronteira, com o objetivo de atingir os critérios requeridos pela Sociedade Classificadora Bureau Veritas no que se refere aos momentos verticais. As Figura 7-3 e Figura 7-4 permitem apreciar os níveis de esforços atingidos para as duas condições de navegação avaliadas (Carga Plena e Carga Leve).

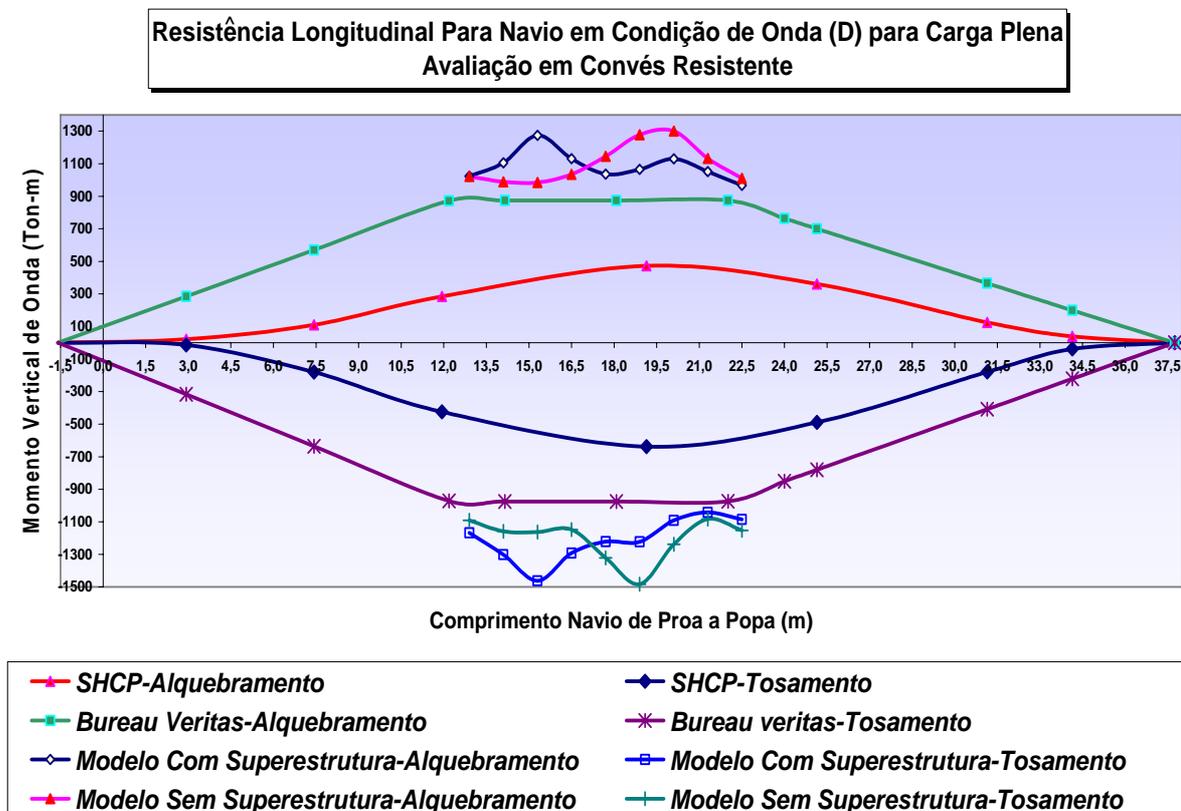


Figura 7-3 Níveis de esforços atingidos no Módulo do Casco para avaliação da Resistência Longitudinal presente e exigida pela norma Bureau Veritas a nível primário para o navio entre ondas. Condição de operação a carga plena.

Nas figuras 7-3 e 7-4 são indicados os níveis de esforços obtidos dentro da avaliação da resistência longitudinal (SHCP) e impostos inicialmente nos modelos. Assim, são indicados os níveis totais requeridos pela norma Bureau Veritas para navios menores que 65 metros para uma avaliação estrutural primária. Finalmente, são mostrados os níveis de esforços primários atingidos no modelo após imposição dos esforços de flexão adicionais para uma condição de onda (Alquebramento).

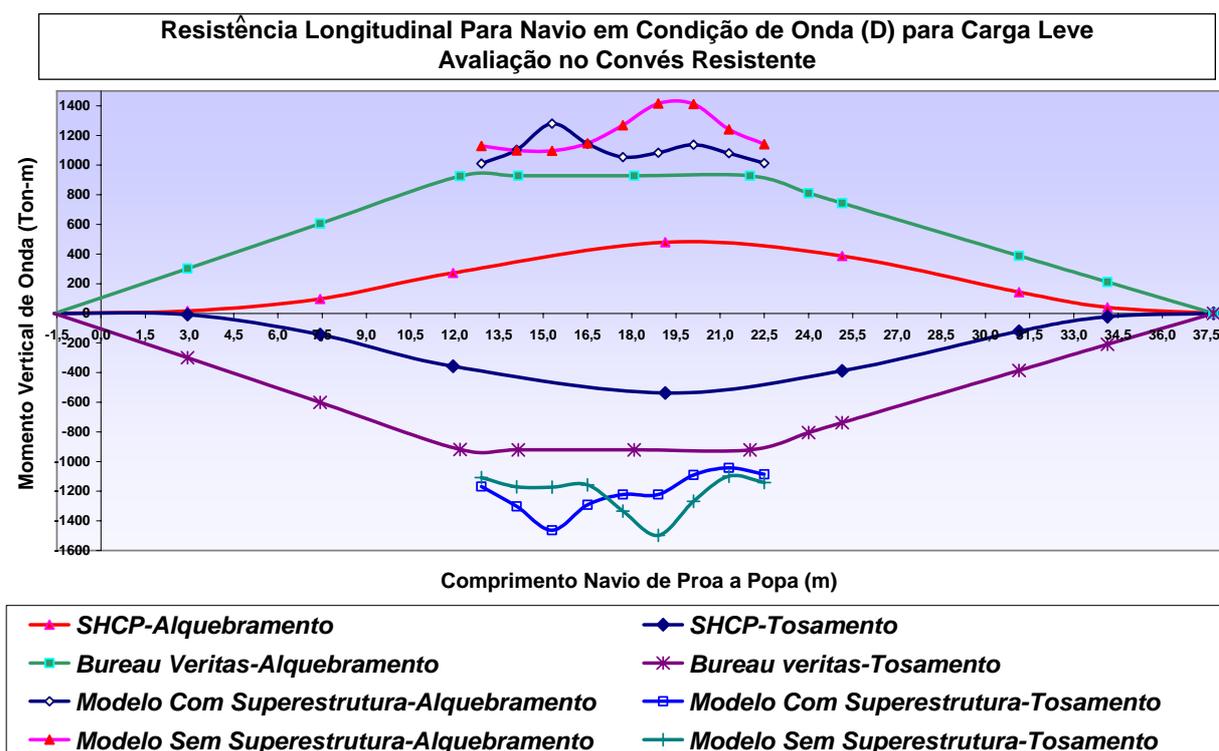


Figura 7-4 Níveis de esforços atingidos no Módulo do Casco para avaliação da Resistência Longitudinal presente e exigida pela norma Bureau Veritas a nível primário para o navio entre ondas. Condição de operação a carga leve.

Levando em consideração que os esforços avaliados nos elementos do chapeamento podem ser influenciados pelos diferentes carregamentos locais agindo nas chapas, portanto, gerando efeitos secundários e terciários dentro da avaliação das tensões longitudinais, os esforços primários são avaliados de forma que, citados efeitos sejam minimizados, como será discutido doravante na seção 7.2 deste capítulo.

Com o propósito de conferir o comportamento da estrutura e os níveis de tensões primários atingidos em função dos esforços de flexão vertical impostos nas

condições de fronteira, uma avaliação da condição do módulo do casco submetido somente aos esforços de flexão para uma condição de navegação (E+D) em carga plena é apresentada na Figura 7-5 (flexão pura). Para esta avaliação são desprezadas todas as cargas aplicadas ao modelo, incluído aquelas hidrostáticas que geram esforços primários pelas condições de tosamento e alquebramento produto do passo do navio através das ondas.

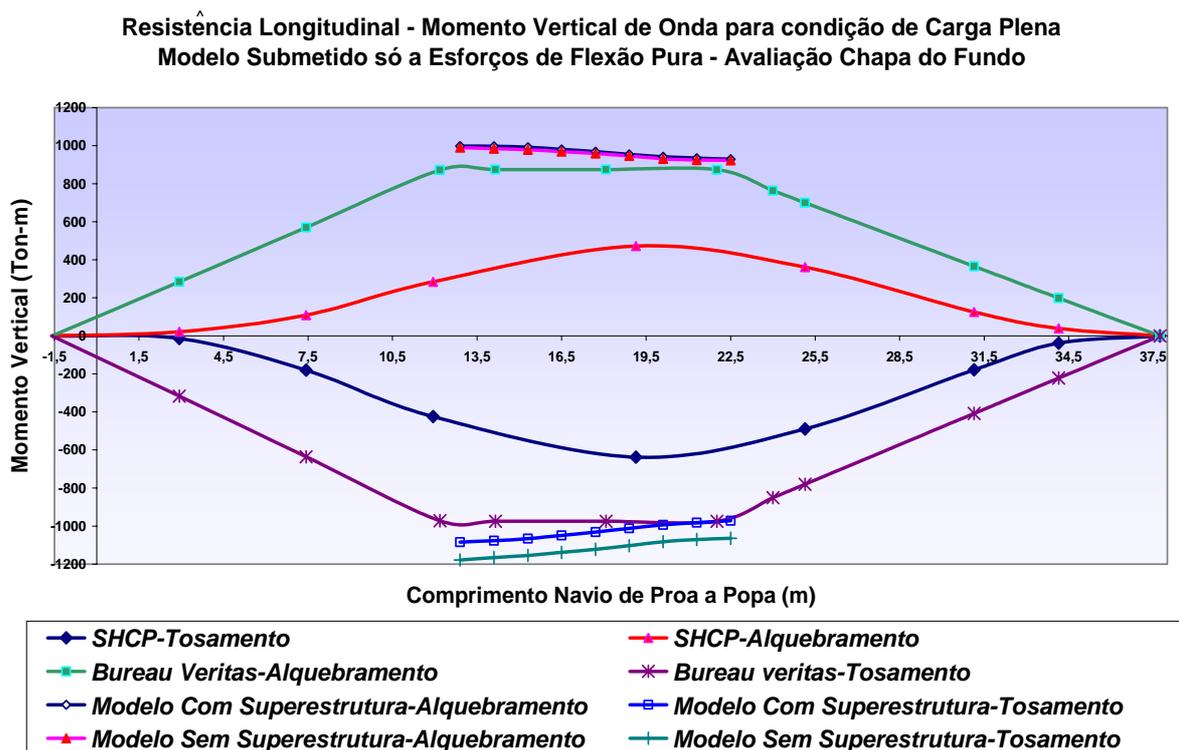


Figura 7-5 Avaliação da Resistência Longitudinal presente e exigida pela norma BV a nível primário para condição de operação carga plena.

Para esta avaliação fica evidenciado que os níveis de tensões longitudinais correspondem exclusivamente a efeitos primários, sem perturbação das tensões secundárias ou terciárias, produzidas pelas cargas laterais agindo nos painéis enrijecidos. Assim, é evidente que os níveis de esforços impostos nas condições de fronteira para atingir os critérios da Sociedade Bureau Veritas são satisfatórios igualmente nesta avaliação, caso se desprezem os efeitos do peso da estrutura e demais cargas internas e externas agentes.

Considerando a mesma condição de carregamento antes explicada (flexão pura) e para dar uma visão inicial da influência da superestrutura e seus efeitos na

resistência longitudinal do navio, especialmente nas unidades do chapeamento externo, as Figuras 7-6 e Figura 7-7 apresentam os esforços longitudinais dos dois módulos só sob esforços de flexão, produto dos momentos verticais estabelecidos para uma condição de alquebramento. Para melhor compreensão, os dois módulos do casco possuem a mesma escala, no entanto, os níveis atingidos para o modelo sem superestrutura são maiores que aos do modelo com superestrutura.

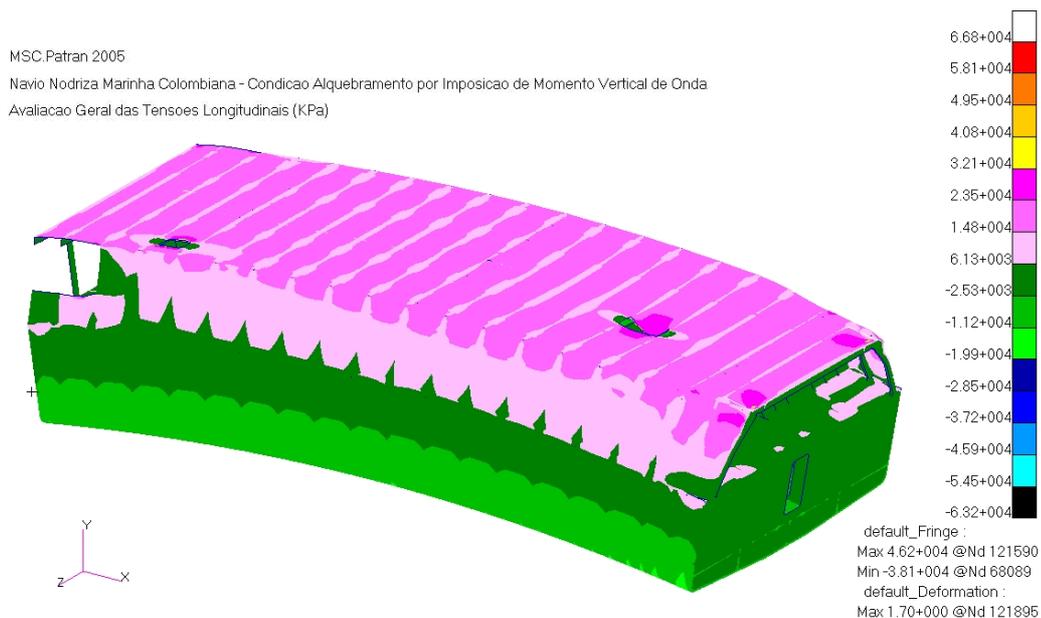


Figura 7-6 Avaliação geral das tensões longitudinais para o módulo do casco com superestrutura na condição de alquebramento pela imposição de momento vertical de onda.

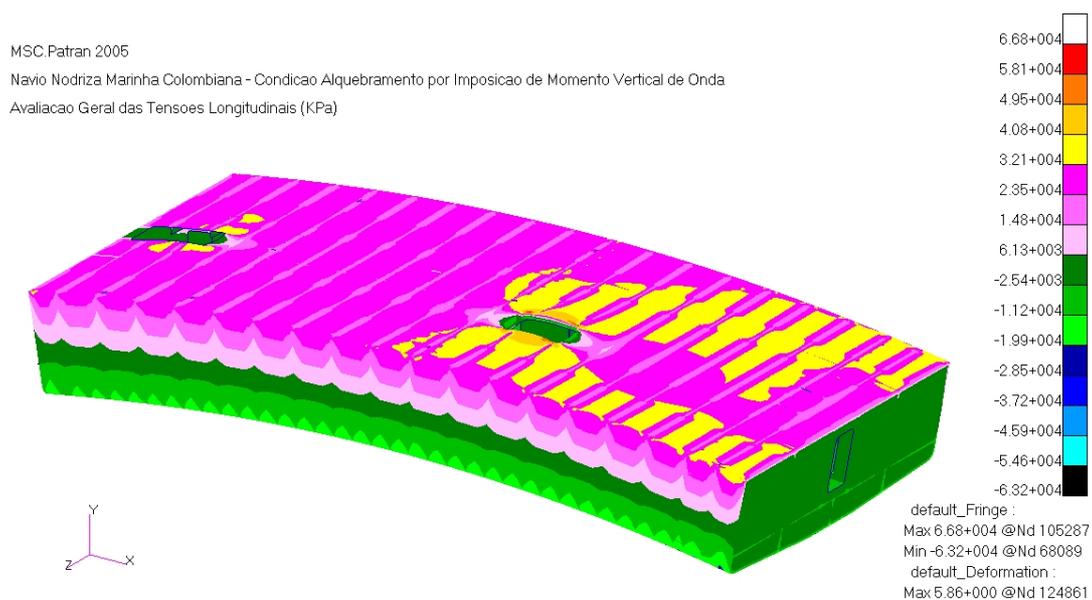


Figura 7-7 Avaliação geral das tensões longitudinais para o módulo do casco sem superestrutura na condição de alquebramento pela imposição de momento vertical de onda.

Nas figuras anteriores podem ser apreciados claramente os efeitos da viga navio sob esforços de flexão pura; conveses resistentes sob tração e fundo a compressão, esforços próximos de zero para toda a extensão do “eixo neutro” do modelo, assim como as alterações dos esforços longitudinais nas áreas de escotilhas, com incrementos destes nos costados paralelos aos reforços e uma redução próxima de zero nas áreas transversais aos reforços.

Uma combinação dos casos estáticos e dinâmicos (E+D) permite estabelecer a condição para a qual a estrutura esta sendo mais exigida. Estabelecidas as diferentes combinações de carga, novamente são avaliados os momentos na região média do navio, comparando seus valores com os momentos totais para avaliação estrutural da resistência longitudinal exigidas pela Sociedade Classificadora Bureau Veritas. Para isto, os momentos são avaliados igualmente para a região central, o que permite determinar a combinação de carga (E+D) em alquebramento como mais crítica como é indicado nas Figura 7-8 e Figura 7-9, enquanto que para a condição (E+D) em tosamento pode ser vista uma redução significativa dos esforços.

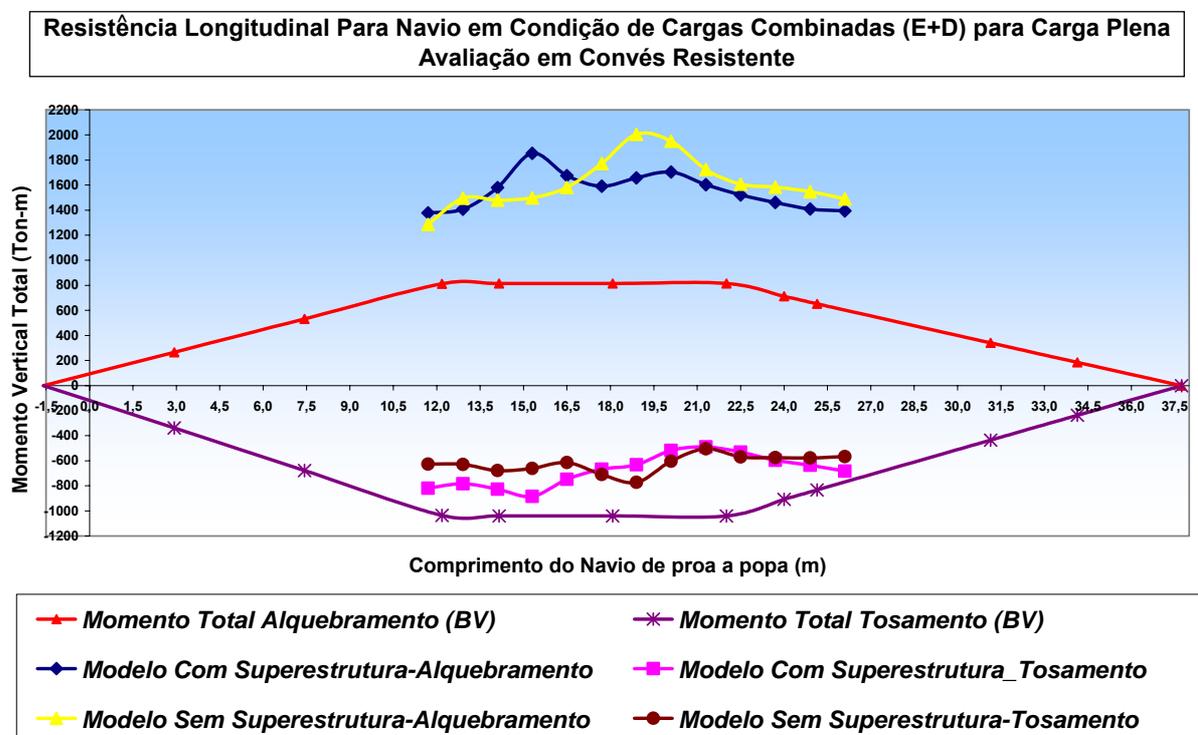


Figura 7-8 Avaliação da resistência longitudinal geral para a condição de carga plena.

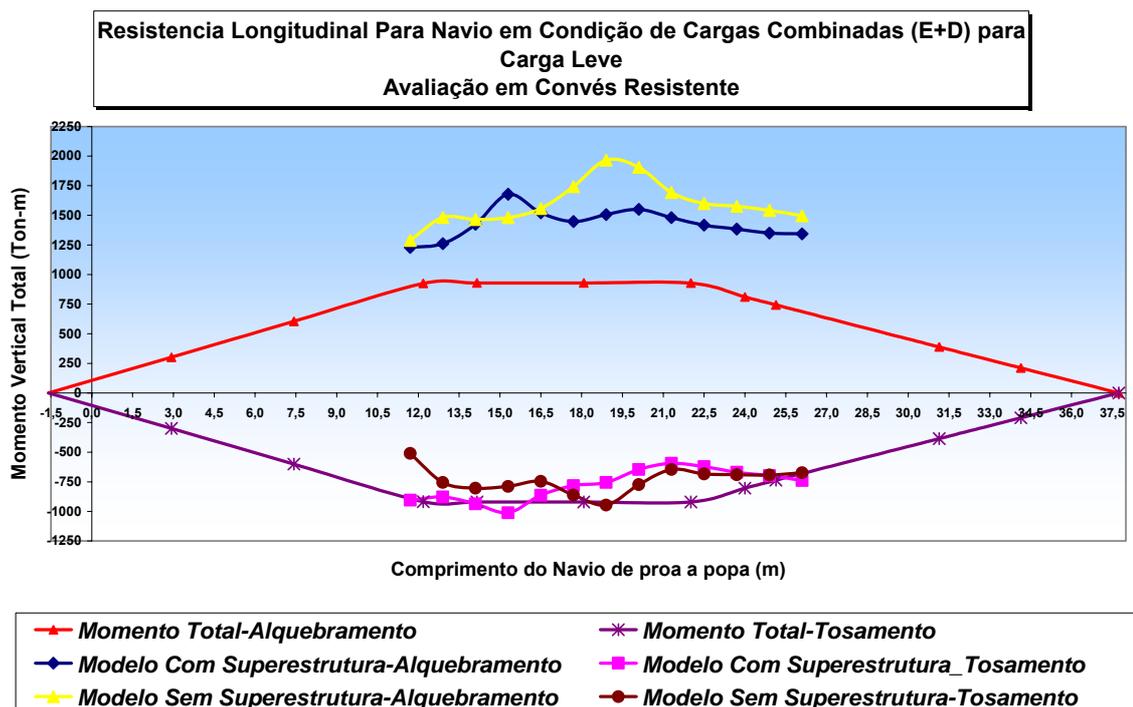


Figura 7-9 Avaliação da resistência longitudinal geral para a condição de carga leve.

Garantido que a estrutura está sendo submetida a um carregamento solicitante suficiente para avaliar um comportamento estrutural em situações críticas, a estrutura será avaliada para a Condição (E+D) para carga plena em alquebramento. A seguir, apresentam-se os resultados gerais dos dois modelos em estudo, que serão analisados para conferir que a resposta global dos módulos do casco é plausível para a análise estrutural. Será apresentado o módulo do casco com superestrutura com uma avaliação geral das tensões de Von Mises na qual se consideram os esforços de membrana no plano médio dos elementos de casca. Para os elementos de viga serão avaliados os esforços combinados.

De forma geral, vê-se nesta condição que os maiores esforços estão presentes nas áreas inferiores ao duplo fundo. Os máximos valores para elementos de casca (Shell) como indicado na escala da Figura 7-10 apresenta-se nas aberturas de inspeção das quilhas laterais com 182 MPa. No entanto, para estes elementos dentro das simplificações da modelagem não foram representados os seus reforços (strut) e possuem baixa densidade de malha não representando adequadamente a curvatura nas aberturas destas. Ao nível dos elementos de viga máximos valores

estão presentes nos reforços leves da chapa do fundo à altura da secção central próximos à quilha com 194 MPa.

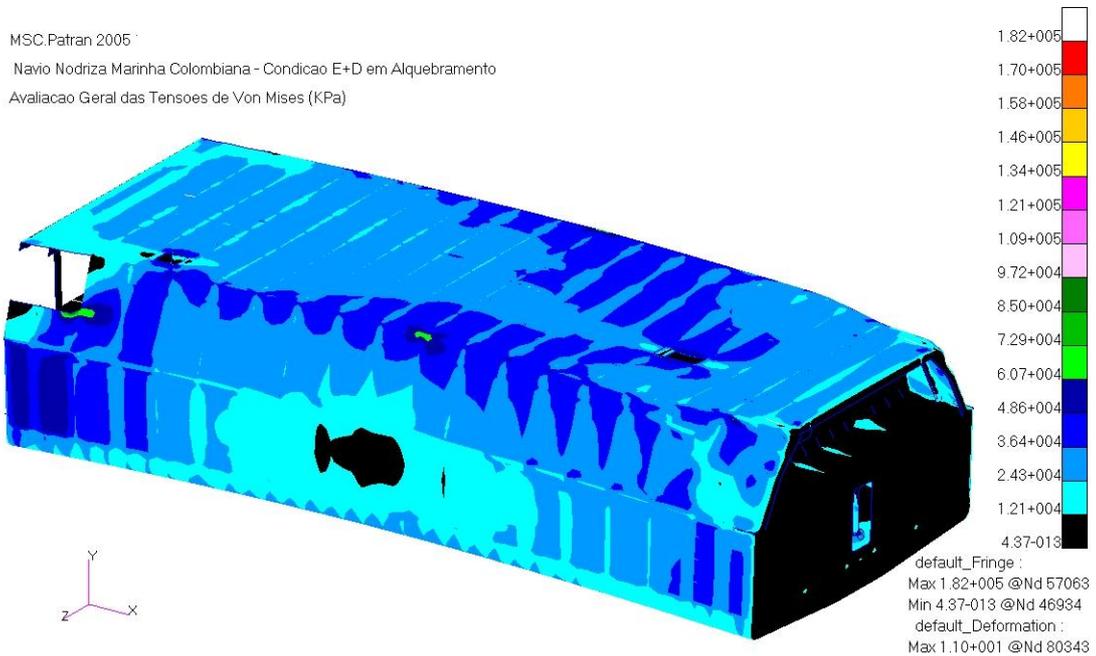


Figura 7-10 Avaliação geral das tensões de Von Mises para o módulo do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.

A seguir apresenta-se a deflexão primária gerada por esta condição no comprimento do módulo do casco, atingindo um máximo valor de 5,9 mm na parte inferior da chapa do costado e 7,4 mm na quilha central à altura da baliza 20.

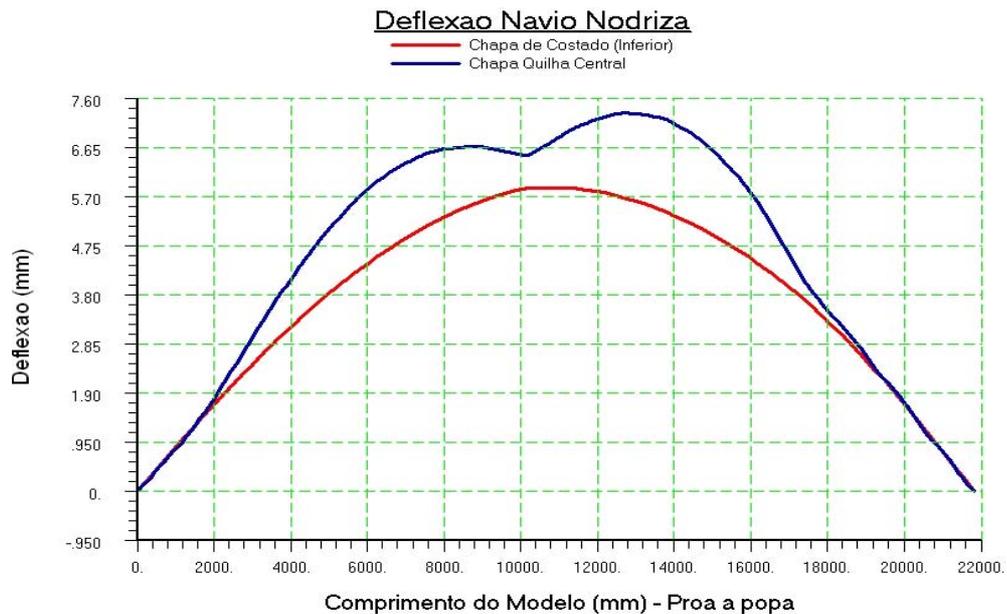


Figura 7-11 Avaliação da deflexão do módulo do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.

Uma avaliação das tensões de cisalhamento permite ver na Figura 7-12 um comportamento ajustado ao esperado teoricamente, tensões próximas a zero na secção central e estás incrementando em direção a popa e proa com mudança no seu sinal.

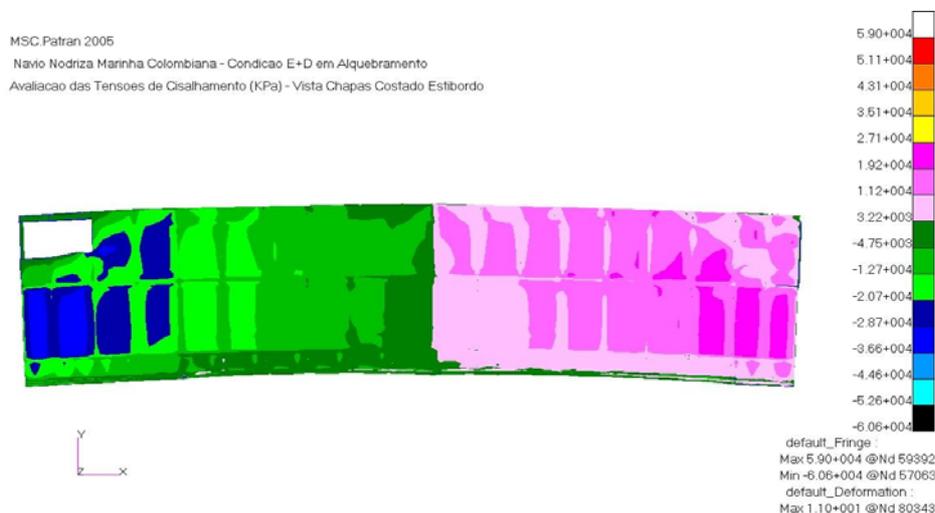


Figura 7-12 Avaliação geral das tensões de cisalhamento do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.

Complementando a distribuição de tensões exposta, a Figura 7-13 representa os esforços de cisalhamento avaliados no chapeamento externo do casco, partindo da região central do convés de vôo a 5,35 m de altura até a quilha central. É possível verificar que o comportamento ajusta-se aos padrões teóricos com uma perturbação à altura do convés de borda livre e uma queda significativa à altura do duplo fundo.

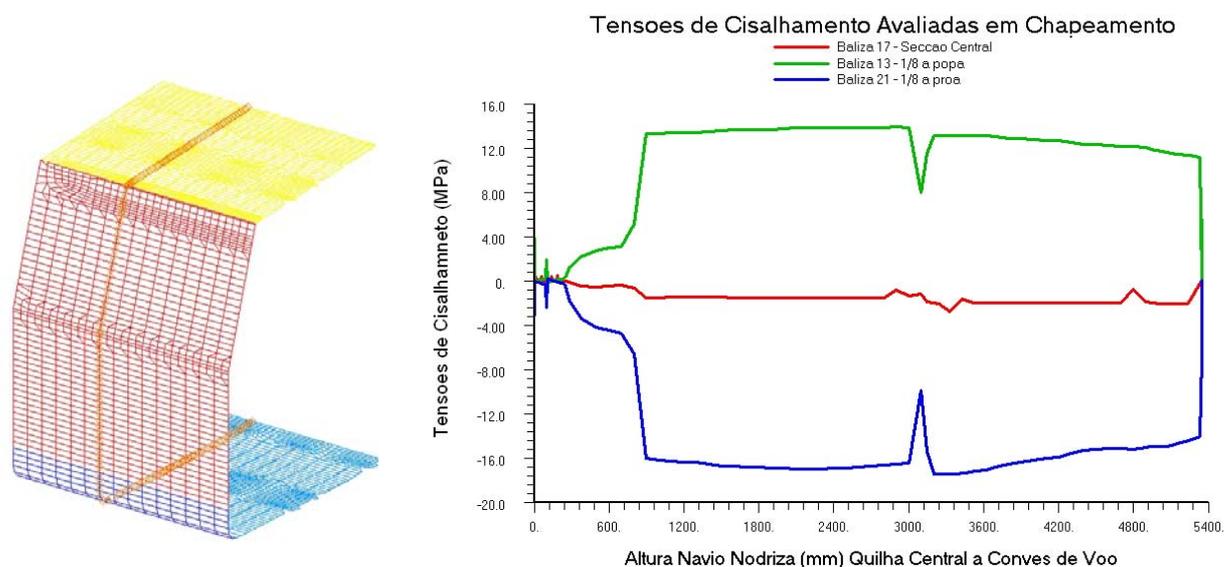


Figura 7-13 Avaliação dos Valores das tensões de Cisalhamento para o navio com Superestrutura.

A Figura 7-14 apresenta o resultado da avaliação inicial do módulo do casco sem participação da superestrutura. Para esta condição, as máximas tensões de Von Mises são encontradas igualmente nas áreas das aberturas de inspeção das quilhas laterais, mas com valores de 214 MPa (18% a mais do caso anterior). As tensões em elementos de viga igualmente apresentam seus máximos valores nos reforços da chapa do fundo, particularmente na área central com valores de 216 Mpa e no convés de borda livre no reforço leve próximo à escotilha apresenta-se um máximo valor de 186 Mpa.

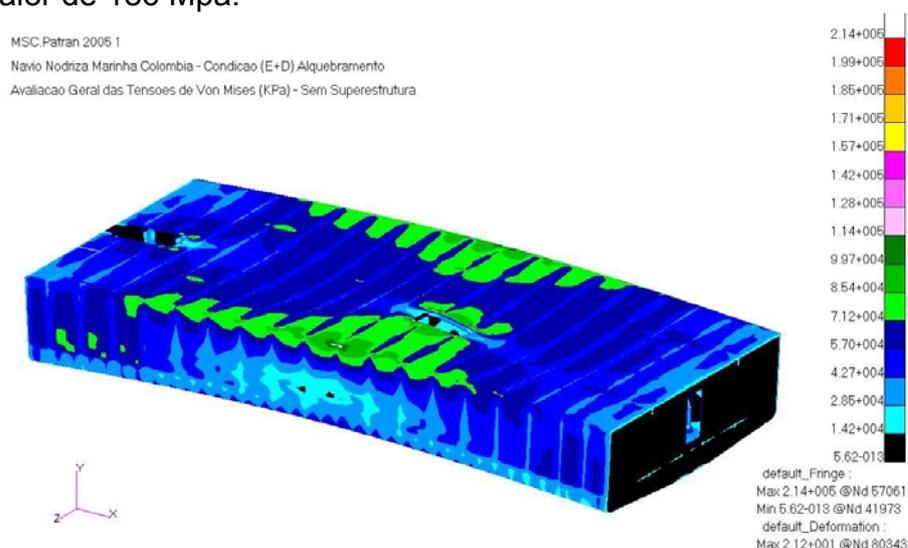


Figura 7-14 Avaliação geral das tensões de Von Mises para o módulo do casco sem superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.

Para este caso a deflexão apresentada supera em mais de duas vezes a avaliada para o navio com superestrutura, no entanto, considera-se dentro de uma margem plausível (ver Figura 7-15).

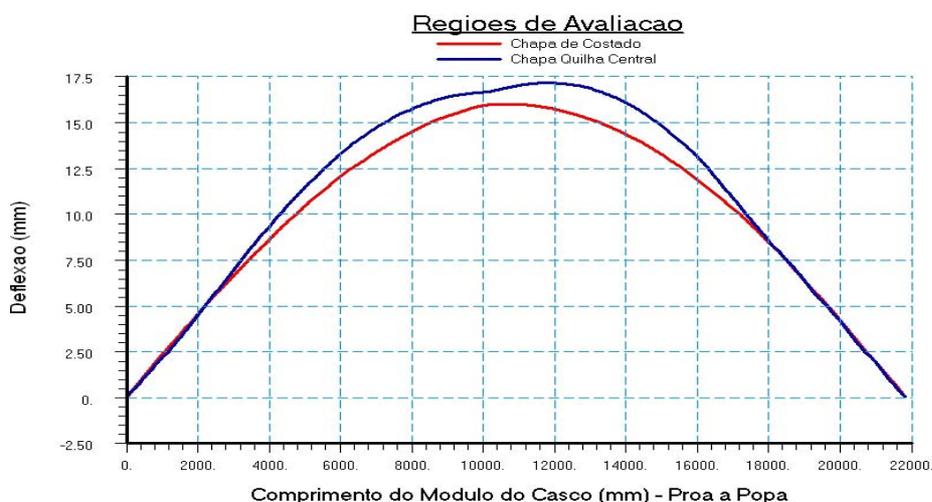


Figura 7-15 Avaliação da deflexão do módulo do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento. (Patran)

Igual ao módulo com superestrutura, o comportamento dos cortantes tende a zero na região central, com incrementos à proa e popa com mudança no seu sinal. Como pode-se observar, a tendência geral do módulo sem superestrutura é um incremento significativo nas tensões quando comparado ao módulo com superestrutura, como no presente caso.

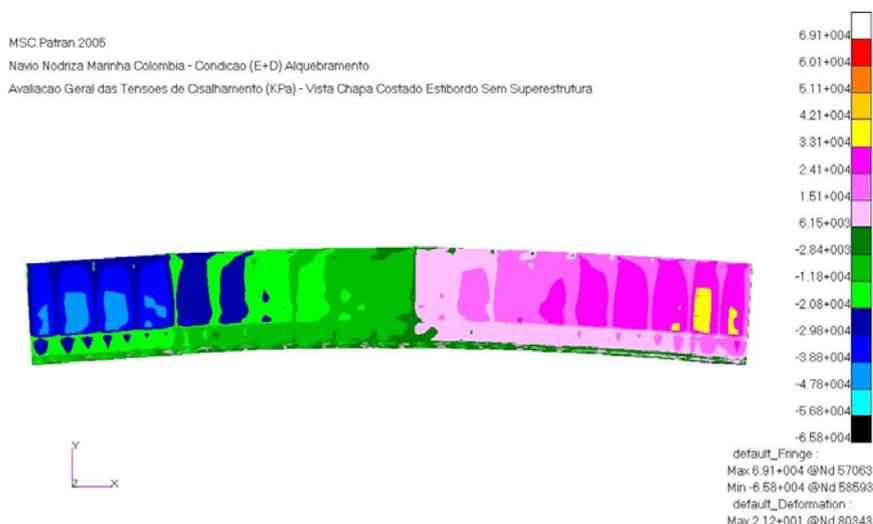


Figura 7-16 Avaliação geral das tensões de cisalhamento do casco com superestrutura na condição de carregamento combinado (E+D) em alquebramento.

Complementando os valores e representando as tensões de cisalhamento desde a região central do convés de borda livre até a quilha central em todo o chapeamento externo a Figura 7-17 apresenta os valores obtidos para três regiões avaliadas. Pode-se ver um incremento nas tensões de cisalhamento de aproximadamente 1,7 vezes quando comparado o módulo com superestrutura.

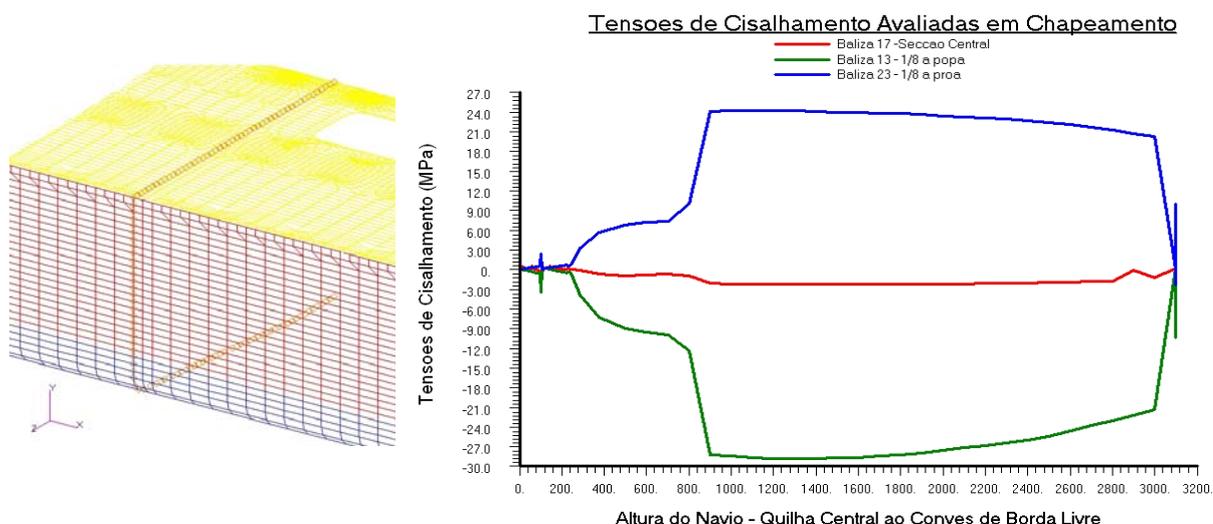


Figura 7-17 Avaliação dos Valores das tensões de Cisalhamento para o navio sem Superestrutura.

Como foi amplamente discutido no capítulo 2, os efeitos dos esforços cortantes geram distorções por “shear lag”, que se combinadas aos efeitos gerados da flexão pura (teoria simples de vigas), produz no convés resistente (neste caso do módulo sem superestrutura em alquebramento) os esforços de tração à popa e proa não sejam constantes desde o bordo do convés até a linha central do mesmo. A Figura 7-18 que representa as tensões ao longo do convés resistente permite ver claramente os incrementos destas nas áreas próximas do trincanis e alívio das mesmas para a região central.

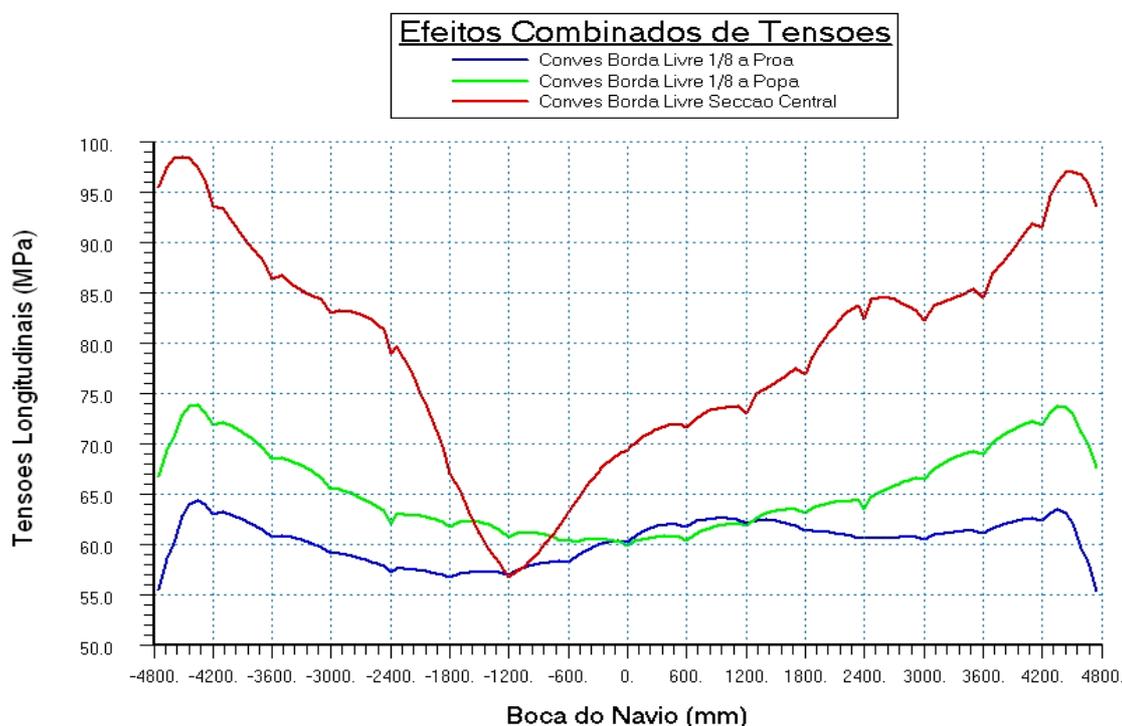


Figura 7-18 Tensões Longitudinais convés resistente Módulo sem Superestrutura, visualização dos efeitos combinados.

Neste caso, as tensões avaliadas na secção central (Linha vermelha) experimentam uma perturbação significativa (queda), produto da proximidade de uma abertura de escotilha no costado de estibordo (-600 a -1200 mm).

A partir dos modelos de elementos finitos, foi realizada uma avaliação geral dos esforços de flexão da viga, das tensões combinadas e dos padrões de deflexão. Percebe-se que os resultados obtidos das análises por MEF estão em concordância com os padrões clássicos da teoria de vigas, como observado nos módulos dos cascos anteriores. Por isso, considera-se que os dois modelos apresentam

resultados plausíveis para a posterior análise estrutural e da influência da superestrutura na resistência longitudinal.

7.2 Influência da Superestrutura Sobre a Resistência Longitudinal

A seguir será avaliada a influência da superestrutura dentro do comportamento estrutural do navio Nodriza em membros estruturais primários e suportando primários, assim como, o grau de influência da superestrutura sobre elementos, constituindo áreas críticas para identificar os efeitos gerados pelos diferentes módulos seccionais da secção mestra (considerando ou não a superestrutura) ante os diferentes esforços solicitantes próprios da resistência longitudinal.

Para determinar os níveis de tensões da viga navio que permitam estabelecer uma adequada avaliação, é preciso identificar inicialmente as áreas onde efeitos de cargas locais não alterem a confiabilidade dos resultados obtidos. Para este trabalho, a avaliação das tensões em função da resistência longitudinal é avaliada nas unidades do chapeamento, constituindo o convés resistente, não ligadas a outros elementos que possam gerar alteração dos padrões de distribuição de citadas tensões, como costados, vaus, anteparas longitudinais, entre outros. No entanto, avaliações no nível de redução de esforços nestas áreas serão inclusas.

Com o objetivo de ilustrar os diferentes fenômenos presentes na estrutura do navio Nodriza, a seguir se apresentam alguns dos efeitos existentes e que permitiram determinar áreas de avaliação, em relação às tensões próprias da resistência longitudinal. Para verificar o grau de perturbação das tensões na espessura das chapas para o modelo em flexão pura (ver Figura 7-6 e Figura 7-7), foram avaliadas as tensões longitudinais para as unidades do chapeamento no seu plano neutro e base (ou seu bordo). A Figura 7-19 representa as tensões presentes no módulo sem superestrutura, para a chapa do fundo e o convés de borda livre (ou resistente para esta condição).

Avaliação da Resistência Longitudinal em Flexão Pura para Alquebramento
Esforços Agente entre Balizas 16 e 17 em Condição de Carga Plena

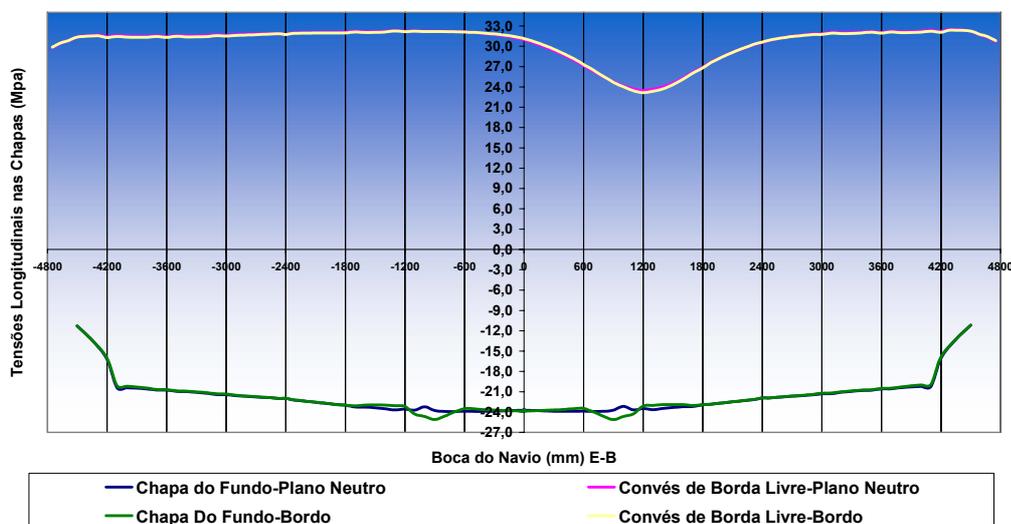


Figura 7-19 Comparação dos esforços longitudinais agentes nas chapas de convés e fundo para o navio sem superestrutura em flexão pura.

A figura anterior representa no eixo das abscissas, a boca do navio com o espaçamento próprio dos diferentes reforços longitudinais. e suas ordenadas representam a magnitude das tensões presentes. É apreciável que não existam diferenças significativas no sentido da espessura do chapeamento, como esperado. Uma queda nas tensões do convés de borda livre é apreciável produto da presença de uma abertura próxima da área de avaliação. No entanto, este comportamento só presente nesta condição (flexão), difere significativamente quando cargas locais agem nas unidades de chapeamento gerando efeitos de flexão local em reforços leves e nas mesmas unidades de chapeamento (efeitos secundários e terciários).

Será visto que variações significativas estão presentes na espessura do chapeamento, especialmente para aquelas áreas sob grandes esforços de pressão, como é o fundo na secção média para a condição de alquebramento. A Figura 7-20 representa as tensões longitudinais no módulo do casco representado na Figura 7-14, que permite observar as variações existentes nas tensões, produto dos efeitos locais, como são mais evidentes nos elementos do chapeamento do fundo. Na figura, são comparadas as tensões no plano neutro e só em um dos pontos extremos da mesma para dar maior clareza à figura.

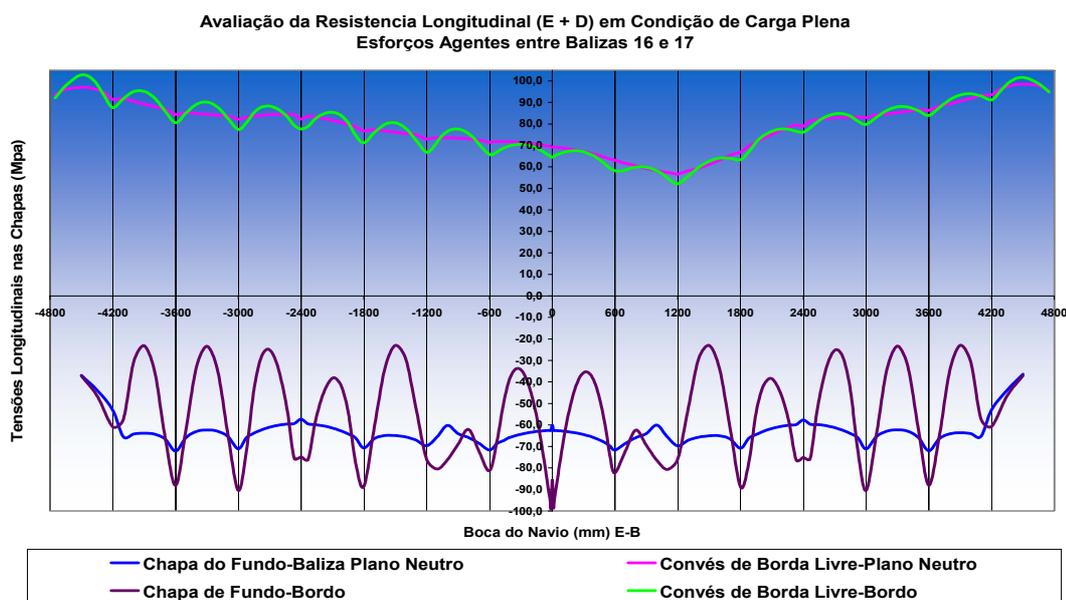


Figura 7-20 Comparação dos esforços longitudinais (em plano neutro e bordo) agentes na chapa do convés e fundo para o navio sem superestrutura em condição E+D.

Com base nas informações anteriores, é evidenciado que para uma adequada avaliação da resistência longitudinal, efeitos de cargas locais serão minimizados com a avaliação das tensões no plano neutro como é sugerido pelas Sociedades Classificadoras quando elementos “Shell” são usados na modelagem.

Por outro lado, a avaliação de tensões longitudinais nos elementos das chapas do convés afastadas de elementos como vaus ou anteparas longitudinais permite obter valores livres de perturbações, produto da interação destes elementos na transmissão de cargas. Na Figura 7-21, avaliando as tensões do módulo do casco com superestrutura (ver Figura 7-10), permite apreciar as tensões presentes nas chapas de fundo, convés de borda livre e convés resistente. Uma queda significativa das tensões quando elas são avaliadas nas chapas próximas aos elementos transversais como vaus ou hastilhas com relação a aquela avaliada no centro do chapeamento (entre vaus e reforços longitudinais) pode ser apreciada. Essa diminuição igualmente pode ser observada para o modelo em flexão pura e permite evidenciar o processo como os elementos estruturais, suportando os elementos primários, interagem na resistência longitudinal.

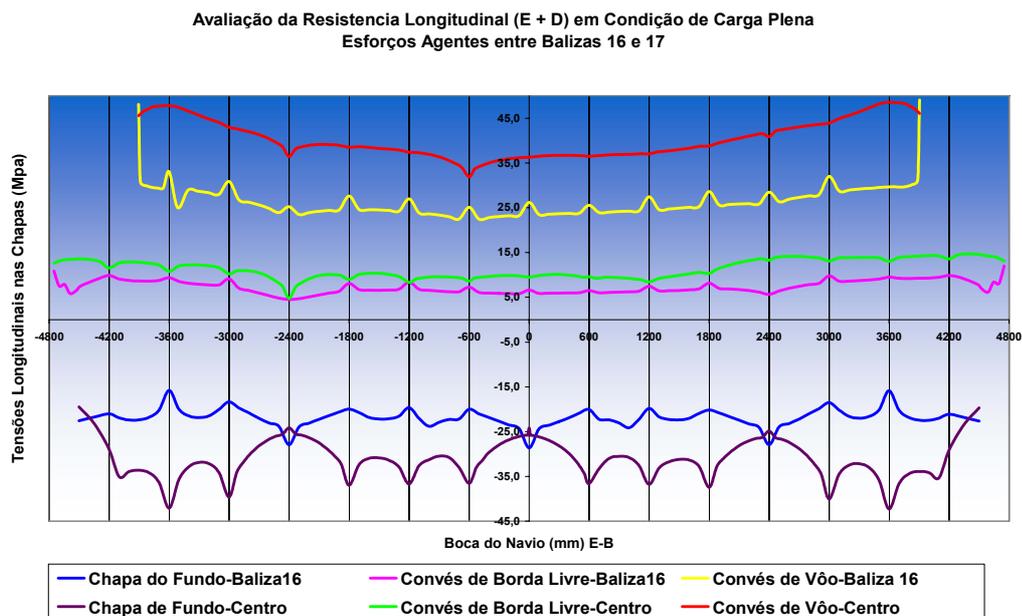


Figura 7-21 Comparação dos esforços longitudinais agentes (entre balizas ou em vaus) em chapas de conveses e fundo para o navio com superestrutura em condição E+D.

Levando em consideração os diferentes efeitos presentes na estrutura, a seguir são indicados os principais padrões do comportamento estrutural primário, com o objetivo de estabelecer as diferenças na resposta estrutural do navio Nodriza, quando é considerada a casaria do convés. Inicialmente uma avaliação dos esforços longitudinais nas chapas de costado é ilustrada na Figura 7-22.

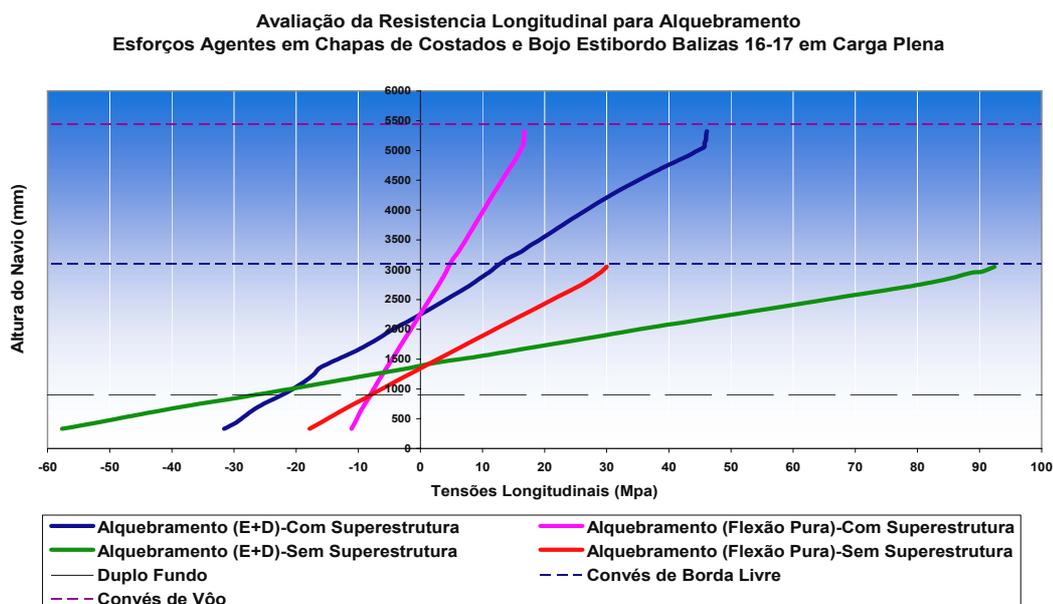


Figura 7-22 Comparação dos esforços longitudinais agentes em chapas de costado para o navio com e sem superestrutura.

A Figura 7-22 permite a visualização dos resultados obtidos para os dois módulos do casco em estudo submetidos (independentemente) a tensões de flexão atingindo requisitos da Sociedade Classificadora BV para alquebramento e à condição combinada E+D de alquebramento. Na figura são diferenciadas as alturas do duplo fundo, convés de borda livre e convés de vôo, o que permite apreciar significativas diferenças nas tensões geradas como resposta perante as mesmas solicitações. Uma avaliação dos níveis de redução de tensões é ilustrada na Tabela 23 para a condição E+D. Igualmente são claramente diferenciáveis os eixos neutros conformados para as duas condições. O eixo neutro calculado sem superestrutura está a 1,2 metros enquanto que para o modelo está aproximadamente a 1,35 metros, com respeito ao fundo do navio. Na condição com superestrutura o eixo neutro calculado está a 2,11 metros, enquanto que para o modelo se localiza a 2,32 metros.

A próxima figura mostra uma avaliação das tensões longitudinais na chapas do fundo e conveses para diferentes posições na boca do navio são comparadas entre si e ilustradas nas Figura 7-23 e Figura 7-24. Para os dois casos em estudo são determinados os níveis de redução das tensões primárias e resumidos na Tabela 23.

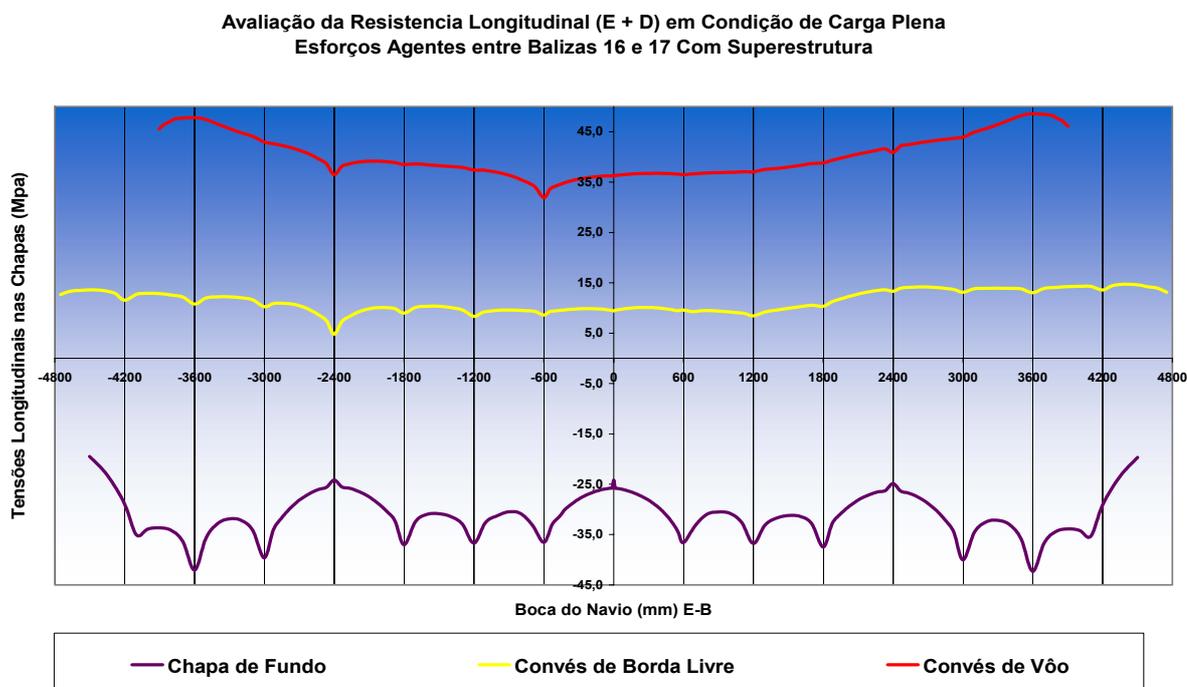


Figura 7-23 Comparação dos esforços longitudinais agentes em chapas de convés e fundo para o navio com superestrutura em condição E+D.

Na Tabela 23 são indicados quatro pontos de avaliação para cada região analisada no sentido da boca do navio. Para a chapa do fundo, a região central da quilha, longarinas, chapa intermédia entre longarinas e bojo e área próxima do bojo são comparadas. Posteriormente, e considerando o convés de borda livre comum para os dois modelos, outra avaliação nesse mesmo sentido tem lugar, com pontos de avaliação à mesma altura da chapa do fundo. Por último, uma comparação entre aqueles elementos constituindo os conveses resistentes para os dois modelos em particular é avaliada, lembrando que para o modelo com superestrutura o convés resistente está constituído pelo convés de vôo.

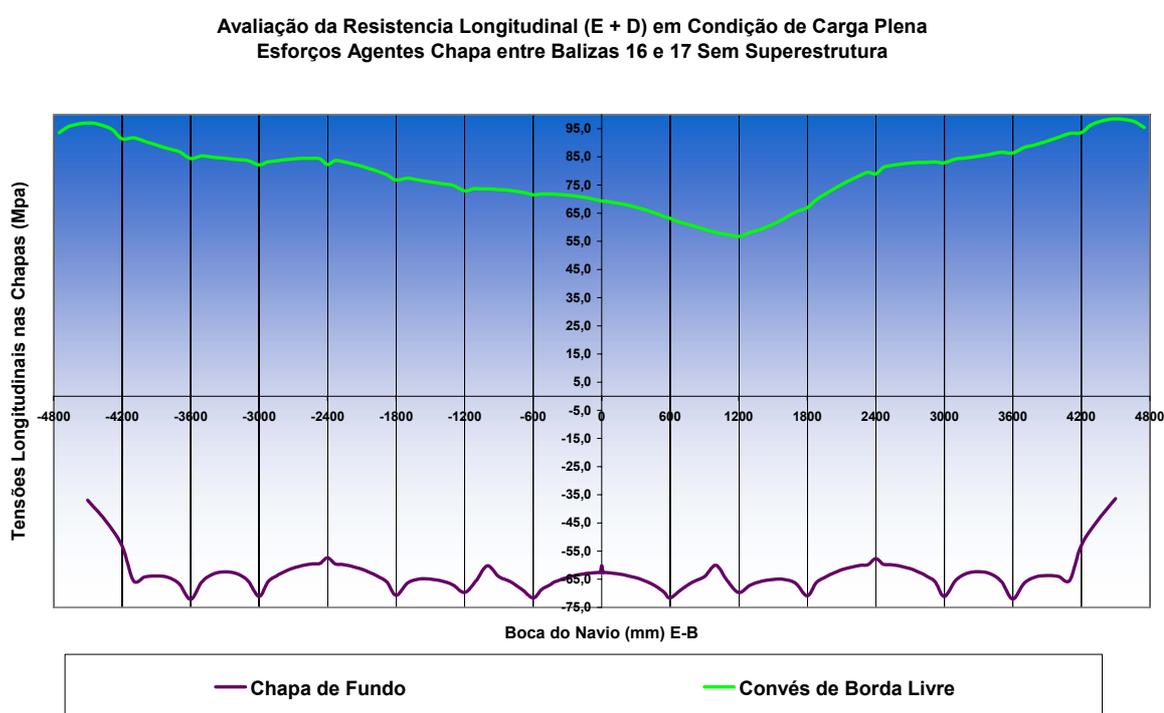


Figura 7-24 Comparação dos esforços longitudinais agentes em chapas de convés e fundo para o navio sem superestrutura em condição E+D.

A avaliação da eficiência da superestrutura em função dos diferentes critérios expostos no capítulo 3 é representada em função dos valores obtidos da avaliação das tensões longitudinais dos dois módulos do casco. A Figura 7-25 referencia os critérios de Vasta (na equação 3.15), Caldwell (na equação 3.16) e Terazawa (na equação 3.17) representando a avaliação da eficiência segundo os critérios citados nesse estudo. Os valores referenciados correspondem à região central dos conveses, como indicados a seguir:

$(\sigma_0) = 69,28$ MPa (esforço no convés resistente sem casaria de convés)

$(\bar{\sigma}) = 9,44$ MPa (esforço no convés resistente com casaria no mesmo ponto)

$(\bar{\sigma}) = 6,58$ MPa (esforço no convés mais alto considerada uma casaria 100% efetiva), valor obtido da aplicação do critério de Bleich no Apêndice I.

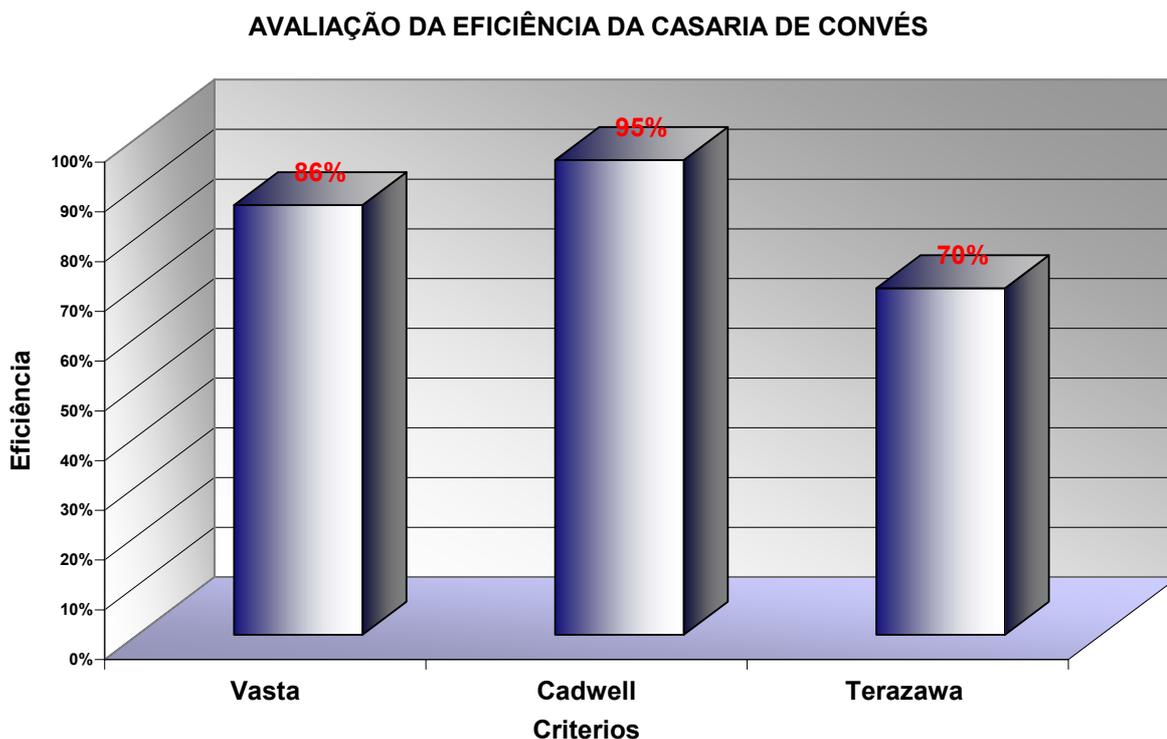


Figura 7-25 Avaliação dos níveis de eficiência da superestrutura na resistência longitudinal do navio Nodriza.

A Figura 7-25 mostra que a participação da casaria de convés pode ser considerada como altamente eficiente, dentro da resistência longitudinal do navio Nodriza. Considerando os resultados obtidos e a distribuição linear de esforços nas chapas de costado (ver Figura 7-22), estas se comportam de tal forma, que as chapas da superestrutura se constituem como uma extensão das chapas do costado do casco, mesmo as características constitutivas dos materiais sendo diferentes. Igualmente a Tabela 23 permite apreciar quantitativamente a influência que representa a superestrutura com grandes reduções nos níveis de esforços suportados pelo navio.

Tabela 23 Níveis de redução de esforços quando avaliada a contribuição estrutural da Casaria de Convés

Tensões Longitudinais na Chapa do Fundo			
Localização na Boca (mm)	σ_x (MPa)	Redução Local	Redução Geral
Com Superestrutura	4500,00	-19,68	51%
Sem Superestrutura	4500,00	-36,37	
Com Superestrutura	3600,00	-42,28	
Sem Superestrutura	3600,00	-71,99	
Com Superestrutura	2400,00	-24,87	
Sem Superestrutura	2400,00	-57,67	
Com Superestrutura	0,00	-24,16	
Sem Superestrutura	0,00	-60,16	
Tensões Longitudinais no Conves de Borda Livre			
Localização na Boca (mm)	σ_x (MPa)	Redução Local	Redução Geral
Com Superestrutura	4500,00	13,12	85%
Sem Superestrutura	4500,00	95,39	
Com Superestrutura	3600,00	13,04	
Sem Superestrutura	3600,00	86,35	
Com Superestrutura	2400,00	13,30	
Sem Superestrutura	2400,00	78,92	
Com Superestrutura	0,00	9,44	
Sem Superestrutura	0,00	69,28	
Tensões Longitudinais no Conves Resistente			
Localização na Boca (mm)	σ_x (MPa)	Redução Local	Redução Geral
Com Superestrutura	3900,00	46,57	47%
Sem Superestrutura	3900,00	91,94	
Com Superestrutura	3600,00	48,58	
Sem Superestrutura	3600,00	86,35	
Com Superestrutura	2400,00	40,89	
Sem Superestrutura	2400,00	78,92	
Com Superestrutura	0,00	36,24	
Sem Superestrutura	0,00	69,28	

A seguir, uma avaliação das áreas que apresentam maiores tensões nos módulos do casco será efetuada com o propósito de determinar como são influenciadas pelos aportes estruturais da superestrutura. A Tabela 24 estabelece as áreas a avaliar e as quais são indicadas na Figura 7-26.

Tabela 24 Regiões de avaliação local comuns para os módulos do casco em estudo

Áreas de avaliação locais	
A	Vau do convés de borda livre, avaliação na região central à altura do flange. (Baliza 20)
B	Caverna, ponto final de apoio borboleta do vau (Baliza 20)
C	Borboleta de reforço vertical antepara estanque de baliza 11 e longarina de estibordo a 2400 mm da linha central.
D	Sicorda, avaliação no flange próximo ao ponto de apoio da borboleta de união com reforço vertical de antepara estanque de baliza 17
E	Sicorda, avaliação no flange na região central entre balizas 20 e 21
F	Avaliação parte inferior da quilha central próxima à baliza 16
G	Região da chapa do fundo entre balizas 15 e 16 e reforços longitudinais a 1200 e 1800 mm da linha central (estibordo)
H	Região da abertura de inspeção de longarina (manhole) de bombordo a popa próxima antepara de baliza 11

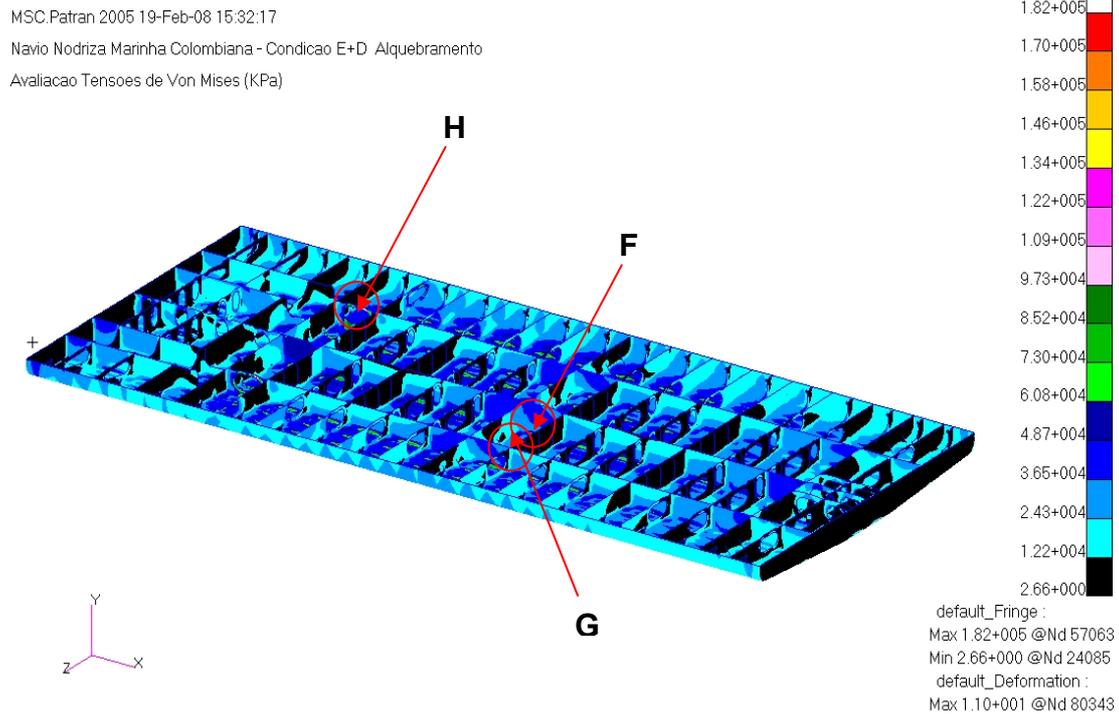
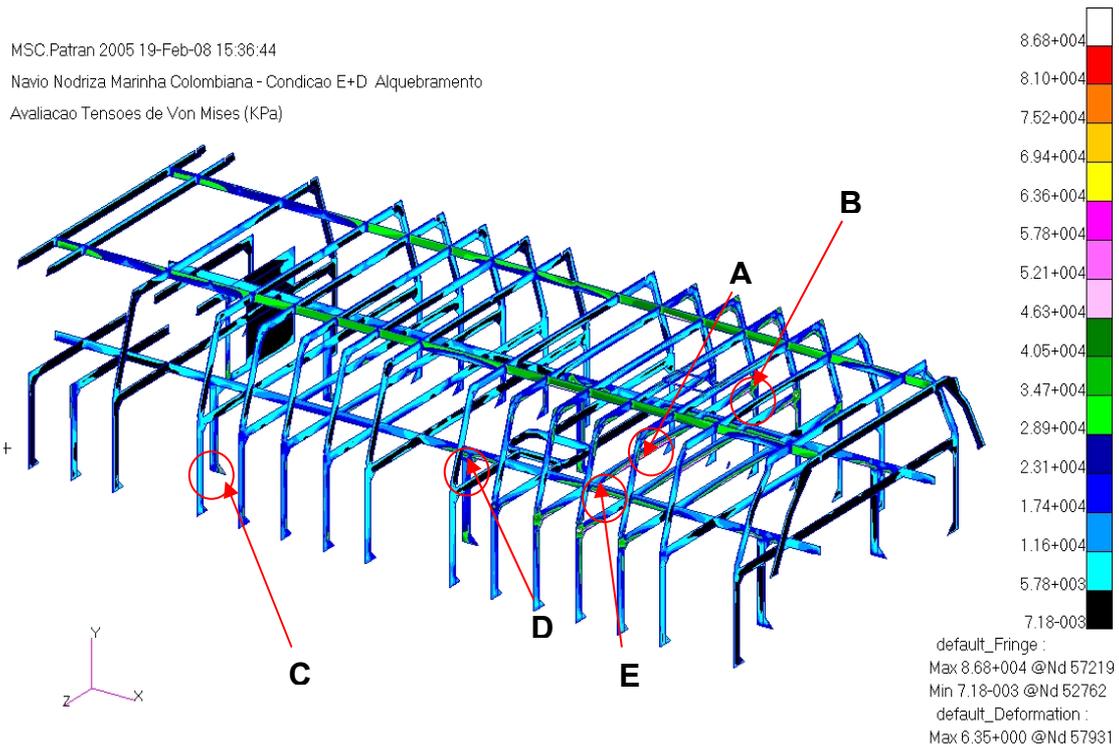


Figura 7-26 Regiões determinadas para avaliação local de níveis de tensões

O sumário da avaliação geral das tensões para as diferentes áreas em comparação está nas Tabela 25 e Tabela 26. Pode ser evidenciado que para as duas condições, os diferentes elementos apresentam resultados que possuem uma margem alta de segurança com relação ao esforço de escoamento do aço em estudo (235 MPa). Em função dos valores obtidos são estabelecidos fatores (F.S)

que permitem apreciar a relação do comportamento estrutural do navio na condição de cargas combinadas (E+D) para alquebramento e o critério de escoamento do material (ver equações (7.1) e (7.2)). Quando comparadas as duas condições em estudo fica evidente que existe um incremento nos fatores de segurança dos componentes avaliados com participação da superestrutura.

Tabela 25 Resultados da avaliação de tensões para o navio com superestrutura

Avaliação Com Superestrutura						
	σ_1	σ_2	σ_{12}	σ_{VM}	ϵ	F.S
	MPa	MPa	Mpa	Mpa		
A	68,96	-0,01	-0,05	68,96	1,89E-04	3,41
B	-65,59	-6,58	-9,09	64,51	2,35E-04	3,64
C	-36,11	-16,97	32,94	65,08	2,52E-04	3,61
D	-71,95	1,06	3,06	72,67	2,73E-04	3,23
E	51,27	0,00	-0,11	51,27	1,92E-04	4,58
F	-39,59	-2,57	-11,67	43,37	1,63E-04	5,42
G	-54,66	-58,22	-0,02	56,69	9,35E-05	4,15
H	-125,76	-25,62	38,84	133,32	4,83E-04	1,76

Tabela 26 Resultados da avaliação de tensões para o navio sem superestrutura

Avaliação Sem Superestrutura						
	σ_1	σ_2	σ_{12}	σ_{VM}	ϵ	F.S
	MPa	MPa	Mpa	Mpa		
A	52,79	-0,01	-0,03	52,79	1,30E-04	4,45
B	-115,71	-11,33	-16,33	114,05	4,24E-04	2,06
C	-41,53	-18,80	37,21	73,83	2,92E-04	3,18
D	-57,97	0,79	1,87	58,46	2,24E-04	4,02
E	109,85	-0,01	-0,13	109,86	4,19E-04	2,14
F	-67,39	-4,53	-9,46	67,27	2,53E-04	3,49
G	-90,66	-72,81	-2,61	83,43	1,98E-04	2,82
H	-149,59	-29,59	44,71	157,56	5,82E-04	1,49

Quando comparadas, as áreas indicadas como **A** e **D** são as únicas que apresentam um fator maior. Levando em consideração que são pontos de sicordas e vaus constituindo a estrutura principal do convés de borda livre e que este conjunto na avaliação convencional, tem indicação de que maiores módulos seccionais são necessários. Uma avaliação para melhor compreensão do comportamento das sicordas e vaus interagindo entre as anteparas estanques de balizas mostradas nas Figura 7-28 e Figura 7-29. Essa deflexão presente na região apontada apresenta os maiores vãos na estrutura do navio. A Figura 7-27 ilustra as deflexões existentes nas sicordas para as duas condições avaliadas, observando maiores valores de deflexão

para o navio sem superestrutura na região central. A sicorda de estibordo apresenta um comportamento diferenciado na região da escotilha, portanto, uma avaliação dos diferentes vaus entre anteparas é representada nas Figura 7-28 e Figura 7-29.

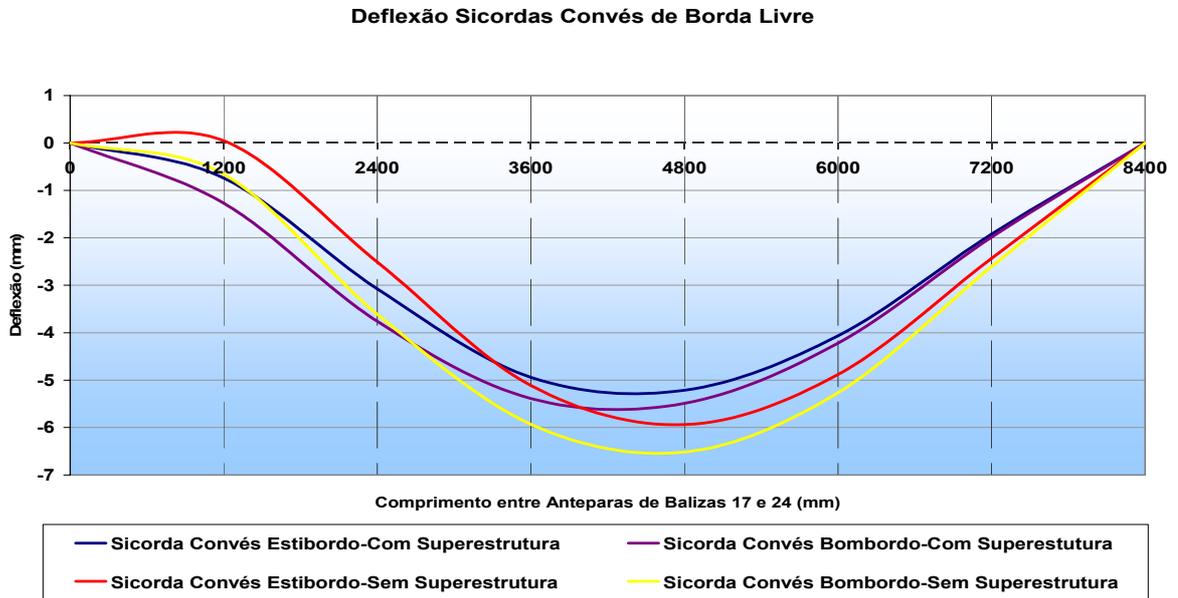


Figura 7-27 Deflexão das sicordas avaliadas no convés de borda livre.

Dentro dos resultados obtidos e visualizados, a continuação da área da escotilha está gerando um comportamento que pode ser gerado em parte pela pouca rigidez desta área onde os diferentes reforços existentes no navio não foram totalmente modelados.

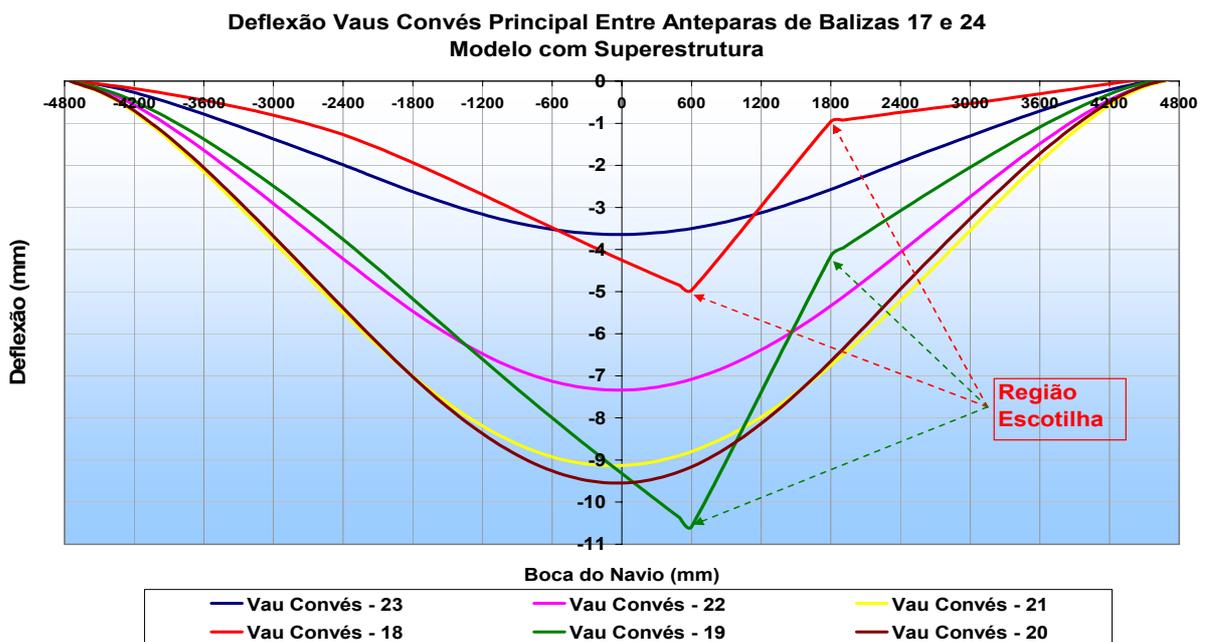


Figura 7-28 Deflexão dos vaus do convés de borda livre, módulo com superestrutura.

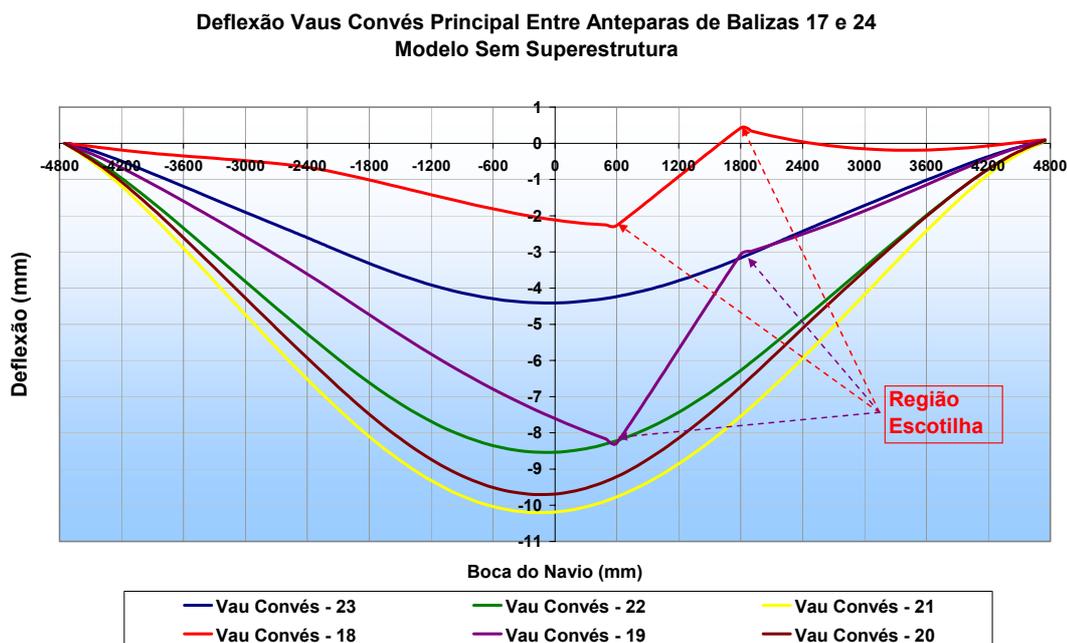


Figura 7-29 Deflexão dos vaus convés de borda livre, módulo sem superestrutura.

Outra possível causa que produz esta redução de tensões pode ser gerada pela deflexão primária (alquebramento) que experimenta o navio (ver Figura 7-15) quando avaliada sem superestrutura e a qual tem seu máximo valor na antepara de suporte próxima à região da escotilha, enquanto que a estrutura secundária formada pelas sicordas e vaus encontra-se experimentado, uma condição de flexão contrária (tosamento) ao navio pelas cargas locais. No entanto, consideram-se estes comportamentos aceitáveis para o presente estudo.

Finalmente são referenciados na Tabela 27 os máximos valores correspondentes aos elementos de reforço leves longitudinais do chapeamento do navio, os quais apresentam valores elevados especialmente na área do chapeamento do fundo onde se concentram cargas de pressão equivalentes a uma coluna de água igual ao pontal do navio (condição E+D em alquebramento).

Tabela 27 Resultados da avaliação de tensões para elementos de viga no navio

	$\sigma_{\text{Máx(Comb)}}$	$\epsilon_{\text{Máx(comb)}}$	$\sigma_{\text{Min(comb)}}$	$\epsilon_{\text{Min(comb)}}$	F.S
	Mpa		Mpa		
Com Superestrutura	161,00	7,62E-04	-194,00	-9,22E-04	1,21
	Reforço no Convés BL-Escotilha		Reforço na Chapa Fundo		
Sem Superestrutura	186,00	9,01E-04	-216,00	-1,05E-03	1,09
	Reforço no Convés BL-Escotilha		Reforço na Chapa Fundo		

No entanto, os valores encontrados considerando o critério de escoamento estão dentro dos limites permissíveis, mesmo na condição do navio sem superestrutura. Os demais elementos de reforços do navio possuem um fator de segurança suficiente para garantir a integridade estrutural dos membros.

8 CONCLUSÕES

A avaliação de resultados obtidos das análises dos módulos do casco permite observar que, ao considerar o convés resistente como localizado acima do convés de borda livre, reduções amplas são geradas nos níveis de tensões primárias. Obtem-se reduções nas tensões longitudinais das chapas do fundo de 51%, do convés de borda livre de 85% e quando comparados os conveses resistentes para cada situação avaliada a redução é de 47%. Da mesma forma, as tensões de corte avaliada para diferentes secções no comprimento do navio permitem estabelecer reduções próximas a 56%. O módulo seccional no convés de borda livre é incrementado em 5,8 vezes quando está participando na avaliação estrutural da casaria do convés. Portanto, pode-se concluir com relação às tensões primárias, que ao considerar a casaria do convés um incremento na rigidez seccional obtém-se uma ampla redução nos esforços gerados na estrutura ante as mesmas cargas solicitantes. Por conseguinte, devem-se considerar todos os elementos estruturais acima do convés de borda livre participando da resistência da viga navio para obter uma adequada resposta estrutural.

Dentro da avaliação do navio Nodriza experimentando ciclos de águas não restritas, os maiores valores de tensões para unidades de chapeamento, assim como para elementos reforçadores, encontram-se localizados na área inferior ao duplo fundo para uma condição de avaliação de cargas combinadas, especialmente na área da chapa reforçada do fundo (tensões de ponto). No entanto, os níveis encontrados permitem determinar que todos os componentes estruturais encontram-se dentro do parâmetro elástico-linear inferior ao limite de escoamento. Da mesma forma, da análise dos esforços cortantes ao nível primário da viga navio, não foram encontrados valores que influenciem significativamente a resistência longitudinal, sendo seus máximos valores próximos aos 20% do valor da tensão de escoamento.

O uso dos modelos de elementos finitos como método de avaliação, permitiu obter uma resposta acurada do comportamento estrutural do navio Nodriza. Está evidenciado que, embora um critério inicial de avaliação do navio em estudo poderia considerar uma casaria de convés, a qual é desprezada dentro de uma avaliação convencional da resistência longitudinal, a sua modelagem permite obter uma

resposta sabidamente mais precisa. Observando-se que a estrutura da casaria comporta-se eficazmente como uma extensão das chapas do casco através da distribuição (praticamente linear) de tensões avaliadas no chapeamento do costado, esta pode ser considerada como superestrutura de acordo com o seu comportamento estrutural.

Dentro dos diferentes critérios estabelecidos para determinar a eficiência da casaria do convés, valores referidos com base nos resultados dos modelos de elementos finitos permitem estabelecer que a eficiência desta é da ordem de 84% quanto à sua contribuição à resistência longitudinal, a qual pode ser avaliada com os diferentes níveis de redução de esforços obtidos localmente nos membros principais e primários. Também podem ser sugeridas reduções significativas nos escantilhões para o navio quando considerada convenientemente a superestrutura dentro de uma avaliação estrutural convencional visando resistir unicamente às cargas solicitantes geradas pelo mar, sem nenhuma consideração especial em relação a carregamentos ou sobrecargas oriundas de aplicação militar.

Para o caso em estudo, o uso dos métodos determinísticos das sociedades classificadoras para navios comerciais apresenta-se como um “guia inicial” para o projeto estrutural do navio militar. Fica evidenciado que as regras de sociedades classificadoras são aplicadas levando-se em conta uma margem de segurança ampla, o que garante a desejada resistência às cargas solicitantes próprias de águas profundas. Os elevados graus de conservadorismo identificados através do MEF, porém, podem fazer com que as estruturas em serviço suportem adequadamente cargas oriundas das aplicações militares (mais críticas), mesmo que tais considerações não sejam explicitamente consideradas como fatores de projeto (“susceptibilidade”, “vulnerabilidade” e “sobrevivência”).

Finalmente e como recomendação num trabalho posterior, deverá ser analisada com maior detalhe a estrutura determinando a sua resposta em uma avaliação para flambagem e fadiga, a fim de complementar a resposta estrutural obtida para escoamento. Particularmente para aquelas áreas que denotaram maiores valores de tensões dentro do módulo obtido considerando a participação da superestrutura e que permitam garantir a integridade estrutural do navio. Da mesma

forma uma avaliação para a secção da proa ante efeitos de slamming é recomendada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LRS, **-Lloyd's Register of Shipping Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships-** Provisional Rules January 2002.
- [2] NAVSEA, **"Structural Design of Ship and Ocean Structures"**, NAVSEA 0900-LP-097-4010, 15 Dec 1976.
- [3] SEUNG, S. and KEON, S. **-Optimum Structural Design of Naval Vessel-** Marine Technology, Vol 40, No. 3 July 2003, pp 149-157
- [4] FREITAS, E. **-Análise Estrutural do Navio-** Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Dpto. Engenharia Naval, 3.63, 1980.
- [5] HUGHES, O.F, **-Ship Structural Design-** SNAME, 1988, pp 126
- [6] Pietzker, F, **-The Strength of Ships-** Translation available as S.N.S.M.E. T&R Bulletin No 2-4
- [7] Attwood, E, **-Theoretical Naval Architecture-** Longmans Green & Co, 1922
- [8] Evans H. **-Ship Structural Design Concepts, Second Cycle-** Massachusetts Institute of technology, Ship Structural Committee, 1983, pp 517
- [9] Lienau, O, **-Stress in the Longitudinal Structure of Steel Merchant Vessels-**, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1913, pp 603
- [10] SÁ FREITAS, E., **-Curvas, Tabelas e Notas para projeto-** Departamento de Engenharia Naval, EPUSP, São Paulo, 1977.
- [11] Heller, S. R, Jr. **-Wave Geometry for Longitudinal Strength-** Journal of the American Society of Naval Engineers, Vol 66, No. 4, Nov. 1954, pp 925
- [12] Blodgett, O, W, **-Design of Welded Structures-** The James F. Lincoln ARC Welding Foundation, Cleveland, Ohio, 1982
- [13] Taylor, J, L, **-The Theory of longitudinal bending of the Ship-** , Trans. INA, 1899, p 57

- [14] Bruhn, J., **-The Stresses at the discontinuities in a Ship's Structure-**, Trans. INA 1899, p 57
- [15] Muckle, W, **-Strength of Ships' Structure-**, Edward Arnold Ltd. London, 1967, pp 443
- [16] IPIN, **-Dicionário Eletrônico de Termos Navais-** Instituto Pan-americano de Engenharia Naval, Inglês, Português, Espanhol.
- [17] Purvis, F,P, **-On the Effect of Depth Upon the strength of a Girder to Resist Bending Strains-**, Trans. INA, 1878, p. 193
- [18] Montgomerie, J, **-The Scantlings of Light Superstructures-**, Trans. INA, 1915, p. 52
- [19] Crawford, J,R and Ruby W, J, **-Model Test on Hull-Deckhouse Interaction-** Ship Structural Committee, Project SR-121, janeiro 17, 1955, pp142
- [20] Bleich, H,H, **-Nolinear Distribution of bending Stresses Due to Distortion of the Cross Section-**, J.Applied Mechanics, Vol. 20, 1953.
- [21] Smith, W, E, **-Hogging and Sagging strain and seaway as influenced by wave structure-** Trans. R.I.N.A. 1883
- [22] Germanischer Lloyd, **-Guidelines for Strength Analyses of Ship Structure with the Finite Element Method-**, Rules for Classification and Construction Analysis Techniques, Edition 2001
- [23] IACS - International Association of Classification Societies – **Common Structural Rules Oil Tankers-** January 2006
- [24] Azevedo, A, F,M, **-Método dos Elementos Finitos-**, Faculdade de Engenharia do Porto, Primeira Edição, Abril 2003, pp 258
- [25] Evans, H, **-Ship Structural Desing Concepts-** Massachusetts Institute of technology, Ship Stucrural Committee, 1975, pp 837

- [26] ASTM A53/53M, **-Standard Specification for Sipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless-**, American Society for Testing and Materials
- [27] NIJ Standard 0108.01, **-Ballistics Resistance Protective Materials-**, National Institute of Justice, U.S. Department of Justice National Institute of Justice.
- [28] ASTM A36/36M, **-Standard Specification for Carbon Structural Steel-**, American Society for Testing and Materials
- [29] Bureau Veritas, **-Rules and Regulations for Classification of Ships-**, Steel Ships of Less than 65 m in Length, Part II Hull Structure, Chapter 6, Interactive Electronic Version (English), 1999
- [30] Nippon Kaiji Kyokai, - **Rules for the Survey and Construction of Steel Ships-**, Part CS, Hull Construction and equipment of Small Ships, English Edition, 1980
- [31] PC-SHCP Input, **-Ship Hull Characteristic Program-**, C. Tremblay & Associés, Sainte-Foy (Québec), Canada, Version 5.0, Demonstration Version.
- [32] YONG, B, **-Marine Estructural Desing-** Elsevier Science Ltda, 2003, pp 605
- [33] VENTURA, M, F, GORDO, J, M, SOARES, C, G, **-Projeto Estrutural de Navios Assistidos por Computador-** Engenharia Naval em Portugal.
- [34] FAULKNER, D., A, **-Synthesis of welded grillages to withstand compression and normal loads-**. Computers and Structures. 1973.
- [35] MARIN, J, R, - **Estimación del Momento Flector Dinámico para un Tanquero de 3800 DWT -**, I Jornadas Técnicas de Diseño y Arquitectura Naval, Colegio de Ingenieros Navales del Ecuador, Guayaquil, Abril 2007
- [36] LEWIS, V, E **-Load Criteria for Ship Structural Design-** Ship Structural Committee, SSC-240, 1973
- [37] Che X, Lee F, Libby D, **-Simplified Stress Analysis of Ship Structures-** American Bureau of Shipping, New York, New York, 2005

- [38] American Bureau of Shipping –**Safehull Finite Element Analysis of Hull Structures-** Guidance Note 2004
- [39] Programa MSC Software, MSCPatran 2005b, www.mscsoftware.com/patran
- [40] Programa MSC. Software, MSC Nastran 2005, www.mscsoftware.com/nastran
- [41] Korvin-Kroukovsky, B.V., Jacobs, W. R., -**Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves-**, Trans. SNAME, Vol, 65, 1957.

Apêndice I Aplicação do Critério de Bleich para Determinação de Esforços Primários com Participação da Superestrutura e Avaliação de Eficiências.

Para determinar a eficiência da casaria do convés apresentam-se o resumo dos procedimentos desenvolvendo o critério de Bleich na determinação das tensões agentes do navio Nodriza antes os esforços solicitantes (Critério desenvolvido no capítulo 3). Para calcular os diferentes níveis de tensões presentes nos pontos mais extremos e característicos da estrutura geral, três hipóteses são levadas em consideração: eficiência nula da casaria do convés, eficiência completa da casaria de convés e eficiência parcial da casaria de convés. A seguir, os momentos usados para avaliação inicial das diferentes condições estabelecidas são indicados. Os diferentes termos encontrados a seguir foram amplamente discutidos e descritos no capítulo 3, motivo pelo qual não serão tratados no presente apêndice.

MOMENTOS PARA AVALIAÇÃO		
M_{SM}	M_c	M_D
N-mm	N-mm	N-mm
9,310E+09	5,390E+09	7,350E+09

Os momentos relacionados correspondem aos valores determinados e obtidos da avaliação da resistência longitudinal total.

Eficiência nula da casaria do convés

A eficiência nula da casaria de convés assume que o casco esteja formado só até o convés de borda livre. Esta estrutura suporta a totalidade dos esforços solicitantes, supondo que não existe participação da casaria de convés. São determinados os esforços pela teoria simples de vigas.

CARACTERÍSTICAS CASCO CONFORMADO SÓ ATÉ O CONVÉS DE BORDA LIVRE								
Área Secc.	Comprimento	Pontal	E	I	Wt	Wf	E. N.	Boca
(mm ²)	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(mm ⁴)	(mm ³)	(mm ³)	(mm)	(mm)
2,578E+05	3,750E+04	3,100E+03	2,060E+05	4,626E+11	2,441E+08	3,839E+08	1,205E+03	9,500E+03

Determinação esforços sem superestrutura	
	[N/mm ²]
Convés Principal (t)	38,13
Chapa do Fundo (f)	-24,25

Eficiência completa da casaria de convés

Para esta condição se considera a estrutura toda formando uma viga só com distribuição linear das tensões. A inércia esta constituída por todos os membros participantes. A seguir, são apresentados os dados correspondentes aos aportes da superestrutura e a condição combinada. Igualmente são determinados os esforços pela aplicação da teoria simples de vigas.

CARACTERÍSTICAS CASCO CONFORMADO SÓ PELA SUPERESTRUTURA (1)								
Area Secc.	Comprimento	Pontal	E	I	Wt	Wf	E. N.	Boca
(mm ²)	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(mm ⁴)	(mm ³)	(mm ³)	(mm)	(mm)
8,506E+04	1,560E+04	2,255E+03	2,060E+05	4,549E+10	1,045E+08	-	1,820E+03	7,811E+03

CARACTERÍSTICAS CASCO E CASARIA DE CONVÉS								
Area Secc.	Comprimento	Pontal	E	I	Wt	Wf	Wp	Pos. E.N.
(mm ²)	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(mm ⁴)	(mm ³)	(mm ³)	(mm ³)	(mm)
3,461E+05	3,750E+04	3,100E+03	2,060E+05	1,400E+12	1,416E+09	6,635E+08	4,316E+08	2,111E+03

Determinação esforços com superestrutura	
	[N/mm ²]
Convés de Vôo (p)	21,57
Convés de borda livre (t)	6,58
Chapa do fundo (f)	-14,03

Para esta condição, assume-se uma participação efetiva da superestrutura e seus valores são padrão de comparação especialmente para a área do convés de borda livre.

Eficiência parcial da casaria de convés

Para esta condição, a distribuição de tensões é determinada em função dos critérios de Bleich. Igualmente e para simplificação, é determinado o módulo de rigidez $K(x)$ presente para o convés de borda livre, assumindo que todos os suportes da casaria são fornecidos em forma concentrada pelos vaus com os mesmos espaçamento para cada baliza, assim como pelas anteparas. A seguir são descritas as diferentes variáveis consideradas para determinar o módulo de rigidez do convés de borda livre, suportando a casaria. Para uma melhor aproximação do seu comportamento, são estimados 3 valores de $K(x)$, estabelecendo diferentes distâncias entre o bordo do convés e os pontos considerados como de suporte da casaria. Para o navio

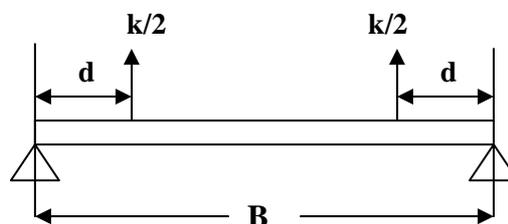
Nodrizas as chapas da casaria estão ligadas ao bordo da chapa do casco, o que torna o valor de $K(x)$ com tendência a um valor infinito.

Módulo de Rigidez parcial para as vigas

$$K_1 = R_1 I_1$$

$$R_1 = \frac{12E}{d^2(3B-4d)}$$

$$K_{1st} = \frac{K_1}{S_1}$$

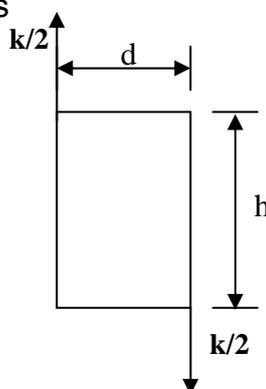


Módulo de Rigidez parcial Anteparas

$$K_2 = R_2 t_B$$

$$R_2 = \frac{2Gh}{d}$$

$$K_{2st} = \frac{K_2}{S_2}$$



Variáveis		
d (Vão entre chapa casco-chapa casaria)	mm	
B (Boca casco principal)	mm	9,50E+03
G (Módulo elasticidade Transversal)	N/mm ²	8,23E+04
t_B (Espessura chapa antepara)	mm	6,35E+00
h (Altura chapa antepara)	mm	2,30E+03
E_v (vão entre vigas)	mm	1,20E+03
E_a (vão entre anteparas)	mm	8,40E+03
Inercia vau	mm ⁴	3,70E+07

Avaliação K para diferentes valores de "d"			
d	3	845	1.200
R1	9,641E+00	1,380E-04	7,243E-05
K1	3,568E+08	5,107E+03	2,681E+03
K1st	2,974E+05	4,255E+00	2,234E+00
R2	1,262E+08	4,484E+05	3,156E+05
K2	8,015E+08	2,847E+06	2,004E+06
K2st	9,542E+04	3,390E+02	2,385E+02
Ktotal	3,928E+05	3,432E+02	2,408E+02

Posteriormente são estimados os esforços segundo o critério de Bleichs, de acordo com as equações (3.3) à (3.14) e as quais são sumarizadas nas seguintes tabelas representando a avaliação para um $d=845$ mm, considerando (como condição assumida só para comparação) a boca da casaria do convés suportada no convés de borda livre igual à boca do convés de vão. A seguir é sumarizada a avaliação da participação estrutural da casaria do convés. Considera-se que o momento fletor na secção central corresponde à M_{SM} e nos extremos da casaria a M_C e M_B . (ver Figura

3-10). Em seguida são avaliados os parâmetros I_A , μ , u , (equações (3.6), (3.7), (3.8), (3.9)) a partir das quais é possível obter os fatores de desvio ϕ_A e ϕ_B (ver Figura 3-9).

M_A [N-mm] em 12.4 m	a (mm)	3,715E+03	μ=	0,523
6.370.000.000,00	I_A (mm ⁴)	8,826E+11	u=	2,017
M_B [N-mm] em 28.4 m	α1	4,90E-01	φ_A=	0,135
2.940.000.000,00	α2	5,10E-01	φ_B=	0,240

Posteriormente, são determinados na próxima tabela os fatores de correção de esforços $\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_2$, pelas equações (3.10) e (3.11).

Factor de Correção de esforços		M _A		M _B	
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
	y (mm)	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$
CONVÉS SUPERIOR S/E	-3244,53	5,32E+01		2,46E+01	
CONVÉS BORDA LIVRE S/E	-989,35	1,84E+01		8,51E+00	
CONVÉS BORDA LIVRE	-989,35		1,12E+01		5,15E+00
FUNDO.	2110,65		-1,39E+01		-6,41E+00

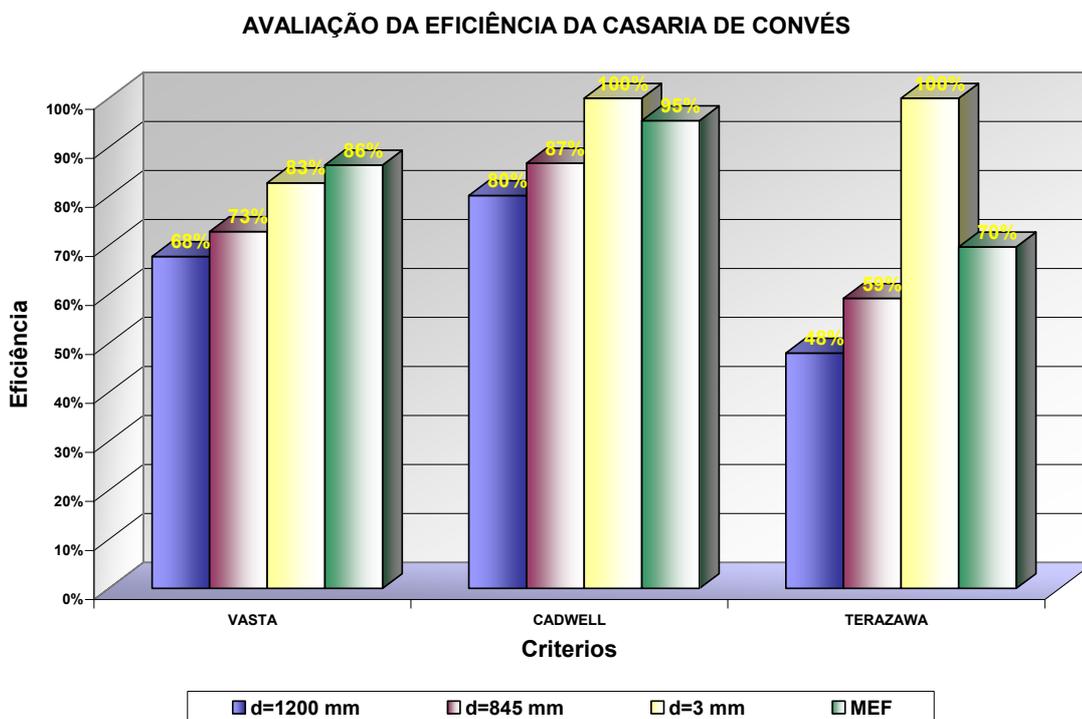
A distribuição de esforços para a secção central é obtida pela soma dos esforços de acordo com a equação (3.14).

	σ_N	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\phi_A\Delta\sigma_A$	$\phi_B\Delta\sigma_B$	$\sigma_N + \phi\Delta\sigma$
CONVÉS SUPERIOR S/E	21,569	53,235	24,570	7,194	5,907	34,669
CONVÉS BORDA LIVRE S/E	6,577	18,436	8,509	2,491	2,045	11,114
CONVÉS BORDA LIVRE	38,133	11,161	5,151	1,508	1,238	40,880
FUNDO.	-24,251	-13,880	-6,406	-1,876	-1,540	-27,666

Apresentado a seguir o sumário dos esforços assumindo um aporte parcial da casaria do convés.

Avaliação de Esforços Longitudinais para o Navio (Mpa)					
Teoria de Vigas		Aplicação do Criterio de Bleich			MEF
(B-b)/2 = d (mm)		1200	845	3	
	σ_N	$\sigma_N + \phi\Delta\sigma$			σ_N
Convés Superior Com Superestrutura	21,569	42,121	34,669	21,569	36,240
Convés Borda Livre Com Superestrutura	6,577	13,694	11,114	6,577	9,440
Convés Borda Livre Sem Superestrutura	38,133	42,442	40,880	38,133	69,280
Chapa do Fundo Sem Superestrutura	-24,251	-29,609	-27,666	-24,251	-60,160
Eficiência da Casaria do Convés Navio Nodrizza (η)					
Vasta		68%	73%	83%	86%
Cadwell		80%	87%	100%	95%
Terazawa		48%	59%	100%	70%

A figura a seguir representa os níveis de eficiência estimados (de acordo com os critérios descritos) para as três hipóteses de apoio da casaria do convés sobre o convés de borda livre. Adicionalmente, os diferentes resultados obtidos são comparados com o uso desses critérios em função dos resultados observados nas análises dos módulos do casco.



No gráfico anterior pode ser visto que ao implementar os critérios de eficiência da superestrutura com os resultados obtidos do MEF existe um comportamento mais próximo nas tendências de Vasta e Cadwell quando avaliada a casaria com uma largura próxima ao valor da boca do navio, que está representando a situação real do navio em estudo.

Apêndice II Avaliação dos escantilhões para navio Nodriza pela sociedade classificadora Bureau Veritas

HULL STRUCTURE DESIGN
 STEEL SHIPS OF LESS THAN 65 m IN LENGHT
 ESCANTILHÕES BUQUE NODRIZA FLUVIAL VI
 CÁLCULOS PARA NAVEGAÇÃO EM ÁGUAS ABERTAS

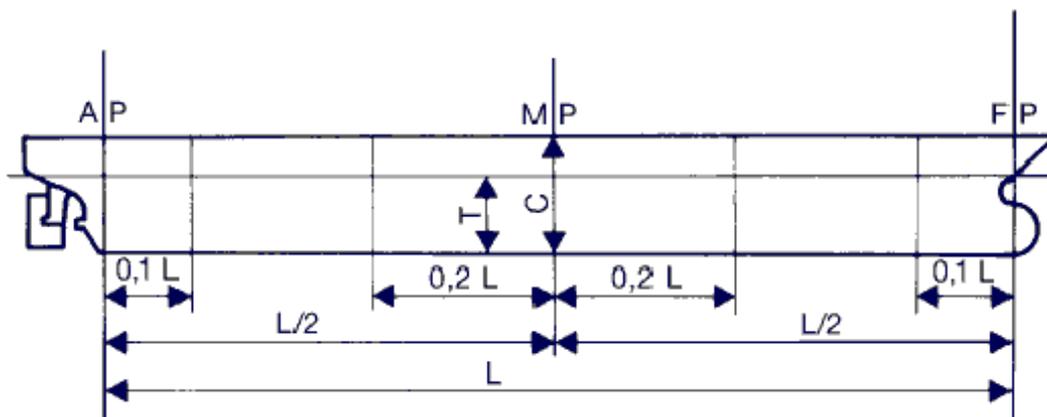
3.02 Unidades e definições

Tabela 3-02-I		
Designações	Simbologia	Unidade
Espessura do Chapeamento	e	mm
módulo Seccional Reforços	w	cm ³
módulo Seccional Viga Navio	W	m ³
Esforços	r, t	N/mm ²
Cargas Concentradas	P	t
Cargas Distribuídas	p	t/m ou t/m ²
Vão dos Reforços	l	m
Espaçamento entre reforços	E	m
Altura carga de projeto	h	m

Regiões para avaliação

Seção media compreendida 0,2L para cada lado (MP)

Regiões finais compreendidas entre 0,1L (FP e AP)



De acordo ao direcionamento dos reforços paralelos com o espaçamento menor, definidos como reforços secundários na regra, navios são construídos com um sistema de cavernamento longitudinal ou transversal ou uma combinação dos dois.

Reforços secundários são suportados por vigas definidas como membros primários, entre eles:

- Hastilhas e vigas de fundo
- Escoa de costado e Cavernas gigantes
- Sicordas e Vaus (transversais) de convés
- Cavernas verticais e reforços horizontais sobre anteparas

Sumario de Simbología e Valores Usados			
Símbolo	Valor	Unidade	Descrição
L	39,260	m	Comprimento
B	9,500	m	Boca moldada
C	3,100	m	Pontal
T	1,000	m	Calado
Cb	0,756		Coeficiente de Bloco
Eo	0,578	m	Espaçamento reforços
Deslocamento	275,000	Toneladas	
γ	1,025	t/m ³	
do	1,000	m	Altura carga base
Re	235,000	N/mm ²	Esforços escoamento mínimo garantido
k	1,021		Fator de material Aço A 131 g A
k2	0,780		Fator de material Aço balístico (HR)
c	1,000		Fator material aço
Lo	39,675		Acero A 131 gA
Lo2	34,673		Aço balístico
g	9,810	m/s ²	Aceleração gravidade
Wm	0,087	m ³	Mínimo módulo seccional na seção mestra
Wp	0,030	m ³	Módulo seccional Convés de vôo
Wf	0,048	m ³	Módulo seccional no fundo
Wt	0,107	m ³	Módulo seccional convés de borda livre
F	4,078		Coeficiente
rs	1,021		Coeficiente
rs2	0,780		Coeficiente
r0	1,000		Coeficientes de navegação
r1	1,000		Coeficientes de navegação
r2	1,000		Coeficientes de navegação
r3	1,000		Coeficient
t	0,901		Coeficiente de calado
rp	0,910		Coeficiente
rp2	0,883		Coeficiente
μ	1,000		Coeficiente relação aspecto chapas
l	1,200		Função de μ
β	1,000		6-05-II
E1	1,200	m	Espaçamento entre cavernas
E2	0,600	m	Esp. entre long. Leves fundo e duplo fundo
E3	0,600	m	Espaçamento entre longitudinais de costado
E4	0,600	m	Espaçamento entre long. leves do convés
E5	4,800	m	Espaçamento entre sicordas
E6	2,400	m	Espaçamento entre quilhas e longarinas
E7	1,200	m	Espaçamento entre vaus
E8	0,600	m	Espaçamento entre reforços anteparas
γ	1,000	t/m ³	Gravidade específica do carregamento
emin	5,000	mm	Mínima espessura do chapeamento
I1	4,500	m	Espaçamento suporte hastilhas
I2	1,200	m	Espaçamento suporte longitudinais leves
I3	2,330	m	Espaçamento suporte reforços anteparas
I4	0,600	m	Espaçamento dos reforços verticais duplo fundo
I5	8,400	m	Espaçamento entre apoios quilhas
I6	1,200	m	Espaçamento suporte long. costado e convés
I7	4,800	m	Espaçamento suporte vãos

6-01 Requerimentos Gerais			
6-012 Esforços Permissíveis			
Tabela 6-01-III Aço 131 gA			
Maximo esforço	Águas não restritas		
(N/mm ²)	Membros long.	Membros transversais	Anteparas
esforço de flexão	122,40	146,88	230,10
Esforço cortante	83,23	97,92	132,19
Esforços combinados	146,88	171,35	
Tabela 6-01-V Espessura mínima das almas ou flanges dos reforços secundários (mm)			
Compartimentos	Não contribuindo aos esforços primários		Contribuindo aos esforços primários
Secos	4,552		5,220
Tanques	5,220		5,220
6-014 Reforços Secundários			
21- A largura efetiva do chapeamento dos reforços secundários deve seguir os seguintes parâmetros, quando comparados será tomado o menor valor de:			
Vigas Engastadas nos finais	E/2		0,2l
Viga com um extremo fixo e outro apoiado	E		0,25l
Chapa sobre um costado do reforço	E/2		0,1l

6-03 Resistência Longitudinal			
6-033 Critérios de esforços			
1-11 O módulo de seção na seção central em convés, fundo e em uma distancia Vt do eixo neutro, não deve ser menor de $W=r1Wm$ (m ³)			
0,0869			
Módulos de Seção	Wp	Wf	Wt
	0,030	0,048	0,107
	Convés Vão	Fundo	Convés de Borda Livre
1-13 O Momento de Inércia da seção mestra não deve ser menor do valor obtido de $3r1*r3*Wm*L*10^{-2}$ (m ⁴)			
0,1024			
6-035 Critérios adicionais			
1-13 Na região media, o momento fletor em águas tranqüilas, não deve ser maior que $Mc=175W10^3-roM(hv)$ KN*m			
M(Hv)	Momento de flexão de onda vertical (kN*m)		
M(Hv) Condição de alquebramento $190*FL^2BCb10^{-3}$			
8574,0464			
M(Hv) Condição de Tosamento $110*FL^2B(Cb+0,7)10^{-3}$			
9561,6181			
Mc(sw) Condição de alquebramento $Mc=175W10^3-roM(hv)$ KN*m			
-3293,9399			
Mc(sw) Condição de tosamento $Mc=175W10^3-roM(hv)$ KN*m			
-4281,5115			

6-042 Cargas de Projeto		
6-042 Cargas na seção média (Altura em metros)		
Fundo (Chapas e reforços)		hf
		1,750
Chapas do costado		hm
		1,440
Chapas do convés		hm
		1,000
Reforços Fundo		
z	0,000	1,750
Reforços duplo fundo		
z	0,800	1,250
Reforços Costado		
z	0,600	1,250
Reforços do convés		
z	3,100	1,250
Reforços do costado superestrutura		
z	0,000	1,250
6-044 Convés de carga e duplo fundo (altura em metros)		
1-11 A altura da carga de projeto em metros deve ser considerada para os escantilhões do convés de carga ao ambiente deve ser o maior valor obtido entre o valor de "h" obtido em 6-042 ou de $h_p = 0,4 + 1,2p$. O valor de $p = \text{carga (t/m}^2\text{)}$		
		1,250
2-21 A altura da carga sobre o duplo fundo e reforços secundários não deve ser menor que $h = 1,2p$. O valor de p é a carga sobre o duplo fundo (t/m^2)...0,7C		
		2,604
6-044 Carga de Acomodações		
Embaixo do convés resistente		0,850
Convés Resistente 0,55do		0,550
Praças Longas		0,500
Camarim		0,300
Outros espaços		0,250
6-047 Anteparas estanques (acima e embaixo do convés)		
1-11 A altura da carga de projeto em metros deve ser considerada para os escantilhões das anteparas estanques embaixo do convés e não deve ser tomada menor de $h = d$ ou $h = d_0$, qualquer os dois seja o maior. Onde "d" é a distancia em metros desde o ponto de carga até o convés.		
		2,700
2-21 A altura da carga de projeto em metros para anteparas estanques em porões acima do convés não deve ser menor do valor obtido de $h = 0,8d_0$		
		0,800

6-05 ESTRUTURA DO FUNDO	
1-11 Os requerimentos desta seção são para cavernamento longitudinal e transversal em estruturas de fundo duplo e simples.	
A cargas de projeto para ser consideradas são:	

Chapeamento do fundo na seção media (Pressão do mar)			
1,750			
Duplo Fundo carga líquida		dc	0,800
0,800			
Duplo fundo carga seca			
2,604			
6-052 Cargas de projeto			
Tabela 6-05-1		h	dc
dc é a distancia do ponto da carga até o topo do porão			
Chapa do Fundo	Pressão mar	2,650	
Chapa do Fundo	carga líquida	3,700	3,100
Duplo Fundo	Carga líquida	3,500	2,500
Duplo Fundo	Carga seca	2,604	1,500
Hastilhas e vigas	estranques e carga seca	2,500	1,500
2-24 O módulo de seção de qualquer reforço longitudinal localizado em regiões intermédias não deve ser menor do valor obtido de $w=\gamma*rs*h*E*I^2$. Onde $\gamma=5,6+7(0,4-(x/L))$ para o fundo e $\gamma=5,6+2(0,4-(x/L))$ para duplo fundo. "x" é distancia longitudinal (m) desde a perpendicular na seção mestra até o ponto a avaliar. "h" altura da carga de projeto (m)			
3. Requerimentos adicionais			
3-31 A largura da chapa da quilha (m) sobre o comprimento do navio não deve ser menor de $b=0,003(L+270)$			
0,92778			
A espessura da chapa da quilha não deve ser menor da chapa do fundo.			
A espessura da chapa do bojo não deve ser menor da chapa adjacente.			
6-053 Chapas e reforços associados			
1-11 A espessura mínima da chapa do fundo e duplo fundo não deve ser menor do valor obtido de (mm)			
Chapa da Quilha..... $e=[7+0,06Lo+5(E-Eo)]r1t$			
8,550			
Chapa do Fundo Cavernamento longitudinal..... $e=[5+0,05Lo+5(E-Eo)]r1t$			
6,390			
Chapa duplo Fundo em porão..... $e=[4+0,04Lo+5(E-Eo)]r1t$. Acrescentando 1,5 mm para praça de máquinas			
5,132			
6-054 Estrutura de Fundo simples			
12. Tem que existir uma viga central (Quilha) estendida no comprimento tanto como seja possível.			
13. Quilhas Laterais têm que ser fixadas com um espaçamento não maior de 2,5 m			
18. Escantilhões de chapas e reforços secundários estão em complemento com 6-053			
3. Cavernamento Longitudinal			
3-31 Como regra, o espaçamento entre hastilhas não deve ser maior de 5 cavernas na seção media, 2 cavernas em praças de maquinas, 1 caverna em médio da maquina principal e o janzete do mancal de escora.			

4- Quilha sólida		
41-A área seccional (cm ²) das quilhas verticais sólidas em aço forjado ou rolado não deve ser menor que $S1= 1,28L*rs$ ou $S2=0,8L*rs*((B/C)+20(T/L))$. ($0,05<T/L<0,075$) (Sea going); Para outros $S3=(0,4+10T/L)(1,5L-9)*rs$(cm ²) Para escolher o maior valor		
S1		51,322
S2		64,668
S3		45,856
A espessura não deve ser menor do valor $e=(0,7*Lo+5)r1t$ (mm)		
29,526		
5- Estrutura Primaria		
51- A espessura das almas na secção media (mm) das hastilhas, vigas de fundo não deve ser menor dos seguintes valores. Para praças de máquinas incrementar 1 mm		
Quilha Central	$e=(7,0+0,05Lo)r1t$	8,094
Escoas	$e=(5,5+0,05Lo)r1t$	6,742
Hastilhas	$e=(5,5+0,05Lo)r1t$	6,742
52- O módulo seccional (cm ³) das vigas de fundo suportando hastilhas não deve ser menor de $w=6,6*\beta rshEI^2$. $\beta=1,2$ (Quilha Central); $\beta=1$ (Quilha Lateral)		
Quilha Central		3424,352
Quilha Lateral		2853,627
6-055 Estrutura do duplo fundo		
1-11 Como regra geral a altura não pode ser menor de $0,1\sqrt{L}$ (m)		
0,627		
3- Cavernamento Longitudinal		
O espaçamento entre hastilhas não deve ser maior de 5 cavernas na seção media do navio, 2 cavernas em praça de máquinas e uma caverna entre a máquina principal e o janzete do mancal de escora.		
32- Espessura das borboletas que conectam cada lado da chapa marginal, ou quilha central aos longitudinais de fundo e duplo fundo. Deve ser o maior valor entre $e=1,6r1tLo^{(1/3)}$ ou a espessura da chapa do fundo. (mm)		
4,917		
4- Membros Primários		
41-Escantilhões dos membro primários têm que cumprir com o requerido em tabela 6-05-IV, para espessuras mínimas (mm). Incrementando 1 mm para praças de máquinas. Espessura das almas		
Quilha Central	$e=(6,0+0,05Lo)r1t$	7,1929
Escoas e hastilhas	$e=(4+0,04Lo)r1t$	5,0336
42- Escantilhões dos membro primários estanques estão em concordância com a tabela 6-05-II		
Tabela 6-05-II		
Espessura de chapeamento Cavernamento Longitudinal (mm)		
Chapa de fundo e bojo		
4,091		
Chapa do Duplo fundo		
3,879		
Membros Primários estanques do duplo fundo Reforços (Girders)		
Não presentes no barco		

Membros Primários estanques do duplo fundo. Chapas das hastilhas (Plate floors)	7,083
Módulo de Seção dos reforços secundários (cm³)	
Hastilhas de gio (Não tem)	347,438
Longitudinais do fundo e bojo	16,368
Longitudinais duplo fundo	13,786
Reforços verticais em membros primários de duplo fundos estanques	3,088
43- Onde se precisar, os escantilhões dos membros primários basearam em cálculos diretos levando em consideração os esforços permissíveis em 6-012	
44- Onde a estrutura do fundo é reforçada longitudinalmente, incremento e redução em tamanho de furos pode se requer dentro da região que se estende da chapa marginal ate as cercanias das escoas.	
5- Hastilhas Abertas	
51- O módulo de seção para hastilhas abertas não deve ser menor de $w=5,6rshEI^2$ (cm³)	347,438
Não presentes para este navio na seção media	

6-06 Estrutura da Chapa do Casco

6-061-23 Cavernas Gigantes têm que se instalar no final de vigas de escotilhas 6-076-51

6-062 Cargas de projeto

Tabela 6-06-I		h (m)
Estrutura da Chapa do costado		
Pressão do mar na região media		
Chapeamento		1,440
Reforço z=	0,3	1,480
		hi (m) (Bojo)
dc=	2,4	3,09
Estrutura do casco interno		
Carregamento líquido		3,400
Espaço Seco		2,400

6-063 Chapeamento e reforços associados

1- Espessura mínima

11- Como uma regra a mínima espessura das chapas do costado e do casco interno não devem ser menor de....

Chapeamento do costado abaixo do convés de borda livre $e=[5+0,05Lo+5(E-Eo)r1t]$

7,082

Chapeamento do costado entre o convés de borda livre e convés resistente $e=[5+0,03Lo+5(E-Eo)r1t]$

6,289

Chapeamento do casco interno $e=[4+0,04Lo+5(E-Eo)r1t]$

5,685

12- A mínima espessura das almas e flanges dos reforços secundários devem estar de acordo com a Tabela 6-01-V

2- Escantilhões (Cavernamento Longitudinal na Seção Media)	
21- Escantilhões das chapas e reforços secundários devem concordar com os valores obtidos da tabela 6-06-II	
Espessura do chapeamento (mm)	
Chapa do Costado	$e=4,4 \cdot r_p \cdot \mu \cdot E \cdot h^{0,5}$ (mm)
	2,884
Casco interno	$e=4,4 \cdot r_p \cdot \mu \cdot E \cdot h^{0,5}$ (mm)
	2,884
Membros Primários Estanques Duplo Casco. Reforços Estanques e Cavernas Gigantes. Espaços Secos	
	2,557
Módulo de Secção (cm³)	
Longitudinais do costado	$w=5,6 \cdot r_{sh} \cdot E \cdot I^2$ (cm³)
	7,116
Casco interno	$w=5,6 \cdot r_{sh} \cdot E \cdot I^2$ (cm³)
	7,116
Membros Primários Estanques Duplo Casco. Reforços Estanques e Cavernas Gigantes. Espaços Secos $w=1 \cdot r_{sh} \cdot E \cdot I^2$ $l=5,6$ (cm³)	
	55,142
4- Fiada do Cintado	
41- A largura da fiada do cintado não pode ser menor de $b=0,715+0,425 \cdot (L/100)$ (m)	
	0,882

6-064 Estrutura do Casco Simples

1- Gerais

11- Para usar em cavernamentos longitudinais e transversais e determinar escantilhões de Escoas de costado (Side stringers) e Cavernas Gigantes suportando reforços longitudinais.

3- Cavernamento Longitudinal

31-Reforços Longitudinais devem ser contínuos tanto como fosse praticável, no médio de cavernas gigantes e anteparas transversais

4- Estrutura Primaria

42- O módulo de seção mínimo requerido deve ser o maior avaliado entre $w=5,6 \cdot r_s \cdot b \cdot h^2$ e o valor de 6-064-41

7,313

43- O módulo de seção (cm³) das cavernas gigantes suportando longitudinais do costado não deve ser menor do valor obtido 6-064-41. $w=5,6 \cdot r_s \cdot h^2 \cdot b \cdot l^2$

55,142

6-066 Conexão de Cavernas

2- Borboletas superior de Cavernas (Caverna Gigante e Vãos)

O comprimento do braço de borboletas de topo não deve ser menor do valor de $d=\theta \sqrt{(w+30)/e}$ (mm)

e	4,8237	Espessura mínima
---	--------	------------------

θ	48	Borboleta não sem flange
----------	----	--------------------------

w	55,1425	Menor módulo seccional entre vau e caverna lateral
---	---------	--

201,663

3- Borboletas de fundo (Caverna Gigante e Hastilha)

O comprimento do braço de borboletas de topo não deve ser menor do valor de $d=\theta \sqrt{(w+30)/e}$ (mm)

e	4,8237	Espessura mínima
---	--------	------------------

θ	50	Borboleta não sem flange
----------	----	--------------------------

w	55,1425	Menor módulo seccional da caverna lateral
---	---------	---

210,065

6-07 Estrutura dos Convés		
1- Gerais		
11- Neste determinam-se os escantilhões para Convés Resistente		
6-072 Cargas de projeto		
11- Carregamento para determinação estrutura do convés.		
Tabela 6-07-I		
h=do	1	Convés resistente
6-073- Chapeamento e reforços associados		
1- Espessura mínima		
11- A mínima espessura do chapeamento do convés não deve ser menor do valor obtido de		
Espessura do chapeamento (mm)		
Seção Media	$e=4+ 0,07L_o + 5 (E-E_o) r_{1t}$ (mm)	
	6,204	
Módulo Seccional (cm ³)		
Seção Media	$w=7r_s*h*E*I^2$	
	6,177	
21- A mínima espessura do chapeamento do convés resistente não deve ser menor do valor obtido de Tabela 6-07-II		
2- Trincaiz		
A largura mínima do trincaiz em metros não deve ser menor de $b=0,005(L+70)$		
	0,546	
6-075 Convés cavernado longitudinalmente		
Sicordas		
14- Os módulo de secção dos escantilhões da estrutura primaria livre de aberturas está definido em tabela 6-07-02		
Seção Media	$w=7r_s*h*E*I^2$	cm ³
	2421,259	
Vaus de convés		
21- O módulo de seção mínimo tem que ser $5,6*r_s*h*E*I^2$		
	158,123	
Assumido apoio entre sicordas		

6-08 Anteparas			
1- Aplicação			
11- Pode se aplicar para determinação de anteparas longitudinais ou transversais, anteparas de tanques ou de coferdams			
6-082 Cargas de projeto Anteparas			
Tabela 6-08-I	Carga projeto (h)	Prova Tanques (he)	dc
Anteparas Estanques	2,330	3,100	3,100
Anteparas de Tanques	4,100	4,030	3,100
6-083 Chapeamento e reforços associados			
1- Mínima espessura			
11- A mínima espessura para chapas de anteparas é			
Espessura mínima do chapeamento (mm)			
Antepara estanque	$e=4+0,04L_o+5(E-E_o)*r_{1t}$ (mm)		
	5,132		
Antepara de tanque	$e=4+0,05L_o+5(E-E_o)*r_{1t}$ (mm)		
	5,489		

21- Chapeamento e escantilhões estão em concordância com tabela 6-08-II		
β	90,000	Ângulo do reforço
l	0,625	Antepara estanque
h	2,600	Carga de projeto
l	1,830	Espaçamento parcial
Po	3,330	Coeficiente
P'o	5,560	Coeficiente
Espessura do chapeamento (mm)		
Antepara estanque	$e=3,9\mu E(kh)^{0,5}$ (mm)	
	3,813	
módulo seccional reforço vertical (cm ³)		
Antepara estanque (cm ³)	15,039	
3- Conexões finais dos reforços secundários		
31- Todos os finais de reforço de antepara devem ter uma borboleta como regra geral		
32- As dimensões devem ser como a continuação expõe-se		
a (altura)		
Acima	80*l (mm)	
	186,400	
Abaixo	100*l (mm)	
	233,000	
b (comprimento)		
Base	$80((w+20)/e)^{0,5}$ (mm)	
	204,656	
Espessura borboleta	$e=0,85r1(Lo)^{0,5}$ (mm)	
	5,354	

6-10 Superestrutura

6-102 Cargas de projeto

11- Cargas de projeto devem ser consideradas como descritas em tabela 6-10-I

h	3,000	Costados e finais frontais não resguardados e caserias mais baixas
h	1,500	Quaisquer outro
h	1,000	Convés seção media

6-103 Chapeamento e reforços associados

11- Chapeamento e reforços têm que estar em concordância com tabela 6-10-V

Tabela 6-10-V Referenciada para 6-063

Espessura do chapeamento (mm)

Chapa do Costado	$e=4,4*rp*\mu*E*h^{0,5}$ (mm)	
	4,163	

Espessura mínima

6,289

Módulo de Seção (cm³)

Longitudinais do costado	$w=7rshEI^2$ (cm ³)	
	18,530	

Fator de correção por borboletas

15,751

Apêndice III Avaliação dos Escantilhões Para Navio Nodrizza Pela Sociedade Classificadora Nippon Kaiji Kyokai.

NIPPON KAIJI KYOKAI
RULES FOR THE SURVEY AND CONSTRUCTION OF SMALL SHIPS
PART CS HULL CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF SMALL SHIPS

Capítulo 1 Gerais			
1.1.1. Aplicação			
Esta parte é usada para Navios de formas e proporções normais e comprimento menor a 90 metros para ser classificados para serviços não restritos			
1.1.3 Navios de formas ou proporções não comuns, ou destinados para cargas especiais.			
Em Navios de formas ou proporções não comuns, os requerimentos equivalentes à construção do casco, equipamento, arranjo e escantilhões serão decididos individualmente, baseado nos princípios gerais desta parte em lugar dos requerimentos exigidos da mesma.			
1.3.1 Materiais			
Quando aços de alta resistência são usados considerações especiais devem ser levadas em conta. Aços comuns são relacionados na parte K da regra desta sociedade.			
1.3.2 Escantilhões			
A menos que fosse dito explicitamente em outra secção, os módulos de secção requeridos pelas regras incluem o chapeamento efetivo de 0.1 l a cada lado do elemento. No entanto, 0.1 l não deve ser maior do espaçamento entre os membros.			
Flanges de chapas que conformam vigas e transversais, sua espessura não pode ser menor que a alma das chapas e sua largura total não pode ser menor que o valor obtido de:			
Largura total flange conformando viga (mm)		$85,4 \cdot (do \cdot l)^{1/2}$ (mm)	
do	altura das quilhas e transversais (m)		
l	espaçamento entre suportes (borboletas pode ser consideradas como suportes) (m)		
1.4 Definições gerais			
L	37,750	Comprimento (m)	
B	9,5000	Boca (m)	
D	3,1000	Pontal (m)	
d	1,0000	Calado (m)	
W	275,0000	Deslocamento de Projeto (ton.)	
Cb	0,7668	Coeficiente de bloco	
Capítulo 5 Fundo Simples (Single Bottom)			
S	1,2	m	Espaçamento entre hastilhas
h	2,0460	m	d ou 0,66D qualquer seja maior quando comparados
do	0,5000	m	Altura das hastilhas 5.3
l	8,0000	m	Espaçamento entre os pés das borboletas de caverna mais 0,3 m

5.1.1 Quilha vertical (Center girder)
O fundo simples está conformado por uma viga composta por chapas de face e almas e tem que se estender tanto como seja possível
A espessura das almas não deve ser menor do valor obtido a continuação. Pode ser diminuído para 85% do valor nas partes finais do barco.
$0,065L + 5,2$ (mm)
7,654
A altura das almas não deve ser menor que as hastilhas.
A espessura das chapas das flanges não deve ser menor às almas na secção media e tem que se estender desde a antepara de colisão até o tanque de colisão a ré.
A área seccional não deve ser menor do valor obtido a continuação.
$0,6L + 9$ (cm ²)
31,650
A largura das chapas das flanges não devem ser menores do valor a continuação
$2,3L + 160$ (mm)
246,825
5.2 Escoas, quilhas laterais (Side Girders)
Instaladas para que os espaçamentos não sejam maiores de 2,5 metros entre a quilha central e o chapeamento do costado do casco e são vigas compostas estendidas tanto como seja possível
O valor das alma das escoas não deve ser menor que:
$5,8 + 0,042L$ (mm)
7,3855
Em praças de maquinas a espessura das almas não deve ser menor à calculada na secção media
A espessura da chapas das flanges não deve ser menor quando comparadas com as almas e a área seccional não deve ser menor que:
$0,45 * L + 8,8$ (cm ²)
25,7875
5.3 Hastilhas (Floor Plates)
Em Navios com escantilhões transversal o espaçamento padrão das hastilhas será:
$450 + 2L$ (mm)
Espaçamento não deve exceder 610 mm entre o 0,2L do final em proa até a antepara de colisão. O usar o valor menor quando comparara com a formulação anterior.
Espaçamento não deve ser maior que 3,5 metros com escantilhonado longitudinal.
1,200
5.3.2 Perfil (Shape)
Bordes superiores das hastilhas não devem estar em nenhuma parte embaixo do nível do borde superior na linha central.
A altura da hastilha referenciada desde uma distancia (do) não pode ser menor de $(0,5 * do)$
Onde se encontrarem borboletas de cavernas, a altura da hastilha no lado interno pode ser $0,5 * do$.
5.3.3 Escantilhão das hastilhas (Scantlings)
Os escantilhões das hastilhas não podem ser menores aos valores obtidos de:
Altura na linha central $0,0625 * l$ (m)
0,500
Espessura $10 * do + 4$ (mm) ou 12 mm, qualquer seja o menor. Depois de 0,5L pode ser diminuído até 0,85 excetuando o fundo chato.
7,650
Módulo Seccional $4.27 * Shl^2$ (cm ³)
670,957

Em praças de máquinas devem ser enrijecidos e de altura suficiente. Sua espessura não pode ser menor à alma da viga central. No fundo resistente a proa deve ser incrementado.
5.3.4 Borboletas de cavernas (Frame Brackets)
As borboletas serão estendidas até dois vezes acima da parte superior da quilha comparada com a medida obtida para a altura das cavernas na linha media. (mm)
1000
O comprimento das borboletas medido acima das cavernas desde o lado de fora das cavernas até o pé da mesma não deve ser menor ao valor obtido para altura da caverna na secção media
0,500
A espessura não deve ser menor a obtida para espessura das cavernas
7,650
5.3.5 Calha do porão (limber Hole)
Serão previstas acima das cavernas nos chapeamentos em cada lado, além na parte mais baixa do bojo em barcos com fundos chatos.
Furos de alívios de peso serão previstas em cavernas, levando em consideração a compensação a ser feita incrementando a altura da caverna ou por qualquer outro jeito.
5.4 Longitudinais
5.4.1 Espaçamento
O espaçamento padrão é obtido de $2L + 550$ (mm)
625,500
5.4.2 Longitudinais
O módulo seccional dos longitudinais do fundo não deve ser menor que o obtido de $9Shl^2$ (cm ³)
15,4081
Para construção do fundo de proa enriquecido ver 6.9

Capitulo 6 Duplo fundo (Inner bottom)			
S	0,6000	m	Espaçamento dos longitudinais do fundo
h	1,9815	m	Distancia vertical dos longitudinais ao ponto de d+0,026L acima da parte superior da quilha
l	1,2000	m	Espaçamento das hastilhas sólidas
C	8,6000		Constante sem pé de galinha para determinação do módulo Seccional dos longitudinais do duplo fundo
6.1.5 Hastilhas estanques e vigas 14.2.2 e 14.2.3			
6.1.6 Espessura mínima da estrutura do duplo fundo não pode ser menos a 6 mm			
6			
6.2 Quilha Central			
6.2.1 Arranjo e construção			
2. Tem que ser continua para 0.5 L			
3. Estanques para quando vão transportar líquidos			
6.2.2 Portas de visitas podem ser feitas fora dos 0.75L entre cavernas sem ser maiores de 1/3 da altura da viga			
6.2.3 Altura da quilha central			
Não deve ser menor a B/16, pero também não menor de 700 mm			
593,75			
6.2.4 Espessura da quilha central			
Não deve ser menor do valor obtido de $0.05L + 6$ (mm)			
7,8875			

6.2.5 Borboletas
Quando um cavernamento longitudinal é adotado no duplo fundo, borboletas transversais devem ser previstas entre as hastilhas com um espaçamento não maior de 1,75 m conectando a chapa da viga central ao chapeamento do fundo, como também aos longitudinais do fundo.
A espessura das borboletas não deve ser menor que o obtido da seguinte formulação. Mais não deve ser maior que a hastilha sólida na mesma localização.
$0,6*(L^{(1/2)})+2,5$ (mm)
6,186461718
6.3 Escoas (Side Girders)
Dentro do 0,5L o espaçamento não deve exceder 4,6 metros
Fundo de proa enriquecido terá vigas de media altura 6.9.2
6.3.2 Espessura das escoas
Não deve ser menor do valor obtido de $0,65*L^{(1/2)} + 2,5$ (mm)
6,4937
6.4 Hastilhas solidas(Solid floors)
6.4.1 Arranjo
O espaçamento não pode ser maior de 3,5 metros, em praças de máquinas cada caverna tem que ter uma hastilha solida
3,5
6.4.2 Espessura das hastilhas sólidas
Não deve ser menor que a obtida da seguinte formulação e terá ser incrementada 1,5 mm nas salas de praça de máquinas.
Escantilhão longitudinal $0,7*L^{1/2}+2,5$ (mm)
6,8009
Escantilhão Transversal $0,6*L^{1/2}+2,5$ (mm)
6,1865
6.4.3 Enrijecedores verticais
Terão que se instalar nas hastilhas sólidas em cada longitudinal leve no caso de cavernamento longitudinal no duplo fundo. Não deverão ser menor de uma chapa chata de espessura igual às hastilhas e altura não menor de 0,08do (m)
0,04
6.6 Longitudinais (longitudinais)
O espaçamento padrão é o obtido do valor de $2L+550$ (mm)
625,500
6.6.2. Escantilhões (Scantlings)
Longitudinais do fundo
O módulo seccional dos longitudinais do fundo não deve ser menor ao obtido de $CSHl^2$ (cm ³)
14,723
Longitudinais do duplo fundo (cm ³) podem ser o 85% dos longitudinais do fundo
12,515
6.6.3 Pé de galinha verticais (Vertical Struts)
Quando o espaçamento das chapas das hastilhas seja maior a 2,5 metros tem que ser instalados pé de galinha.
6.7 Chapa duplo fundo e chapa marginal (Inner bottom plating and margin plates)
6.7.1 Espessura da chapa do duplo fundo
A espessura não deve ser menor do valor obtido na seguinte formulação, tendo que ser incrementado seu valor em 2 mm em praças de máquinas e embaixo de escotilhas. $3,8S*(d^{1/2}) + 2,5$ (mm)

Cavernamento longitudinal	3,6400
Cavernamento transversal	3,6400
6.7.4 Espessura de chapas marginais	
A chapa marginal terá que ser maior 1,5 mm do valor obtido em 6.7.1	
Longitudinal	5,1400
Transversal	5,1400
6.7.5 Largura das chapas marginais	
Tem que se estender bem dentro da linha das pontas das borboletas de costado.	
6.7.6 Borboletas	
Quando o cavernamento seja longitudinal no duplo fundo, borboletas serão instaladas transversalmente em cada transversal de costado desde a chapa marginal até o fundo adjacente e longitudinais do duplo fundo.	
A espessura não pode ser menor que $0,6 (L^{1/2}) + 2,5$ (mm)	
	6,1865
6.8 Borboletas de tanques de costado	
A espessura das borboletas conectando transversais de costado às chapas marginais tem que se aumentar em 1,5 mm do valor obtido em 6.2.5-2. Os cantos livres das borboletas tem que ser enrijecidas	
	7,686

Capitulo 7 Cavernas (Frames)			
C	2,6		Constante 7.3.2
S	1,2	m	Distancia entre cavernas
S	0,6000	m	Espaçamento entre longitudinais de costado (m)
lo	2,3300	m	Distancia vertical acima do duplo fundo até acima da caverna gigante medida no costado
l	1,5273	m	Distancia vertical do longitudinal ao ponto d+0,044L-0,54 (m) acima da quilha (Frame)
h	1,5290	m	Distancia vertical do longitudinal do costado até o ponto d+0,044L-0,54 (m) acima da quilha (longitudinal do costado)
h	1,2860	m	Distancia vertical no ponto meio de lo até o ponto d+0,044L-0,54 (m) acima da quilha (web frames). Não menor a $1,43 \cdot lo$
h	3,3319	m	$1,43 \cdot lo$
C1	4,7		Tabela CS 7.1
C2	45		Tabela CS 7.1
d1	0,2330	m	Altura das cavernas gigantes
s	0,0093	m	Altura da ranhura para prazo dos longitudinais
l3	2,1500	m	1,8 ou 2,15 (7.5.2)
C	0,7400		Tabela 7.2
7.2 Espaçamento em cavernamento transversal			
O espaçamento padrão é o obtido da seguinte formulação $450 + 2L$ (mm)			
			525,5
7.2.2 Espaçamento em cavernamento longitudinal			
O espaçamento padrão é $550 + 2L$ (mm)			
			625,5

7.3 Cavernas de costado (transverse Hold Frame)	
O módulo seccional das cavernas de costado não deve ser menor de 30 cm^3 ou ao valor obtido de $CShI^2 \text{ (cm}^3\text{)}$	
25,8688	
7.4 Longitudinais de Costado (Side Longitudinais)	
O módulo seccional na secção media embaixo do convés de borda livre não deve ser menor de 30 cm^3 ou $8,6ShI^2$ ou $2,9 (L^{1/2}) \cdot SI^2$. Será levado em consideração o maior valor (cm^3)	
11,3611	
47,2932	
7.4.2 Cavernas Gigantes (Web Frames)	
As cavernas gigantes suportando longitudinais de costado devem estar num espaçamento não maior de 4,8 metros em seções onde hastilhas sólidas estão presentes	
O escantilhão não deve ser menor ao obtido da seguinte formulação:	
Altura $0,1 l$ (m) ou 2,5 vezes a altura da ranhura para os longitudinais, qualquer uma seja maior	
0,2330	
módulo Seccional $C1ShI^2 \text{ (cm}^3\text{)}$	
102,0194	
Espessura da alma $(C2/1000) \cdot (IhI2/d1) + 2,5$ (mm)	
4,3740	
7.5 Cavernas das Cobertas (Tween deck Frame)	
As previsões estão baseadas num arranjo estrutural padrão a fim de manter a rigidez transversal do barco por meio de eficientes anteparas de cobertas colocadas acima das anteparas de porão ou pelas cavernas gigantes estendidas à parte superior das superestruturas em intervalos adequados.	
7.5.2 escantilhões de cavernas de cobertura (Aplicáveis a Superestrutura)	
O módulo seccional das cavernas de costado não deve ser menor ao valor obtido de $CSI3L \text{ (cm}^3\text{)}$	
72,0723	

Capitulo 10 Vaus (Beams)			
h	1,3000	t/m ²	Carregamento acima do convés para vãos 17.1.1
S	0,6000	m	Espaçamento entre vaus longitudinais
S	1,2000	m	Espaçamento entre vaus transversais
l	4,8000	m	Espaçamento máximo entre sicordas
l	1,2000	m	Distanciamento horizontal entre anteparas e cobertas transversais ou entre cavernas (Longitudinais Convés)
10.1.2 Conexões do final dos vaus			
Vaus longitudinais têm que ser contínuos ou têm que ser conectados com borboletas nos seus extremos em forma tal para desenvolver efetivamente uma área seccional e ter suficiente resistência à flexão e tensão.			
Vaus transversais devem ser conectados a cavernas por borboletas. Devem ser instalados onde cavernas são omitidas em cobertas ou superestruturas e devem ser conectadas às chapas de costado por borboletas.			
10.2 Vaus Longitudinais			
10.2.1 Espaçamento			
O espaçamento padrão de vaus longitudinais é obtido da seguinte formulação $2L + 550$ (mm)			
625,5			

10.2.3 módulo Seccional de vaus Longitudinais
O módulo de vaus fora da linha de aberturas no convés na secção media do barco não pode ser menor do valor obtido de $11,2Shl^2$ (cm ³)
12,5798
10.3 Vaus Transversais (Transverse Beams)
Vaus transversais devem ser conectados em cada caverna de costado
O módulo de secção não pode ser menor do valor obtido de $4,2*Shl^2$ (cm ³)
150,9581

Capitulo 12 Sicordas (Deck Girder)			
do	0,2000	m	Altura das sicordas
l	1,2000	m	Distancia entre suportes de sicordas, quando existir borboletas contra flambagem elas podem se considerar como suportes
l	8,4000	m	Distancia entre o centro das colunas ou do centro da coluna à antepara das sicordas, ou onde ela se encontre efetivamente suportada
b	1,2000	m	Distancia entre centros de dois vão adjacentes de vaus suportados pelas sicordas ou as cavernas (m) 12.2.1
h	1,3000	t/m ²	Carregamento da cobertura 17.1
w	0,0000	t	Carregamento suportado pelo pilar de cobertas 11.2
k	0,0000	m	Coefficiente 12.2.1
C	1,6000		12.2.2 Constante para sicordas sem aberturas no convés
C	4,2000		12.2.2 Constante para sicordas sem aberturas outras cobertas
S1	1,2000	m	Espaçamento das almas dos reforços de altura dos longitudinais
<p>Não devem exceder um espaçamento maior de 4,6 metros como fosse possível. Borboletas contra flambagem devem ser instalada em espaçamento não de mais de 3 metros e onde a largura da flange seja maior de 180 mm sobre cada lado da sicorda. A espessura das flanges formando sicordas não pode ser menor à sua alma e a sua largura não pode ser menor à obtida de: $85,4(do*l)^{(1/2)}$ (mm)</p>			
41,837			
12.2 Sicordas longitudinais			
O módulo seccional das sicordas fora da linha de aberturas na secção media do barco não deve ser menor a $12,7*l(lbh+kw)$ (cm ³)			
1397,935			
12.2.2. Momento de Inércia das sicordas			
O momento de inércia das sicordas não pode ser menor do valor obtido de CZI (cm ⁴)			
Sicordas de convés			
18788,243			
Sicordas (considerações especiais)			
49319,137			
12.2.3 Espessura das almas			
Não deve ser menor do valor obtido de $10S1+2,5$ (mm)			
14,5			

Capitulo 13 Anteparas estanques (Watertight Bulkhead)			
S	0,6000	m	Espaçamento dos reforços 13.2.1

h	3,4000	m	Distancia vertical na linha central (não menor de 3,4 m)
l	2,1800	m	Distância dos suportes total 13.2.3
h	2,7200	m	13.2.3
C	0,8000	m	13.2
13.2.1 Espessura das chapas de anteparas			
Uma antepara estanque deve estar disposta no final de cada praça de máquinas. As anteparas devem-se estender até o convés de borda livre. A espessura da chapa das anteparas não deve ser menor do valor de $3,2S*(h^{0,5})+2,5$ (mm)			
6,040			
13.2.3 Reforços			
O módulo de secção dos reforços não deve ser menor a $2,8 CShl^2$ (cm ³)			
17,373			
13.2.5 Longarinas suportando reforços de anteparas			
Se apresentarem o módulo de secção mínimo é $4,7Shl^2$ (cm ³)			
36,841			

Capitulo 15 Resistência Longitudinal (Longitudinal Strength)			
K1	6,1325		15.2
K2	0,5657		15.2
C1	1,0000		Convés
C1	1,0600		Fundo
C2	1,0000		Convés Tosamento
C2	1,0600		Fundo Tosamento
C2	1,0300		Convés e fundo Alquebramento
Ms	659,5000		Momento fletor longitudinal em águas tranquilas (t-m)
15.2.1 Módulo de secção na secção mestra			
15.2.1 O módulo de secção na secção mestra do casco não deve ser menor do que o maior valor obtido das seguintes formulas $Z1=C1K1L^2B(Cb'+0,7)$ ou $Z2=65C2[0,14K2L^2BCb'(1+0,04L/B)+Ms]$ (cm ³)			
Z1 Convés resistente			
121778,6676			
Z1 Fundo			
129085,388			
Z2 Convés resistente tosamento			
96547,343			
Z2 Fundo tosamento			
102340,183			
Z2 Convés resistente e fundo alquebramento (alquebramento)			
99443,7628			
15.2.1.2 Momento de Inércia da secção transversal do casco			
Não deve ser menor do valor obtido de $3ZL$ (cm ⁴)			
14618920,148			
15.2.2. Calculo módulo de secção do casco			
Todos os membros longitudinais os quais sejam considerados efetivos serão levados em conta.			
Aberturas no convés terão que se diminuir da área seccional usada no calculo do módulo de secção. Aberturas pequenas não serão levadas em consideração ($C 2,5 * L 1,2$), se elas não diminuir o módulo de secção no convés ou no fundo em mais de 3%			

O módulo de secção no convés deve ser calculado pela divisão do momento de inércia pelo través próximo da linha neutra para as seguintes distancias, qualquer uma seja mais grande. (a) Distancia vertical do eixo neutro ao topo do convés. Ao fundo com relação ao topo da quilha. Ou pelo valor de $Y(0.9+0,2(X/B))$, qualquer um seja o maior valor.	
Z1 Convés de vôo $y = 339,317$ (cm ³)	
	43083,371
Z1 Convés $y = 95,8$ (cm ³)	
	152598,331
Z1 Fundo $y = 211,1$ (cm ³)	
	69251,161

Capitulo 16 Chapa do casco (Shell Plating)			
S	0,6000	m	Espaçamento entre longitudinais leves
16.2 Chapa da quilha			
A largura da chapa da quilha em todo o comprimento do barco não pode ser menor de $4,5L+775$ (mm)			
944,875			
A espessura não pode ser menor de $4,0S(d+0,035L)^{0,5} + 4$ (mm)			
7,656555756			
16.3 Chapa do casco na secção media			
A espessura das chapas externas do casco embaixo do convés resistente na secção media não pode ser menor do valor que $0,044L+5,6$ (mm)			
7,2610			
A espessura da chapa do costado não pode ser menor do valor que $4,1S(d+0,04L)^{0,5}+2,5$ (mm), sem considerar a fiada do cintado			
6,3974			
A fiada do cintado (Sheer Strakes) deve ter no mínimo 0,75 vezes o trincanis			
A espessura da chapa do fundo incluindo o bojo e sem considerar a chapa da quilha na secção media deve ser no mínimo que $4,0S(d+0,035L)^{0,5}+2,5$ (mm)			
6,1566			
16.5 Chapa do costado de superestrutura deve ser avaliada da mesma forma que para o chapeamento do casco quando a coberta da superestrutura seja considerada como coberta resistente.			

Capitulo 17 Convés (Decks)			
a	0,7000		Chapa do convés secção media
a	0,4700		Vaus
a	0,2300		pontais
a	0,2300		Sicordas
b	1,0000		Constante
y	2,1000		Distancia vertical da linha do calado até o convés medida no costado
C	0,2100		Chapa do convés secção media
C	0,1400		Vaus
C	0,1200		Sicordas e pontais
S	0,6000	m	Espaçamento entre longitudinais do convés
S	0,6000	m	Espaçamento entre transversais do convés

17.1 Valor do carregamento do convés (h)	
O valor de h para espaços destinados para levar carga pode ser especificado mais criticamente como o valor de 0,7 vezes altura entre cobertas ou a carga por unidade de área presente no compartimento. Para convés de borda livre, convés da superestrutura "h" não pode ser menor do valor obtido de " $a(0,067bL-y)$ (t/m^2)"	
Chapa do convés	0,3005
Vaus	0,2017
Pontais	0,0987
Sicordas	0,0987
Mínimo valor de h a comparar e usar. Se o valor obtido das formulações fosse menor a 1,3, esse valor será tomado como 1,3	
Chapa do convés	1,9672
Vãos	1,0799
	1,3000
Pontais e Sicordas	0,8570
	1,3000
17.4 Espessura das chapas do convés (Deck Plating)(mm)	
1. Chapa do convés resistente	$4,6 \cdot S \cdot (h^{0,5}) + 2,5$
	6,3711
2. Chapa para outros convés	$3,9 \cdot S \cdot (h^{0,5}) + 2,5$
	5,7820

Capítulo 18 Superestrutura (Superstructure)			
a	2,3146		Chapa da anteparas frontais e de costado
b	1,0664		Coeficiente
x	26,0000	m	Distancia da anteparas de proa até PP a ré
c	1,0000		Coeficiente
y	3,2000		Distancia vertical do calado até o ponto meio da longitude não suportada do reforço.
S	0,6000		Distancia entre reforços do costado da super
l	2,0000		Distancia entre cobertas
Superestruturas			
18.2.1 Coluna de água (h)			
Para o calculo dos escantilhões da superestrutura, das anteparas nos extremos da mesma, e chapas de costado o carregamento a considerar é $ac(0,067bL-y)$ (t/m^2)			
1,1640			
18.2.2 Espessura da anteparas e das chapas de costado			
Não deve ser menor ao valor obtido de $3S(h)^{0,5}$ (mm)			
1,9420			
Mais o valor anterior não deve ser menor ao valor obtido de $5+L/100$			
5,3775			
18.2.3 Reforços			
O módulo de secção não deve ser menor ao valor obtido $3,5Shl^2$ (cm^3)			
9,7775			

Apêndice IV Determinação de Tensões Secundárias e Terciárias do Navio Nodriza.

A seguir são apresentadas as tabelas resumindo os diferentes critérios para a avaliação das tensões secundárias e terciárias nos elementos conformando a estrutura na secção central do navio nodriza. Para as tensões secundária é usada a teoria simples de vigas considerando os elementos engastados ou apoiados.

Condição de Full Load para uma condição de esforços gerada por uma onda em Alquebramento														
Calculos dos Esforços Secundarios														
		Vão (S)	Vao (l)	Fixação	Col. Agua (h)		Carga Distribuida		Módulo Seccional		σ_x		σ_x resultante	
	Unidades	m	m	Fator	m	m	N/m	N/m	m ³	m ³	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²
No.	Elementos			Eng/Apo	Sup.	Aba.	Superior	Inferior	Flange Sup	Chapa	Flange Sup	Chapa	Flange Sup	Chapa
Convés B.L														
1	Quilha Central (Pesado)	2	8,4	24	1	2,3	20090	45835,3	7,33E-03	1,29E-02	1,03E+07	-5,86E+06	1,03E+07	-5,86E+06
2	Longitudinal leve do fundo	0,6	1,2	24	0,7	2,3	4218,9	13750,6	2,55E-05	1,78E-04	2,24E+07	-3,21E+06	1,81E+07	-9,07E+06
3	Longitudinal de fundo intermedio	0,6	1,2	24	0,7	2,3	4218,9	13750,6	2,55E-05	1,78E-04	2,24E+07	-3,21E+06	2,24E+07	-3,21E+06
4	Longitudinal Leve do Costado	0,2	1,2	24	0	1,7	0	3378,1	2,55E-05	1,78E-04	7,94E+06	-1,14E+06	7,94E+06	-1,14E+06
5	Quilha Central à altura duplo fundo	2	8,4	24	1	2,3	20090	45835,3	7,33E-03	1,29E-02	1,03E+07	-5,86E+06	1,03E+07	-5,86E+06
6	Longitudinal leve do Duplo Fundo próximo	0,6	1,2	24	1	0,0	6027	0,0	2,55E-05	1,78E-04	1,42E+07	-2,03E+06	3,16E+07	8,29E+06
7	Longitudinal leve do Duplo Fundo intermedio	0,6	1,2	24	1	0,0	6027	0,0	2,55E-05	1,78E-04	1,42E+07	-2,03E+06	1,42E+07	-2,03E+06
8	Sicordas Engastada em Anteparas (assumido)	4,8	8,4	24	1	0,0	48216	0,0	1,69E-04	1,14E-03	8,39E+08	-1,25E+08	8,39E+08	-1,25E+08
8,1	Sicordas Apoiada nos Vãos (assumido)	4,8	1,2	8	1	0,0	48216	0,0	1,69E-04	1,14E-03	5,14E+07	-7,64E+06	5,14E+07	-7,64E+06
9	Longitudinal leve do Convés próximo	0,6	1,2	24	1	0,0	6027	0,0	2,55E-05	1,78E-04	1,42E+07	-2,03E+06	2,63E+08	-1,27E+08
9,1	Longitudinal leve do Convés próximo	0,6	1,2	8	1	0,0	6027	0,0	2,55E-05	1,78E-04	4,25E+07	-6,09E+06	5,01E+07	-1,37E+07
Convés 02														
10	Sicordas CV assumido engaste anteparas	4,8	8,4	24	0,1	0,0	4821,6	0,0	1,69E-04	1,14E-03	8,39E+07	-1,25E+07	8,39E+07	-1,25E+07
11	Longitudinal Convés de Vão	0,6	1,2	24	0,1	0,0	602,7	0,0	8,40E-05	3,12E-04	4,30E+05	-1,16E+05	8,76E+07	-1,26E+07
Anel														
12	Hastilha Sólida	1,2	4,5	24	1	2,3	12054	103061,7	2,62E-03	4,69E-03	-2,93E+07	1,64E+07	2,93E+07	-1,64E+07
13	Caverna	1,2	2,3	8	0	1,5	0	34193,2	1,69E-04	1,14E-03	5,97E+07	8,88E+06	5,97E+07	-8,88E+06
14	Vão engastado nos costados	1,2	9,5	24	0,5	0,0	6027	0,0	1,69E-04	1,14E-03	1,34E+08	-2,00E+07	1,34E+08	-2,00E+07
15	Vão apoiado nas sicordas	1,2	4,8	8	0,5	0,0	6027	0,0	1,69E-04	1,14E-03	1,03E+08	-1,53E+07	1,03E+08	-1,53E+07

As tensões terciárias são estimadas de acordo às teorias para placas submetidas a pequenas deflexões sob cargas de pressão lateral uniforme. Para isto, se consideram todos os bordes da chapas avaliadas como engastados e os esforços são determinados mediante a aplicação de, $\sigma = kp\left(\frac{b}{t}\right)^2$, onde k depende da relação das dimensões dos bordes da chapa $\frac{a}{b}$.

Calculos dos Esforços Terciarios Longitudinais					
Dimensões/Panel		FUNDO	DUPLO FUNDO	CONVÉS BORDA LIVRE	CONVÉS VÔO
a	m	1,20E+00	1,20E+00	1,20E+00	1,20E+00
b	m	6,00E-01	6,00E-01	6,00E-01	6,00E-01
a/b		2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00
t	m	6,35E-03	6,35E-03	6,35E-03	6,35E-03
h	m	2,28E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E-01
p	N/m²	2,29E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+03
K		3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01
μ		3,00E-01	3,00E-01	3,00E-01	3,00E-01
σ	N/mm²	6,95E+07	3,05E+07	3,05E+07	3,05E+06

Apêndice V Cálculos das Inércias Para os Diferentes Componentes da Secção Mestra.

A seguir são relacionados os diferentes componentes conformando a inércia da secção central do navio Nodriz. Para simplificação só apresentam-se os resultados da tabela do navio com superestrutura. Inércia da secção central do casco até o convés de borda livre e da superestrutura independentemente, só visualizam os resultados totais.

DETERMINAÇÃO DA INERCIA EQUIVALENTE DA SEÇÃO MESTRA DO NAVIO NODRIZA COM SUPERESTRUTURA								
Descrição elemento	Quant.	Altura (h)	Base (b)	Área	Dist. (L.Base)	Primeiro Momento	Segundo Momento	Inercia
CASCO				mm ²	y	mm ³	mm ⁴	mm ⁴
Chapeamento								
Convés	2	6,35E+00	4,75E+03	6,03E+04	3,10E+03	1,87E+08	5,79E+11	1,01E+05
Chapa costado	2	2,50E+03	6,35E+00	3,18E+04	1,85E+03	5,87E+07	1,09E+11	8,27E+09
Chapa Duplo Fundo	2	6,35E+00	4,75E+03	6,03E+04	8,32E+01	5,02E+06	4,17E+08	1,01E+05
Chapa Quilha	2	7,90E+00	1,00E+03	1,58E+04	3,95E+00	6,24E+04	2,47E+05	4,11E+04
Reforços Principais								
Sicorda convés asa	2	6,35E+00	7,62E+01	9,68E+02	2,90E+03	2,80E+06	8,12E+09	1,63E+03
Sicorda convés alma	2	2,00E+02	6,35E+00	2,54E+03	3,00E+03	7,62E+06	2,29E+10	4,23E+06
Longarina (Quilha Lateral)	2	7,00E+02	8,00E+00	1,12E+04	4,50E+02	5,04E+06	2,27E+09	2,29E+08
Quilha central	1	8,00E+02	8,00E+00	6,40E+03	4,00E+02	2,56E+06	1,02E+09	3,41E+08
Reforços Secundários								
Enrijecedor do convés asa	13	6,35E+00	2,88E+01	2,38E+03	3,02E+03	7,20E+06	2,18E+10	6,15E+02
Enrijecedor do convés alma	13	7,37E+01	6,35E+00	6,08E+03	3,06E+03	1,86E+07	5,70E+10	2,11E+05
Enrijecedor do costado alma 1 (Bojo)	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	5,97E+02	5,58E+05	3,33E+08	1,57E+03
Enrijecedor do costado asa 1	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	5,86E+02	2,14E+05	1,26E+08	1,27E+04
Enrijecedor do costado alma 2	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	1,40E+03	1,31E+06	1,82E+09	1,57E+03
Enrijecedor do costado asa 2	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	1,38E+03	5,07E+05	7,02E+08	1,27E+04
Enrijecedor do costado alma 3	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	2,00E+03	1,87E+06	3,73E+09	1,57E+03
Enrijecedor do costado asa 3	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	1,98E+03	7,27E+05	1,44E+09	1,27E+04
Enrijecedor do costado alma 4	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	2,60E+03	2,43E+06	6,30E+09	1,57E+03
Enrijecedor do costado asa 4	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	2,58E+03	9,46E+05	2,45E+09	1,27E+04
Enrijecedors duplo fundo asa	12	6,35E+00	2,88E+01	2,20E+03	7,23E+02	1,59E+06	1,15E+09	6,15E+02
Enrijecedor duplo fundo alma	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	7,63E+02	7,14E+05	5,45E+08	2,11E+05
Enrijecedor fundo asa 1	2	6,35E+00	2,88E+01	3,66E+02	7,68E+01	2,81E+04	2,16E+06	6,15E+02
Enrijecedor fundo alma 1	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	3,68E+01	3,44E+04	1,27E+06	2,11E+05
Enrijecedor fundo asa 2	2	6,35E+00	2,88E+01	3,66E+02	9,11E+01	3,34E+04	3,04E+06	6,15E+02
Enrijecedor fundo alma 2	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	5,11E+01	4,78E+04	2,44E+06	2,11E+05
Enrijecedor fundo asa 3	2	6,35E+00	2,88E+01	3,66E+02	1,34E+02	4,91E+04	6,57E+06	6,15E+02
Enrijecedor fundo alma 3	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	9,40E+01	8,79E+04	8,26E+06	2,11E+05
Enrijecedor fundo asa 4	2	6,35E+00	2,88E+01	3,66E+02	2,20E+02	8,04E+04	1,77E+07	6,15E+02
Enrijecedor fundo alma 4	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	1,80E+02	1,68E+05	3,02E+07	2,11E+05
Enrijecedor fundo asa 5	2	6,35E+00	2,88E+01	3,66E+02	2,63E+02	9,61E+04	2,52E+07	6,15E+02
Enrijecedor fundo alma 5	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	2,23E+02	2,08E+05	4,63E+07	2,11E+05
Enrijecedor fundo asa 6	2	6,35E+00	2,88E+01	3,66E+02	3,05E+02	1,12E+05	3,42E+07	6,15E+02
Enrijecedor fundo alma 6	2	7,37E+01	6,35E+00	9,35E+02	2,65E+02	2,48E+05	6,59E+07	2,11E+05

Continuam elementos constituindo inércia...

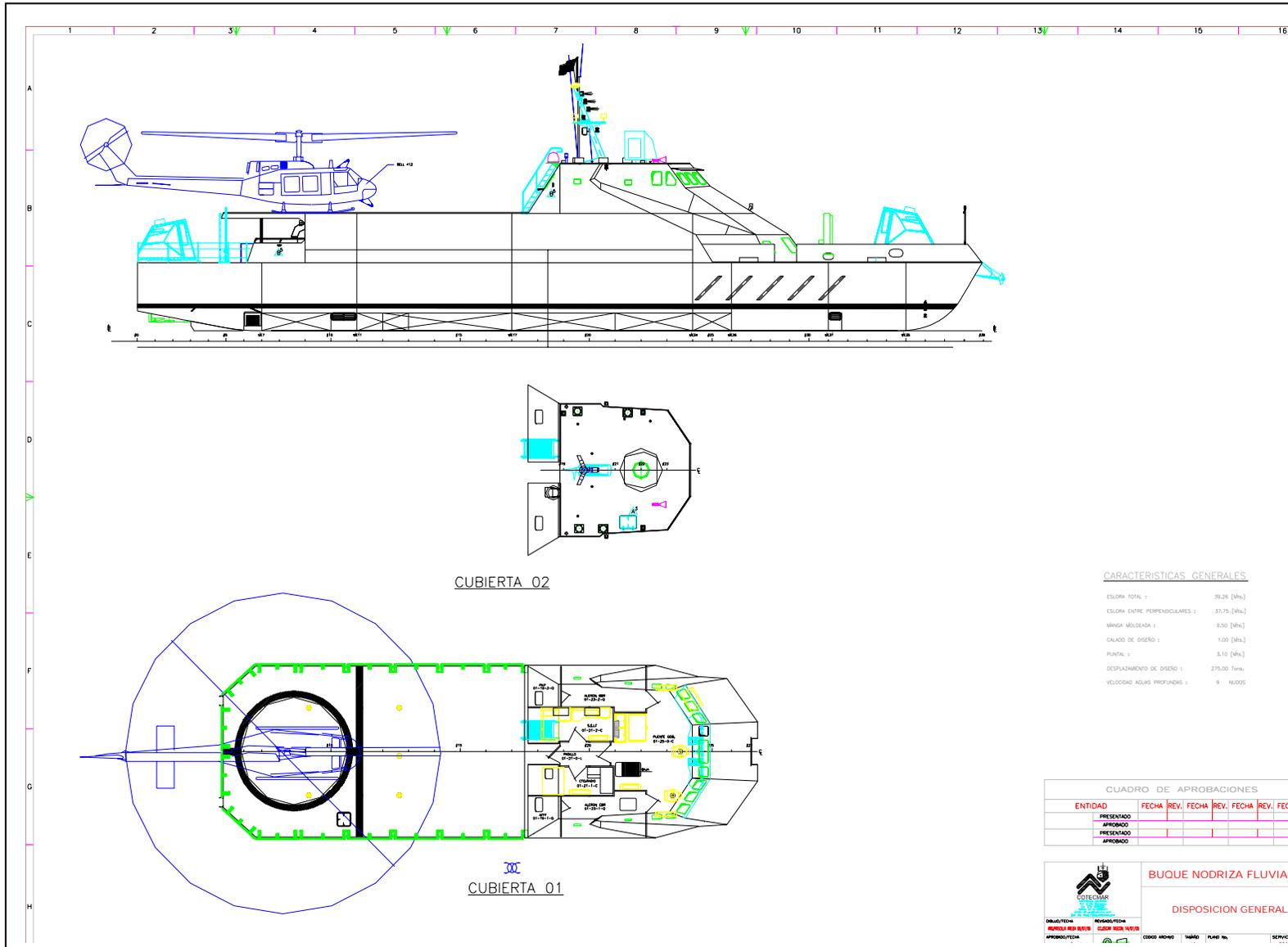
SUPERESTRUTURA								
Chapeamento								
Convés 01	2	6,35E+00	3,91E+03	4,96E+04	5,36E+03	2,66E+08	1,42E+12	8,33E+04
Chapa costado junta	2	5,00E+01	4,76E+00	4,76E+02	3,13E+03	1,49E+06	4,65E+09	4,96E+04
Chapa costado	2	2,14E+03	4,76E+00	2,04E+04	3,84E+03	7,84E+07	3,01E+11	3,41E+09
Reforços Principais								
Sicorda convés alma	2	2,00E+02	6,35E+00	2,54E+03	5,25E+03	1,33E+07	7,01E+10	4,23E+06
Sicorda convés asa	2	6,35E+00	7,62E+01	9,68E+02	5,15E+03	4,98E+06	2,57E+10	1,63E+03
Reforços Secundários								
Enrijecedores do convés asa 01	11	6,35E+00	2,88E+01	2,01E+03	5,28E+03	1,06E+07	5,60E+10	6,15E+02
Enrijecedores do convés alma 02	11	7,37E+01	6,35E+00	5,14E+03	5,32E+03	2,73E+07	1,45E+11	2,11E+05
Enrijecedor do costado asa 1	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	3,67E+03	1,34E+06	4,93E+09	1,27E+04
Enrijecedor do costado alma 1	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	3,67E+03	3,43E+06	1,26E+10	1,57E+03
Enrijecedor do costado asa 2	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	4,27E+03	1,56E+06	6,68E+09	1,27E+04
Enrijecedor do costado alma 2	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	4,27E+03	4,00E+06	1,71E+10	1,57E+03
Enrijecedor do costado asa 3	2	2,88E+01	6,35E+00	3,66E+02	4,87E+03	1,78E+06	8,69E+09	1,27E+04
Enrijecedor do costado alma 3	2	6,35E+00	7,37E+01	9,35E+02	4,87E+03	4,56E+06	2,22E+10	1,57E+03
Elementos não planos e retos								
Bojo	2	6,35E+00	2,54E+02	2,53E+03	1,61E+02	4,09E+05	6,60E+07	1,54E+07
Chapa Fundo	2	6,35E+00	3,51E+03	4,46E+04	1,13E+02	5,02E+06	5,66E+08	3,64E+02
SUMA				3,46E+05		7,30E+08	2,92E+12	2,45E+10
Altura linha neutra	y			2,11E+03	mm			
Inercia com relação linha base	I (l.b)			2,94E+12	mm ⁴			
Inercia com relação eixo neutro	I (l.n)			1,40E+12	mm ⁴			
Inércias				Módulo Seccional				
Com relação eixo neutro	1,400	m ⁴			Wp	Convés vôo	0,43	m ³
Com relação linha base	2,942	m ⁴			Wf	Fundo	0,66	m ³
Eixo Neutro	2,111	m			Wt	Convés B.L.	1,42	m ³

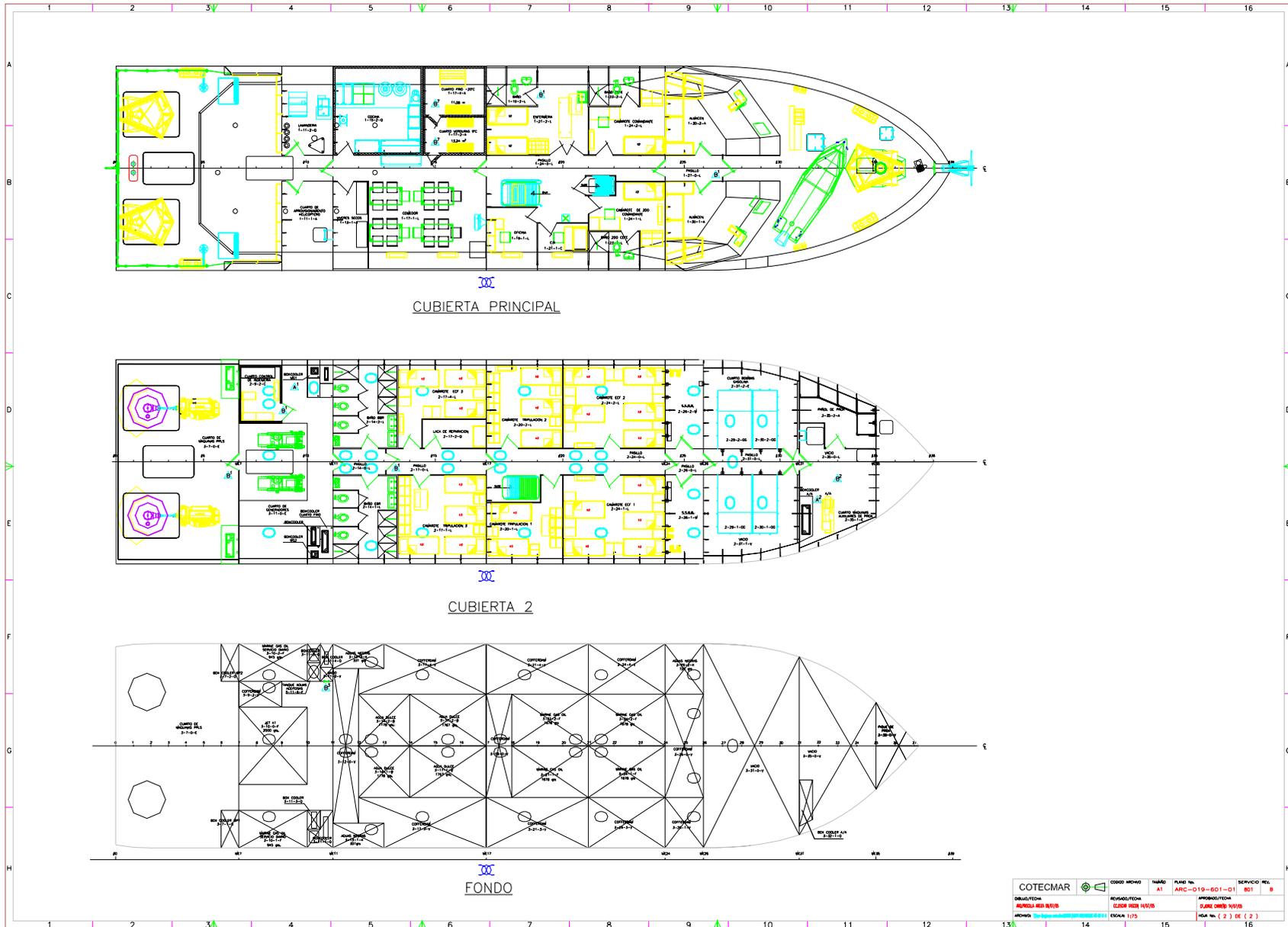
DETERMINAÇÃO DA INÉRCIA EQUIVALENTE DA SEÇÃO MESTRA DO NAVIO NODRIZA SEM SUPERESTRUTURA								
Inércias				Módulo Seccional				
Com relação eixo neutro	0,465	m ⁴			Wf	Fundo	0,389	m ³
Com relação linha base	0,838	m ⁴			Wt	Convés B.L.	0,244	m ³
Eixo Neutro	1,195	m						

DETERMINAÇÃO DA INÉRCIA EQUIVALENTE DA SEÇÃO DA SUPERESTRUTURA								
Inércias				Módulo Seccional				
Com relação eixo neutro	0,045	m ⁴			Wp	Convés vôo	0,104	m ³
Com relação linha base	0,327	m ⁴						
Eixo Neutro	1,820	m						

Apêndice VI Plano de Distribuição Geral do Navio Nodriza em Estudo.

Planos de distribuição suministrados pelo armador para avaliação estrutural.





COTECMAR CONSULTOR AV. BOLIVAR 1175 MONTEVIDEO	CODIGO PROYECTO: A1	TITULO: ARC-019-801-01	SERVICIO: 8
	PROYECTO:	PROYECTO:	PROYECTO:
	CLIENTE:	CLIENTE:	CLIENTE:
	FECHA:	FECHA:	FECHA: