

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

NICOLAS BRISTOT MORETTO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES TIPO *FERRY-BOAT*
DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Joinville

2016

NICOLAS BRISTOT MORETTO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES TIPO *FERRY-BOAT*
DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Prof., Dr. Rafael Gallina Delatorre

Joinville

2016

Nicolas Bristot Moretto

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES TIPO *FERRY-BOAT*
DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Naval.

Joinville, 08 de julho de 2016

Prof., Dr. Thiago Pontin Tancredi
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof., Dr. Rafael Gallina Delatorre
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa., Dra. Viviane Lilian Soethe
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof., Dr. Thiago Pontin Tancredi
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Inézio e Olívia, e ao meu irmão Josias por toda a educação e conselhos dados durante minha vida, e por terem moldado minha personalidade sempre prezando pelo respeito e honestidade.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de estudar em uma universidade com educação de excelência.

Aos professores, por superar as adversidades de um campus em fase de implantação e levar o Campus Joinville a um patamar de qualidade superior, sempre trazendo o máximo conhecimento aos alunos.

À Netuno Engenharia Naval e toda sua equipe, por terem me dado a oportunidade de realizar estágio na cidade de Manaus-AM, propiciando-me um grande conhecimento em várias áreas da Engenharia Naval, tão diversa na Região Amazônica. Gostaria de agradecer também por disponibilizar todo o apoio e os materiais necessários para a realização deste estudo, e pela ajuda durante minha estadia na capital amazonense.

A todos meus grandes amigos do período da faculdade, que garantiram momentos de muita alegria e sempre estiveram presentes nos momentos bons e ruins, tornando o período universitário inesquecível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Gallina Delatorre, por aceitar o desafio de me orientar apesar da distância e das dificuldades encontradas, estando sempre disposto a ajudar.

RESUMO

Na Região Amazônica, a utilização do transporte por rios não é apenas uma opção, mas também uma necessidade. As embarcações transportam passageiros e também os mais variados tipos de produtos, conectando toda a região. Muitas cidades do interior e comunidades ribeirinhas possuem acesso exclusivo através das águas. As embarcações da região são construídas muitas vezes utilizando-se apenas da experiência dos construtores, sem qualquer estudo ou projeto adequado, e o trabalho do engenheiro naval fica, muitas vezes, em segundo plano. Um tipo de casco que vem sendo crescentemente utilizado na região é o casco do tipo *ferry-boat*, que apresenta algumas vantagens como maior espaço no convés e maior estabilidade transversal inicial. Barcos com esse tipo de casco foram analisados utilizando teorias da mecânica dos materiais e procedimentos de análise estrutural de embarcações. As estruturas do convés principal, costado e fundo foram analisadas e os fatores de segurança encontrados para avaliar se o dimensionamento das embarcações está adequado.

Palavras-chave: Barcos regionais, *ferry-boat*, análise estrutural, viga-navio.

ABSTRACT

In the Brazilian Amazon, the usage of transportation by rivers is not only an option but also a necessity. Boats carrying passengers and all sorts of products connect the entire region. Many smaller cities and coastal communities can be reached only through the water. The boat construction process in that area is usually proceeded using only the experience of the constructors without any study or proper design, and the role of naval architect is sometimes overlooked. A new type of hull that has been increasingly used in the region is the ferryboat hull type, which presents some advantages like larger deck space and increased initial transverse stability. Boats containing this type of hull have been analyzed using theories of mechanics of materials and ship structural analysis procedures. The structural panels of the main deck, hull side and hull bottom have been analyzed and the safety factors were calculated to assess whether the actual designs of the vessels are appropriate or not.

Keywords: Regional boats, ferryboat, structural analysis, hull girder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Típico local de construção naval, em Manaus-AM.....	13
Figura 2 – Embarcação <i>ferry-boat</i> amazônica similar às analisadas.....	14
Figura 3 – Carregamento, força cortante e momento fletor da viga-navio.....	21
Figura 4 – Distribuição das tensões primárias na viga-navio.....	22
Figura 5 – Localização da linha neutra e das tensões máximas na seção mestra. ...	23
Figura 6 – Condição de alquebramento.	24
Figura 7 – A) Tosamento e B) Alquebramento.....	24
Figura 8 – Estrutura secundária limitada por duas anteparas transversais.	25
Figura 9 – Viga composta por porção de chapa acoplada a um perfil.	26
Figura 10 – Linha neutra e variação das tensões de flexão.....	27
Figura 11 – Efeito de <i>shear lag</i> e distribuição das tensões.....	27
Figura 12 – Largura efetiva da chapa, ou chapa colaborante.....	28
Figura 13 – Largura da chapa colaborante.	29
Figura 14 – Estrutura terciária.....	30
Figura 15 – Constante k para o cálculo das tensões terciárias.....	31
Figura 16 – Vista da região portuária de Manaus-AM.....	35
Figura 17 – Arranjo Geral típico utilizado na Região Amazônica.....	36
Figura 18 – Convés retangular e formas arredondadas de casco.	38
Figura 19 – Diferença entre o espaço no convés para os dois tipos de cascos.	39
Figura 20 – Interior do casco da embarcação A.....	42
Figura 21 – Embarcação B A) Interior do casco e B) Vista do convés principal.	43
Figura 22 – Embarcação C A) Interior do casco e B) Vista externa.....	43
Figura 23 – Vista externa da embarcação E.	44
Figura 24 – Interior do casco da embarcação F.....	44
Figura 25 – Vista externa da embarcação G.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos elementos que constituem cada nível estrutural.	19
Tabela 2 – Dimensões principais das embarcações analisadas.	40
Tabela 3 – Relações adimensionais entre as dimensões principais.	41
Tabela 4 – Carga no convés utilizada nos cálculos.	46
Tabela 5 – Carga no fundo utilizada nos cálculos.	46
Tabela 6 – Fatores de segurança FS_x da estrutura longitudinal.	48
Tabela 7 – Fatores de segurança FS_{2y} da estrutura secundária transversal.	49
Tabela 8 – Fatores de segurança em relação à flambagem.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SINDINAVAL - Sindicato de Reparo e Construção Naval do Amazonas

ABS - American Bureau of Shipping

NORMAM - Normas da Autoridade Marítima

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Medida do maior lado da chapa
b	Medida do menor lado da chapa
be	Medida horizontal da seção
c	Largura da chapa colaborante
d	Distância vertical entre o centro geométrico da seção e a linha de base
h	Medida vertical da seção
hi	Altura inicial da seção
k	Constante dependendo da razão entre os lados da chapa e das condições de contorno
n	Quantidade de componentes idênticos em meia seção mestra
p	Pressão normal sobre a chapa
p'	Carregamento por unidade de comprimento da viga-navio
q	Carregamento por unidade de comprimento do perfil
t	Espessura da chapa
x	Posição ao longo da viga-navio
y	Distância vertical entre o ponto analisado e a linha neutra da seção
A	Área da seção
Δ	Deslocamento da embarcação
AB	Arqueação bruta
B	Boca moldada da embarcação
E	Módulo de elasticidade do aço
FS_x	Fator de segurança ao escoamento no sentido longitudinal
FS_{2y}	Fator de segurança ao escoamento na tensão secundária transversal
FS_{FL}	Fator de segurança à flambagem das chapas
H	Calado carregado da embarcação
I	Momento de inércia da seção
L	Comprimento total da embarcação
L_n	Posição da linha neutra em relação à linha base
L_1	$0,578 * L_2$
L_2	Comprimento da viga secundária entre apoios

M_1	Momento fletor na viga-navio
M_f	Momento fletor máximo do perfil $M_f = \frac{qL^2}{12}$ [N*mm].
P	Pontal moldado da embarcação
V	Força cortante na viga-navio
W_{SM}	Módulo de rigidez da seção mestra no ponto analisado
σ_x	Tensão longitudinal
σ_E	Tensão de escoamento do aço
σ_{Cr}	Tensão crítica de flambagem da chapa
σ_1	Tensão longitudinal primária de flexão
σ_{2x}	Tensão secundária longitudinal
σ_{2y}	Tensão secundária transversal
σ_3	Tensão terciária longitudinal
ν	Coefficiente de Poisson do aço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
	1.1 OBJETIVOS.....	14
	1.1.1 Objetivo Geral	14
	1.1.2 Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
	2.1 ARRANJO ESTRUTURAL DE NAVIOS	16
	2.1.1 Projeto Baseado em Regras	17
	2.1.2 Projeto Racional Otimizado	18
	2.2 ESTRUTURA PRIMÁRIA	19
	2.3 ALQUEBRAMENTO E TOSAMENTO	23
	2.4 ESTRUTURA SECUNDÁRIA	24
	2.5 EFEITO DE <i>SHEAR LAG</i> E CONCEITO DE CHAPA COLABORANTE....	26
	2.6 ESTRUTURA TERCIÁRIA	29
	2.7 FLAMBAGEM DE PLACAS.....	31
3	METODOLOGIA	33
4	EMBARCAÇÕES AMAZÔNICAS	35
	4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS EMBARCAÇÕES AMAZÔNICAS	35
	4.2 CASCOS DO TIPO <i>FERRY-BOAT</i>	37
5	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL	40
	5.1 EMBARCAÇÕES ANALISADAS	40
	5.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA LONGITUDINAL	47
	5.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA TRANSVERSAL.....	48
	5.4 ANÁLISE DA ESTABILIDADE À FLAMBAGEM	50
6	CONCLUSÃO	52
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO - EMBARCAÇÃO A	55
	ANEXO A – VISTA DA SEÇÃO MESTRA - EMBARCAÇÃO A	61

1. INTRODUÇÃO

O transporte realizado em hidrovias é de grande importância para a integração e desenvolvimento de um país, principalmente uma nação com tão grande território como o Brasil. Na região norte, a importância da utilização de hidrovias é ainda maior. Dados oficiais indicam que são transportadas pelas hidrovias brasileiras cerca de 22 milhões de toneladas de carga por ano, das quais 81,4% são feitas pela bacia amazônica (BRASIL, 2006). Cidades importantes como Manaus, Itacoatiara e Parintins, no estado do Amazonas, Santarém e Belém no Pará, e Porto Velho em Rondônia, são conectadas através dos rios, sendo os mais importantes o Rio Amazonas, Rio Negro, Rio Solimões e Rio Madeira. Além disso, muitas cidades e comunidades ribeirinhas do interior possuem acesso exclusivo através das águas, diferentemente do que ocorre em outras regiões brasileiras em que o fluxo de cargas e passageiros é realizado majoritariamente pelo modal rodoviário. Segundo o Sindicato de Reparo e Construção Naval do Amazonas (SINDINAVAL), 95% do abastecimento dos municípios amazonenses - incluindo todo tipo de produtos - é feito por via fluvial (BRASIL, 2008). Desta forma, a utilização de embarcações vai muito além de ser apenas uma opção, tornando-se, de fato, uma necessidade.

Os rios foram os canais de acesso que permitiram a colonização e desenvolvimento da região norte do Brasil, e, desta forma, a construção naval nesta região vem sendo realizada há muito tempo. Na beira dos rios da região há a presença de inúmeros estaleiros, capazes de construir desde pequenos caiaques de madeira até complexos navios para transporte de petróleo. Grande parte destes construtores navais utiliza apenas o conhecimento adquirido pela experiência, muitas vezes passado de pai para filho, e nestes casos o arranjo estrutural dos barcos é estabelecido de forma empírica, apenas se baseando no que já vem sendo construído. É muito comum também os casos em que os armadores compram os materiais, contratam a mão-de-obra, e eles mesmos constroem seus próprios barcos. A Figura 1 mostra embarcações sendo construídas em um típico estaleiro de pequeno porte localizado próximo a Manaus, no Amazonas.

Figura 1 – Típico local de construção naval, em Manaus-AM.



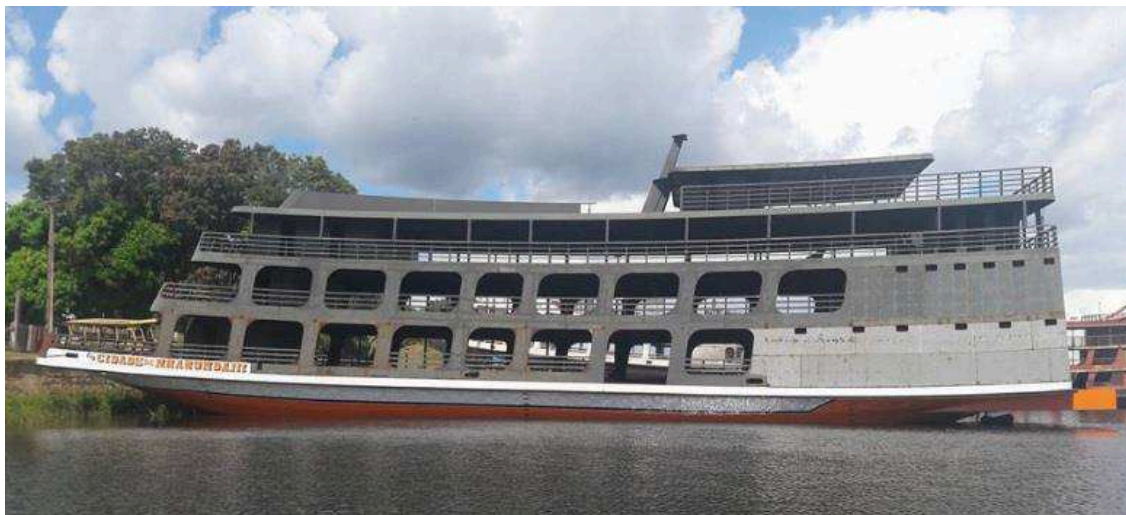
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como não é realizado um estudo no momento de conceber o arranjo estrutural, não se tem a certeza de que as estruturas estão sendo corretamente dimensionadas de acordo com as cargas solicitadas, o que pode acarretar em embarcações subdimensionadas, trazendo insegurança à embarcação, ou superdimensionadas, com excesso de custos de fabricação e de peso leve. Os engenheiros navais acabam muitas vezes sendo procurados apenas na fase final da construção de uma embarcação, quando o armador vê a necessidade de realizar os processos burocráticos necessários para que os barcos sejam autorizados a navegar. Desta forma, a importância do trabalho do engenheiro naval na região amazônica ainda não está bem difundida entre os construtores e armadores, limitando as informações quanto à qualidade das embarcações, e impedindo uma tentativa de otimizar os barcos.

Este trabalho se fundamenta em realizar uma análise estrutural preliminar de algumas embarcações já construídas na região, a fim de se conhecer as estruturas utilizadas e avaliar a eficiência dos arranjos estruturais. Cascos do tipo *ferry-boat* foram selecionados para a análise, utilizando teorias comuns na análise estrutural dentro da engenharia naval, como a separação das estruturas em primária, secundária e terciária, e o cálculo das tensões através de teorias de placas e vigas. As informações necessárias para a realização deste estudo, como dimensões, arranjo geral, cargas impostas e outros dados das embarcações foram colhidos do acervo de projetos da empresa Netuno Engenharia Naval Ltda. localizada em Manaus-AM, durante período de estágio curricular obrigatório realizado entre janeiro

e junho de 2016. A Figura 2 apresenta uma embarcação característica da região amazônica, possuindo um casco do tipo *ferry-boat* similar aos cascos analisados neste trabalho.

Figura 2 – Embarcação *ferry-boat* amazônica similar às analisadas.



Fonte: Netuno Engenharia Naval.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar e avaliar os arranjos estruturais típicos presentes em cascos do tipo *ferry-boat* utilizados em embarcações da Região Amazônica brasileira.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever as características gerais das embarcações amazônicas atuais;
- Estudar e descrever os cascos *ferry-boat*, encontrando as motivações para seu emprego na região;

- Discriminar os diferentes níveis estruturais do casco de uma embarcação, e como estes são relacionadas entre si;
- Entender as teorias mais utilizadas para os cálculos estruturais em cada nível estrutural;
- Calcular as tensões presentes na estrutura das embarcações;
- Averiguar o fator de segurança presente em cada parte da estrutura e discutir a qualidade dos projetos atuais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ARRANJO ESTRUTURAL DE NAVIOS

Um dos problemas mais complexos enfrentados pelos engenheiros navais consiste no dimensionamento e na escolha do arranjo estrutural adequado das embarcações e estruturas flutuantes. Estas tarefas relacionam-se diretamente com outros sistemas e etapas de um projeto, pois um arranjo estrutural adequado pode aumentar o volume interno e o seu porte bruto, e um projeto bem feito pode diminuir os custos com materiais durante o processo construtivo, ou mesmo tornar a embarcação mais rentável ao longo de sua vida útil.

As embarcações apresentam características únicas se comparadas a outras grandes construções feitas pelo homem, pois além de serem estruturas complexas e de grande porte, ainda necessitam navegar sobre as águas, sofrendo também com cargas dinâmicas, além das cargas estáticas presentes. Desta forma, cargas aleatórias agem sobre a estrutura, tornando difícil a identificação das forças externas atuando sobre a embarcação, e de qual forma elas são transferidas internamente entre os vários componentes estruturais (RAWSON;TUPPER, 2001). Sendo assim, a escolha de um arranjo estrutural que satisfaça bem sua função e também apresente o menor peso de material possível torna-se um grande desafio. Várias combinações de diferentes componentes podem servir como solução para um mesmo projeto, porém sempre se busca o arranjo que apresente a maior relação entre capacidade de carga e peso de material.

A experiência do engenheiro naval tem um peso grande no sucesso de um projeto estrutural otimizado. A utilização de modernas técnicas de cálculo e softwares ajuda o projetista naval durante o processo de análise e escolha. Segundo Lamb (2003), há basicamente duas formas de se realizar o projeto do arranjo estrutural de embarcações. Um destes métodos tem bases empíricas, fundamentado em observações e regras, e o segundo método é um processo com bases racionais utilizando técnicas da mecânica dos materiais, o que pode permitir uma análise mais detalhada e uma maior otimização das estruturas.

2.1.1 Projeto Baseado em Regras

A abordagem mais antiga pode ser chamada de “projeto baseado em regras” e consiste no dimensionamento das estruturas baseando-se nas regras das sociedades classificadoras (LAMB, 2003). Na verdade, este tipo de abordagem vem sendo utilizado muito antes do surgimento das regras das sociedades classificadoras, pois desde que o homem foi capaz de construir seus primeiros barcos, estes eram basicamente copiados de outros já existentes, em um processo bastante empírico que utilizava a experiência acumulada pelos construtores navais.

Atualmente, este método consiste na utilização de regras e fórmulas fornecidas pelas sociedades classificadoras para se definir valores aceitáveis para alguns parâmetros dimensionais, como por exemplo as espessuras mínimas de chapas, módulo de seção mínimo para perfis longitudinais ou transversais, máximo espaçamento entre elementos reforçadores, entre outros. A origem destas fórmulas vem da experiência observacional com embarcações anteriores, ou seja, o processo utilizado atualmente também pode ser chamado de empírico. A utilização destas fórmulas, apesar de ajudar na aproximação de um arranjo estrutural apropriado, pode limitar a identificação dos níveis de segurança presentes, não permitindo que o projetista naval se certifique de que o projeto esteja otimizado ao máximo em relação às tensões internas presentes na estrutura.

Existem estudos para se analisar estas fórmulas e descobrir quais tipos de critérios foram utilizados para suas elaborações. Por exemplo, Grabb e Schumacher (1960) analisaram as fórmulas definidas pela American Bureau of Shipping (ABS) para o dimensionamento da seção mestra de grandes navios petroleiros. Na época do estudo, os grandes navios petroleiros com cavernamento longitudinal ainda estavam em desenvolvimento, e através do estudo foram desmembradas as fórmulas, descobrindo-se os parâmetros utilizados para sua elaboração.

Atualmente, na Amazônia, embarcações com dimensões não muito grandes - se comparadas a grandes navios - conseguem satisfazer bem às necessidades da região. Estas embarcações, na maioria das vezes, possuem uma arqueação bruta menor do que a requerida para uma classificação, e desse modo são apenas certificadas, o que acarreta em exigências de projeto muito menores, principalmente no que diz respeito às estruturas.

Os estaleiros localizados na Região Amazônica muitas vezes concebem as embarcações de modo artesanal, do mesmo modo que era feito há alguns séculos. A escolha por determinada espessura de chapa, tipo de perfis e espaçamentos é feita sem a realização de cálculos de engenharia, apenas usando da experiência e observação do que está presente em outros barcos.

Uma abordagem mais técnica e racional poderia trazer benefícios para armadores, construtores, e para a própria tecnologia naval brasileira, tendo em vista o perfil exclusivo que a Região Amazônica oferece em relação ao restante do mundo.

2.1.2 Projeto Racional Otimizado

O “projeto racional otimizado” consiste na análise direta do problema através das cargas envolvidas, utilizando-se de teorias da mecânica dos materiais e de algumas simplificações (LAMB, 2003). Desta forma pode-se definir os elementos necessários para o arranjo estrutural da embarcação tendo uma melhor estimativa quanto aos esforços submetidos à cada elemento.

Uma das primeiras tentativas conhecidas de se estabelecer um cálculo mais racional, baseado em teorias, foi feita por Thomas Young em 1814 (AUGUSTO, 1996). Young calculou a flexão longitudinal do casco como se este fosse uma viga, sendo que o diagrama de cargas aplicadas sobre esta viga era obtido através da diferença entre o diagrama de pesos e o diagrama de flutuação. Depois, utilizando-se da teoria de flexão de vigas, foram calculadas as forças cortantes e momentos fletores longitudinais atuantes sobre a estrutura. Deste modo, surgiu o importante conceito de viga-navio.

Como as embarcações são estruturas que apresentam complexas relações entre seus elementos estruturais, torna-se útil e necessário decompor o problema em partes menores que possam ser analisados separadamente (RAWSON; TUPPER, 2001). Isso facilita os cálculos envolvidos e permite uma discriminação das cargas envolvidas em cada nível estrutural. Dentro do regime elástico, pode ser envolvida a hipótese da superposição dos efeitos (AUGUSTO, 1996), permitindo que

cálculos realizados para diferentes níveis estruturais possam ser somados para obter-se a resposta global desejada.

Um dos métodos mais utilizados na engenharia naval consiste em dividir a estrutura e as tensões em estrutura primária, secundária e terciária (RAWSON; TUPPER, 2001). Cada estrutura apresenta um nível hierárquico e tensões correspondentes, e também diferentes condições de contorno que limitam as deflexões. Ao fim, as tensões primária, secundária e terciária são então compostas para se descobrir a tensão total agindo sobre cada local da embarcação.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos elementos que constituem cada nível da estrutura de um navio, e os apoios para cada nível. A sequência do texto irá abordar cada nível da estrutura em particular, descrevendo sua composição e como interagem na estrutura da embarcação.

Tabela 1 – Resumo dos elementos que constituem cada nível estrutural.

Nível estrutural	Elementos	Apoios
Estrutura Primária	Viga-navio Chapeamentos do convés, costado e fundo, anteparas longitudinais, sicordas, travessas longitudinais	Extremidades livres
Estrutura Secundária	Painéis reforçados Painéis reforçados do convés, costado e fundo, anteparas reforçadas	Anteparas transversais, anteparas longitudinais, pés-de-carneiro
Estrutura Terciária	Unidades de chapeamento Chapas	Longitudinais, vaus, sicordas, hastilhas

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 ESTRUTURA PRIMÁRIA

Como proposto por Young, a análise estrutural de uma embarcação se inicia calculando-se a flexão longitudinal do seu casco. Visto que uma de suas dimensões é consideravelmente maior que as outras duas – comprimento em relação à boca e pontal - o navio pode ser simplificado como uma viga, chamada de viga-navio. Essa consideração é bastante válida para embarcações com razão comprimento sobre

boca L/B maior do que 8, porém em embarcações com razões menores pode ser utilizada como uma boa aproximação. Os elementos que são submetidos aos esforços da flexão longitudinal primária e que contribuem para a rigidez deste nível estrutural fazem parte da estrutura primária.

Ignorando-se os carregamentos dinâmicos provenientes de seu movimento e de sua interação com a água, pode se admitir que as forças externas agindo sobre uma embarcação provêm de duas fontes: força-peso e pressão da água (RAWSON; TUPPER, 2001). Desta forma, é possível se estabelecer uma situação de equilíbrio estático em que os carregamentos verticais agindo sobre a viga-navio são obtidos da diferença entre o diagrama de peso e o diagrama de flutuação. Uma relação fundamental observada para qualquer viga elástica, sobre todos os pontos desta viga, se dá pela Equação 1 (RAWSON; TUPPER, 2001):

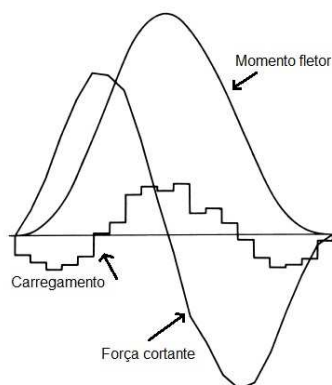
$$p' = \frac{dV}{dx} = \frac{d^2M_1}{dx^2} \quad (1)$$

Onde

- p' Carregamento por unidade de comprimento.
- V Força cortante na viga-navio.
- M_1 Momento fletor na viga-navio.
- x Posição ao longo da viga-navio.

Sendo assim, realiza-se a integração do carregamento ao longo do comprimento da embarcação e encontram-se as forças cortantes e os momentos fletores da estrutura primária (AUGUSTO, 1996). A Figura 3 apresenta típicos diagramas de carregamento, força cortante e momento fletor da viga-navio para embarcações com casco deslocante.

Figura 3 – Carregamento, força cortante e momento fletor da viga-navio.



Fonte: Adaptado de Rawson e Tupper (2001).

De acordo com a Teoria de Viga Simples, a tensão longitudinal primária em um determinado ponto da viga-navio pode ser observada na Equação 2:

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_{SM}} \quad (2)$$

Onde

σ_1 Tensão longitudinal primária de flexão.

M_1 Momento fletor no ponto da viga-navio.

W_{SM} Módulo de rigidez da seção mestra no ponto analisado.

O módulo de rigidez da seção é relacionado ao momento de inércia da seção, I , e à distância vertical entre o ponto analisado e a linha neutra da seção, y , através da Equação 3:

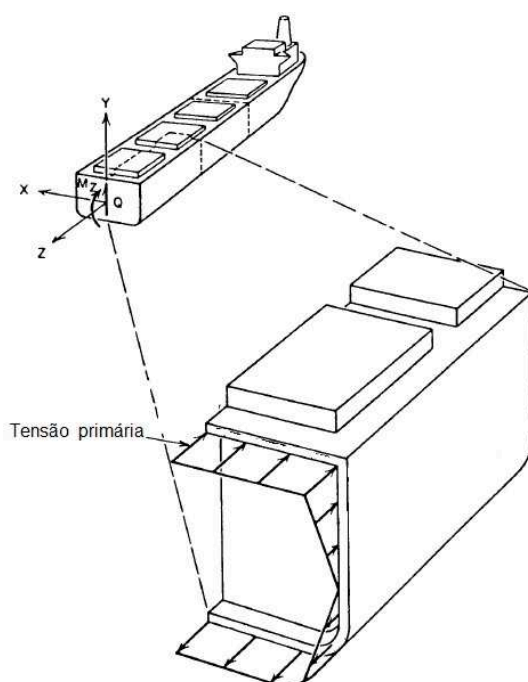
$$W_{SM} = \frac{I}{y} \quad (3)$$

Fazem parte da estrutura primária os elementos que sejam contínuos no sentido longitudinal na região de meia-nau, de forma a contribuir efetivamente para a rigidez da viga-navio. As sociedades classificadoras geralmente consideram o comprimento contínuo de 0,4 L na região da meia-nau como o mínimo necessário para que um elemento seja considerado como contínuo, sendo L o comprimento da embarcação (BUREAU COLOMBO, 2000). Nas embarcações amazônicas tipo *ferry-boat*, os elementos presentes na estrutura primária são os chapeamentos do convés

principal, do fundo, do bojo e do costado, sicordas, quilha, longitudinais, longarinas, antepara longitudinal e travessas.

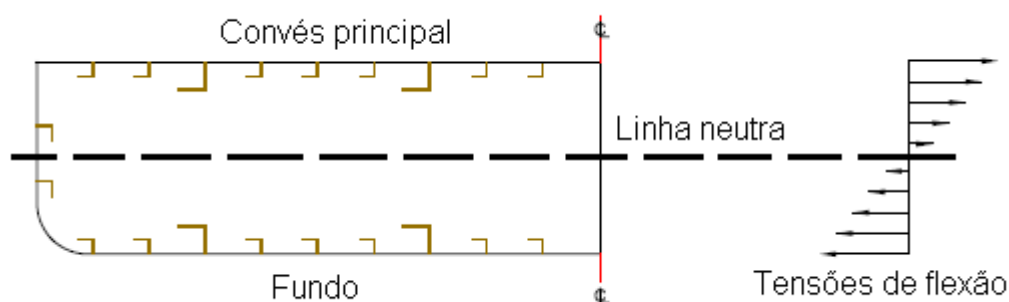
Como pôde ser visto nos diagramas típicos de carregamento da viga-navio, Figura 3, a seção mestra possui o maior valor de momento fletor, e é a porção mais exigida estruturalmente. O convés principal e o fundo do casco representam respectivamente os flanges superior e inferior da viga-navio, e sofrerão com os maiores esforços primários, já que estes são os pontos mais distantes da linha neutra da seção, como ilustrado nas Figuras 4 e 5. Na altura da linha neutra as tensões primárias de flexão serão iguais a zero. Os outros elementos e conveses acima do convés principal não são considerados no cálculo do momento de inércia da seção, e são tratados como superestruturas apoiadas na viga-navio (AUGUSTO, 1996).

Figura 4 – Distribuição das tensões primárias na viga-navio.



Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

Figura 5 – Localização da linha neutra e das tensões máximas na seção mestra.

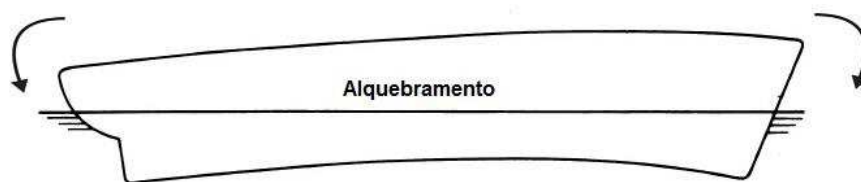


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 ALQUEBRAMENTO E TOSAMENTO

Como os cascos possuem formas mais cheias na seção à meia-nau do que em seus extremos, é normal que embarcações possuam uma maior flutuação na porção à meia-nau, e esta flutuação vai diminuindo conforme se avança em direção aos extremos do navio. Além disso, é comum na Região Amazônica que os barcos apresentem sua praça de máquinas localizada a 3/4 ou completamente a ré da embarcação, sendo que a praça de máquinas apresenta um elevado peso concentrado. Neste caso, na porção à meia-nau, haverá um excesso de empuxo da água em relação à força peso, enquanto que nos extremos do barco a força peso será maior do que a força de empuxo, o que resulta em um momento fletor na viga-navio que faz com que se haja uma tendência a se curvar, como mostrado na Figura 6 (RAWSON; TUPPER, 2001). Esta condição recebe o nome de alquebramento. A condição oposta, com excesso de peso na parte central da embarcação e excesso de flutuação nos extremos, é chamada de tosamento.

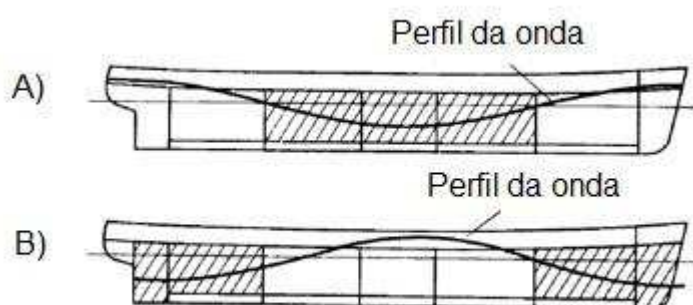
Figura 6 – Condição de alquebramento.



Fonte: Adaptado de Rawson e Tupper (2001).

As condições de alquebramento e tosamento podem ser muito aumentadas se o nível das águas for desigual ao longo da embarcação, por exemplo, na presença de ondas. O caso mais crítico seria a presença de ondas cujo seu comprimento coincide com o comprimento da embarcação (RAWSON; TUPPER, 2001), pois neste caso a embarcação estaria submetida às maiores diferenças no carregamento entre seus extremos e a porção a meia-nau. A Figura 7 ilustra as condições de tosamento e alquebramento na presença de ondas neste formato.

Figura 7 – A) Tosamento e B) Alquebramento.



Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

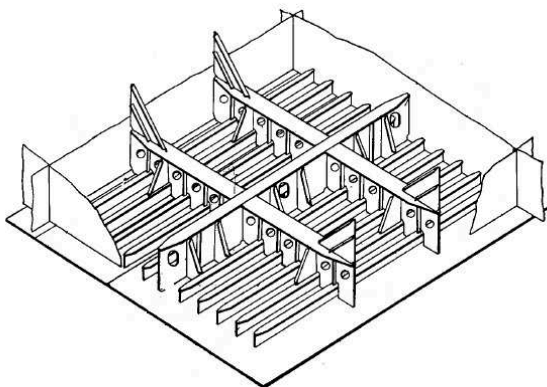
2.4 ESTRUTURA SECUNDÁRIA

A estrutura secundária de uma embarcação é constituída por painéis reforçados, que são perfis reforçadores acoplados a unidades de chapeamento. Estes painéis reforçados compreendem a maior parte da estrutura de um navio, e resistem à carga hidrostática da água – ou às cargas transportadas sobre o convés, no caso de um painel reforçado do convés. Os reforçadores longitudinais e

transversais deformam-se com a presença da carga hidrostática, e carregam consigo o chapeamento (AUGUSTO, 1996). Para se analisar esta estrutura, pode-se unir o reforçador e a porção da chapa que está acoplada a ele, formando uma só viga. Desta forma, a porção da chapa acoplada ao reforçador se comporta como se fosse um dos seus flanges. Esta porção de chapa acoplada é chamada de chapa colaborante. A largura de chapa que pode ser considerada como efetiva dependerá das condições de contorno e das dimensões do painel.

Ao considerar-se que as anteparas transversais possuem uma rigidez muito grande em relação aos elementos acoplados a elas, pode-se dizer que toda a estrutura contida entre duas anteparas consecutivas sofrerá tensões secundárias. Essa estrutura pode ser bem complexa, com diversos elementos presentes se relacionando entre si, dificultando a análise, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura secundária limitada por duas anteparas transversais.

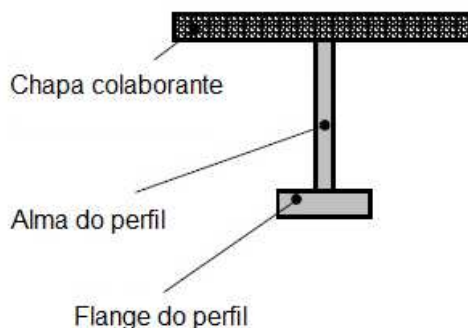


Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

Nos arranjos estruturais dos *ferry-boats*, geralmente há a presença de perfis leves e perfis pesados, ortogonais entre si. Desta forma, a fim de facilitar a análise, é conveniente dividir a estrutura secundária em dois níveis. O primeiro nível, chamado de estrutura secundária pesada, corresponde na análise dos perfis pesados, e a estrutura secundária leve é representada pelos perfis leves.

Cada perfil recebe uma porção de chapeamento, e ambos são analisados como se formassem uma só viga. Sendo assim, para o cálculo da tensão secundária σ_2 pode ser utilizada a Teoria Simples de Vigas. A Figura 9 ilustra a viga formada por um perfil e uma fatia de chapa acoplada.

Figura 9 – Viga composta por porção de chapa acoplada a um perfil.



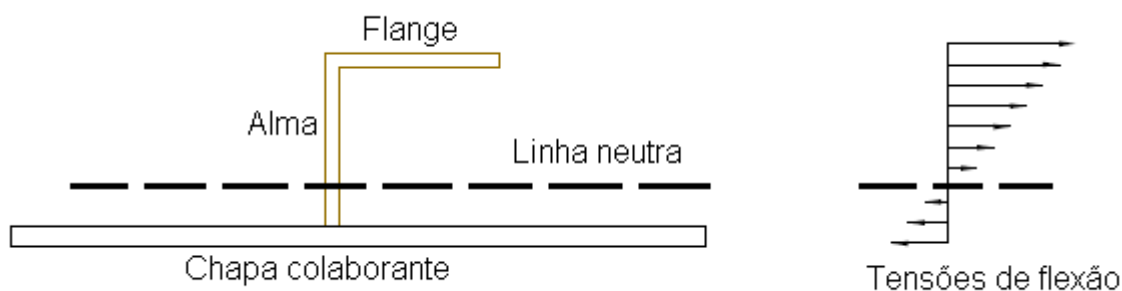
Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

No caso dos *ferry-boats* deste trabalho, anteparas e pés-de-carneiro foram considerados como os apoios da estrutura secundária pesada, sendo que “pé-de-carneiro” é como são chamados os pilares verticais dentro da engenharia naval. Já a estrutura secundária leve é limitada pelos próprios elementos secundários pesados. A direção de cada nível, transversal ou longitudinal, dependerá do arranjo de cada embarcação, mas a maioria dos casos analisados possui elementos pesados na direção transversal e leves na direção longitudinal.

2.5 EFEITO DE *SHEAR LAG* E CONCEITO DE CHAPA COLABORANTE

Quando a Teoria Simples de Vigas é utilizada, uma das hipóteses assumidas é a de que as seções planas permanecem planas e as tensões de flexão são diretamente proporcionais à distância do eixo neutro, como ilustrado nas Figuras 4, 5 e 10.

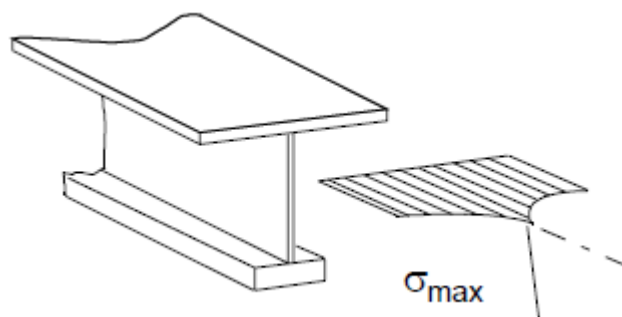
Figura 10 – Linha neutra e variação das tensões de flexão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na maioria dos problemas de flexão de vigas, as cargas são absorvidas pela alma da viga, e não pelos seus flanges (AUGUSTO, 1996). Quando as vigas são submetidas às cargas laterais externas, estas irão deformar e apresentar uma curvatura. Os flanges irão sofrer as maiores deformações, e, conseqüentemente, as maiores tensões. Porém, estas tensões se originam na alma, e são transmitidas aos flanges por cisalhamento. As tensões de cisalhamento distorcem o flange, fazendo com que a região do flange mais afastada da alma sofra menor deformação que a região mais próxima, de modo que as tensões nas duas partes sejam diferentes. Este efeito, conhecido como *shear lag*, ocorre em qualquer viga com flanges largos (AUGUSTO, 1996), como é o caso das vigas analisadas na estrutura secundária, em que um de seus flanges é formado por uma porção de chapeamento. A Figura 11 apresenta a distribuição real da tensão de flexão em uma viga com flanges largos.

Figura 11 – Efeito de *shear lag* e distribuição das tensões.

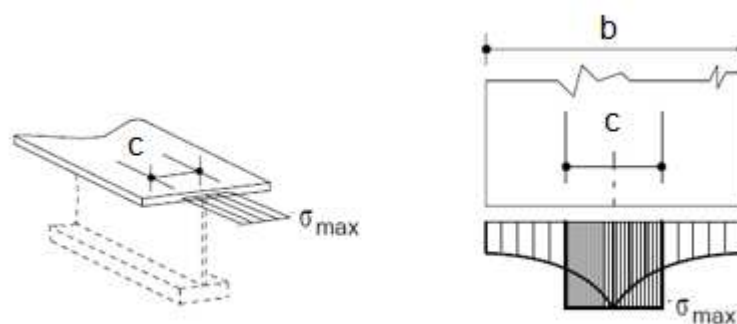


Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

Se o efeito de *shear lag* não for levado em conta, ao utilizar-se a Teoria Simples de Vigas serão encontradas tensões menores do que as que estão

presentes na estrutura. Por isso, ao se realizar a análise das tensões máximas na estrutura secundária, utiliza-se o conceito de chapa colaborante (AUGUSTO, 1996). A chapa colaborante possui uma largura menor do que a da chapa original, mas quando utilizada junto com a Teoria Simples de Vigas, resultará numa tensão máxima de flexão igual à tensão original que seria encontrada sem as simplificações. A Figura 12 ilustra esta correspondência entre as larguras das chapas original e colaborante e as respectivas tensões, onde b é a espessura original da chapa acoplada à viga, e c é a espessura da chapa colaborante efetiva para os cálculos.

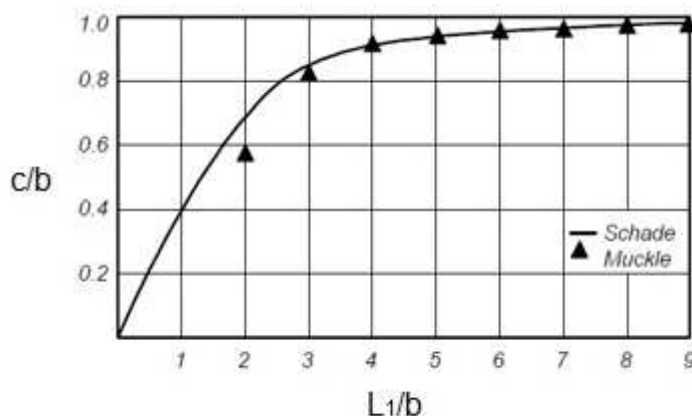
Figura 12 – Largura efetiva da chapa, ou chapa colaborante.



Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

As teorias de Schade, Taylor e Muckle são bastante utilizadas para o cálculo da largura da chapa colaborante (AUGUSTO, 1996). Para este trabalho, serão utilizados os gráficos com os resultados obtidos pelos autores citados, que podem ser vistos na Figura 13, em que a medida “ $0,578 * L$ ” corresponde à distância entre momentos fletores nulos da viga. Estes gráficos apresentam a largura efetiva da chapa acoplada ao reforçador para a análise da tensão secundária. A largura efetiva dependerá da relação entre o comprimento L_2 entre apoios da viga e a largura total b da chapa.

Figura 13 – Largura da chapa colaborante.



Fonte: Adaptado de Augusto (1996),
baseado nas obras de Schade e Muckle.

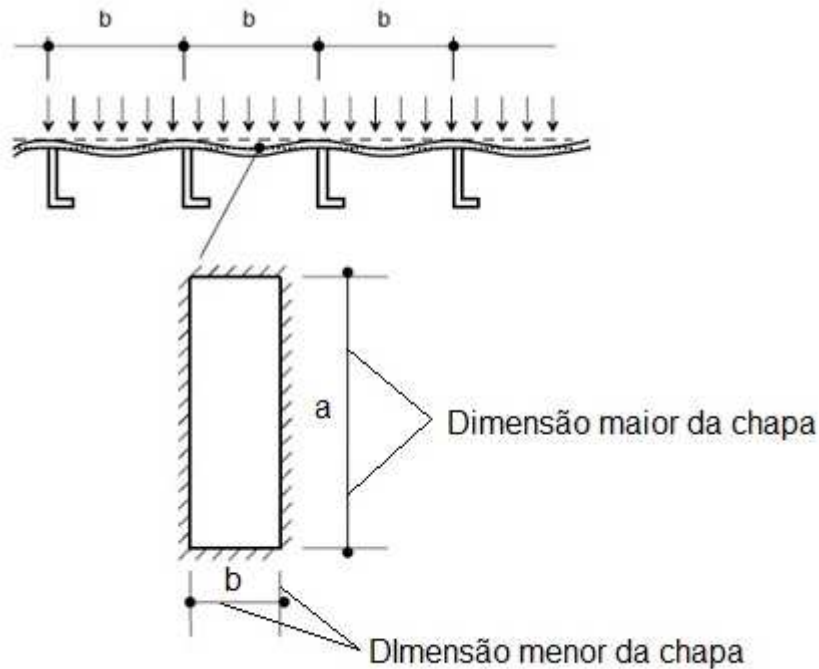
Onde

- c Largura da chapa colaborante.
- b Largura da chapa original.
- L_1 $0,578 * L$.
- L_2 Comprimento da viga entre apoios.

2.6 ESTRUTURA TERCIÁRIA

A estrutura terciária compreende a menor porção de chapeamento limitada por reforçadores nos dois sentidos. No fundo e costado, a chapa é submetida à pressão hidrostática da água, enquanto no convés principal a chapa é submetida ao peso de equipamentos, cargas ou passageiros. Essa pressão lateral será considerada uniforme em toda a chapa. Consideram-se os reforçadores longitudinais ou transversais como apoios indeslocáveis com rigidez superior à da chapa (AUGUSTO, 1996). A porção do chapeamento é modelada como uma placa retangular, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Estrutura terciária.



Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

Para a análise da tensão terciária, utiliza-se a Teoria das Placas em Pequenas Deflexões (AUGUSTO, 1996), seguindo a Equação 4:

$$\sigma_3 = k p \left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (4)$$

Onde:

σ_3 Tensão de flexão na chapa.

k Constante dependendo da razão entre os lados da chapa e das condições de contorno.

p Pressão normal sobre a chapa.

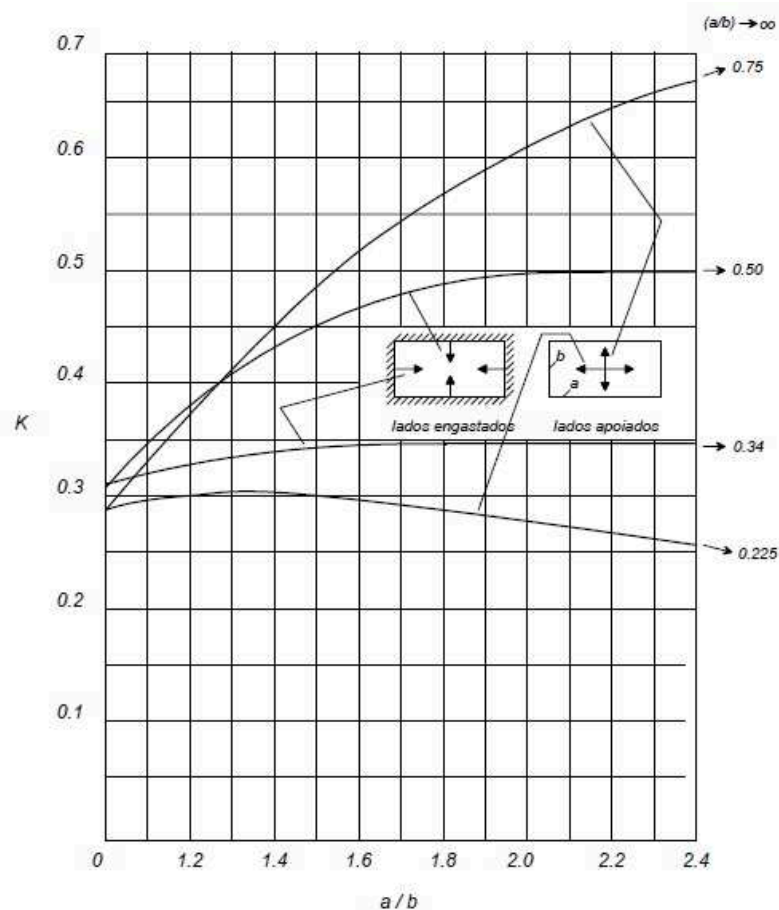
b Medida do menor lado da chapa.

t Espessura da chapa.

A constante k é determinada utilizando a Figura 15, em que cada curva representa os valores de k nos lados maiores e menores da chapa, para uma dada condição de contorno. Esta constante depende das condições de contorno e da relação entre os lados da placa. Para as condições de contorno, as placas

retangulares foram consideradas como tendo seus lados engastados, pelo fato de possuir carregamentos simétricos nos apoios, acarretando em uma rotação nula dos apoios, como foi apresentado na Figura 14.

Figura 15 – Constante k para o cálculo das tensões terciárias.



Fonte: Adaptado de Augusto (1996).

2.7 FLAMBAGEM DE PLACAS

Após o cálculo das tensões primárias, secundárias e terciárias, e realizar a composição destas tensões em cada ponto de interesse, é necessário comparar os resultados com tensões admissíveis, que pode ser a tensão de escoamento do aço σ_E , a fim de se descobrir os fatores de segurança presentes na estrutura. Além disso, é necessário avaliar a estabilidade dos elementos quanto à flambagem.

Existem diferentes modos de flambagem que atuam sobre chapas, painéis reforçados, vigas, pés-de-carneiro, que dependem do tipo de carregamento e das condições de contorno de cada elemento.

Neste trabalho será avaliada a instabilidade das unidades de chapeamento, modeladas como placas retangulares. Essa análise é importante pois a tensão crítica de flambagem geralmente é menor do que a tensão de escoamento do material.

A Tensão Crítica de Flambagem é calculada pela Equação 5. As propriedades utilizadas são as propriedades do

$$\sigma_{Cr} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5)$$

Onde:

- σ_{Cr} Tensão crítica de flambagem da chapa.
- E Módulo de elasticidade do aço = $2,0 \times 10^5$ MPa.
- t Espessura da chapa.
- b Medida do menor lado da chapa.
- ν Coeficiente de Poisson do aço = 0,3.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado em parceria com a empresa Netuno Engenharia Naval Ltda. localizada em Manaus-AM, durante período de estágio curricular obrigatório, entre janeiro e junho de 2016.

Este trabalho apresenta inicialmente um estudo sobre as embarcações com cascos conhecidos como *ferry-boats* utilizados na Região Amazônica. Neste sentido, uma contextualização geral das embarcações da região foi feita, seguido de um aprofundamento maior nos *ferry-boats*, incluindo suas características e as vantagens em sua utilização, justificando o interesse por este tipo de estrutura.

A partir deste estudo inicial, foi realizada uma análise estrutural das embarcações *ferry-boat*. A análise estrutural foi feita a partir de projetos desenvolvidos pela Netuno Engenharia Naval Ltda, onde foram selecionadas sete embarcações para o trabalho. Foram selecionadas as embarcações que possuíam todas as informações de projeto necessárias para permitir a realização dos cálculos. Esta análise foi realizada dividindo a estrutura em primária, secundária e terciária, técnica que é muito utilizada na Engenharia Naval.

Para o cálculo da estrutura primária, chamada de viga-navio, foi utilizada a Teoria Simples de Vigas, descobrindo-se as tensões primárias σ_1 no sentido longitudinal da embarcação. A viga-navio foi considerada como uma viga livre-livre apoiada sobre as águas. Os diagramas de força cortante e momento fletor atuantes sobre a viga-navio foram elaborados utilizando o software *DELFTShip*, distribuindo o peso da embarcação de forma uniforme ao longo do seu comprimento. No Apêndice A é apresentado o procedimento de cálculo completo feito para a Embarcação A. O procedimento é o mesmo para as outras embarcações analisadas. No Anexo A é apresentada a vista da seção-mestra da Embarcação A.

Na estrutura secundária, foram analisados painéis reforçados constituídos por uma viga e uma porção do chapeamento externo acoplada. Para os cálculos, esta porção de chapa colaborante foi considerada como um dos flanges de uma viga, e a Teoria Simples de Vigas foi utilizada para calcular-se as tensões secundárias σ_2 . Foram calculadas as tensões secundárias longitudinais σ_{2x} e transversais σ_{2y} .

Para a análise da estrutura terciária σ_3 , foi usada a Teoria das Placas em Pequenas Deflexões, considerando a pressão lateral da água - ou peso das cargas, no caso do convés - como carregamento uniforme atuando sobre cada placa.

Para a realização dos cálculos, foram utilizadas planilhas de cálculos através do software *Microsoft Excel*. Todos os dados necessários para os cálculos, como espessuras de chapas, perfis, cargas, dimensões e outros foram recolhidos de projetos da Netuno Engenharia Naval Ltda.

Por fim, foram analisados os fatores de segurança da estrutura longitudinal, da estrutura transversal, e também a estabilidade à flambagem das chapas. Os resultados foram comparados a critérios estabelecidos e então discutidos.

4. EMBARCAÇÕES AMAZÔNICAS

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS EMBARCAÇÕES AMAZÔNICAS

Na Região Amazônica pode ser encontrada uma variedade muito grande de tipos de embarcações e estruturas flutuantes. Os tipos mais comuns são as embarcações mistas para passageiros e carga-geral, geralmente chamadas de navio-motor – ou barco-motor quando são construídas de madeira – bem como rebocadores, empurradores, lanchas de alumínio, balsas, barcos de pesca, além de outras estruturas não propulsadas como casas, hotéis, diques flutuantes e píeres de atracação. Na Figura 16 é possível ver um pouco da diversidade de embarcações presente naquela região.

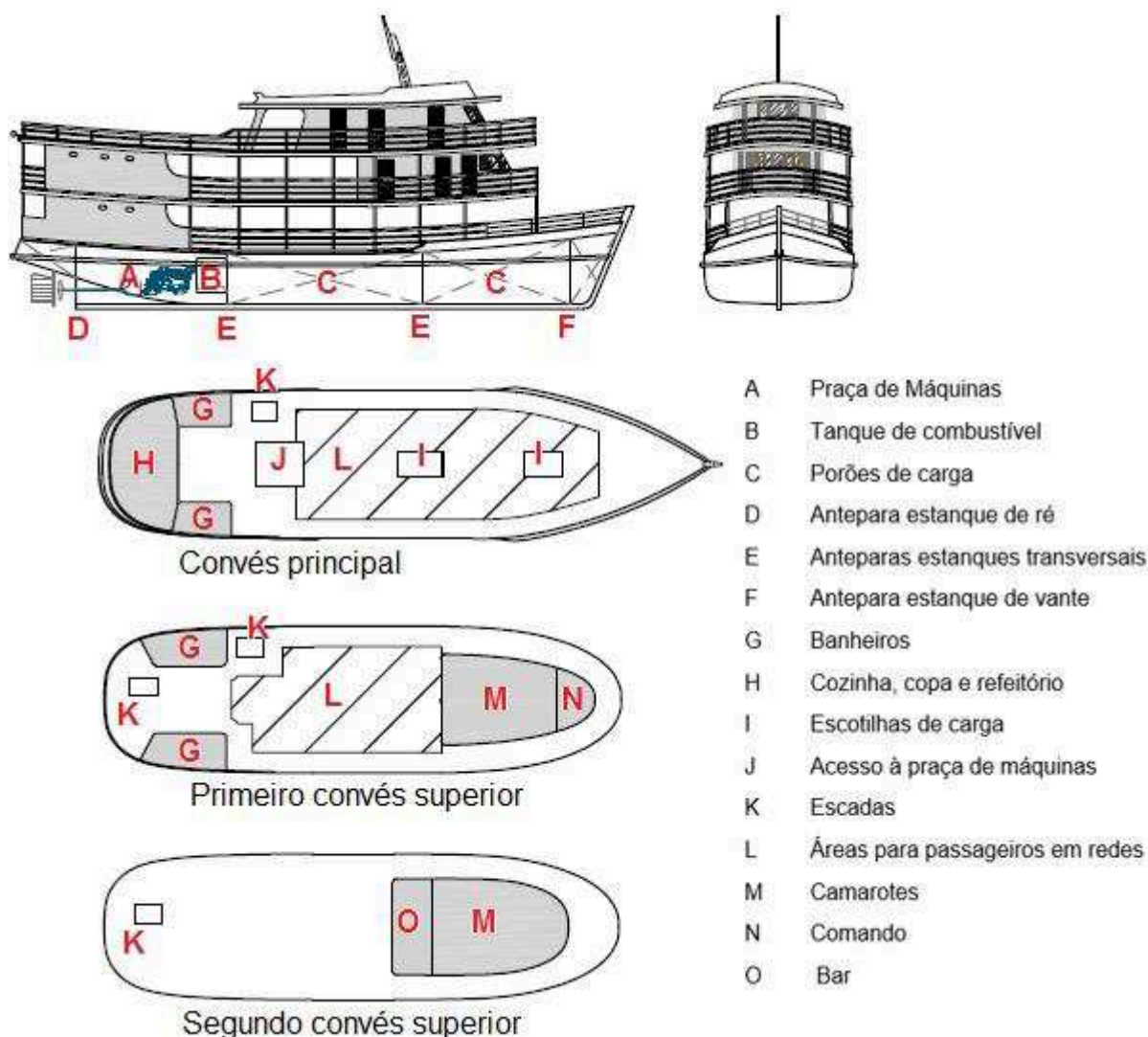
Figura 16 – Vista da região portuária de Manaus-AM.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando se pensa em barcos da Amazônia, logo se associa àquelas embarcações com vários conveses, para o transporte de passageiros em redes e carga geral, presentes em grande número na região. Os navios-motor são as embarcações mais vistas e possuem, de forma geral, arranjos similares entre si, com pequenas variações para satisfazer às necessidades de cada armador. A Figura 17 mostra um arranjo geral típico de uma dessas embarcações encontradas na Região Amazônica.

Figura 17 – Arranjo Geral típico utilizado na Região Amazônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É comum a utilização de embarcações que transportem carga e passageiros ao mesmo tempo. O convés principal pode ser destinado tanto para cargas quanto para passageiros, dependendo da necessidade em cada trajeto. Geralmente é utilizado para o transporte de cargas, porém em viagens com maior demanda de passageiros, como na véspera de feriados e datas festivas, pode se optar pela utilização do convés para alocação de passageiros. A opção de levar passageiros ou cargas no convés deve estar especificada no projeto e nos documentos da embarcação, e estudos de estabilidade devem ser feitos separadamente para cada um dos casos, já que as Normas da Autoridade Marítima (NORMAM) proíbem que cargas e passageiros sejam transportados no mesmo convés ao mesmo tempo sem alguma separação física entre ambos (MARINHA DO BRASIL, 2005).

Nos conveses superiores – comumente dois ou três – passageiros em redes são alocados no grande vão central. Na porção mais a vante geralmente existem camarotes ou suítes para transportar passageiros em camas ou beliches. A ré são localizados banheiros, cozinha e também refeitórios, dependendo da necessidade de cada barco. A sala de comando também se localiza em um dos conveses superiores. O número mínimo de banheiros, número máximo de passageiros por camarote, e número máximo de passageiros em redes por área são definidos pela NORMAM.

As dimensões das embarcações muitas vezes são definidas pelo desejo do armador em não construir barcos de grande porte, evitando uma regulamentação mais exigente, com mais burocracia e custos. A maioria dos armadores prefere trabalhar com embarcações certificadas, e não classificadas. Isto depende da arqueação bruta (AB) da embarcação, que basicamente é um cálculo do volume dos espaços internos presentes. Embarcações com arqueação bruta menor que 500 não exigem classificação por sociedades classificadoras, mas sim uma certificação realizada por uma entidade certificadora ou pela capitania dos portos. Há uma diferença grande nas exigências nos dois casos, sendo que uma embarcação classificada necessita muito mais documentos e muitas regras devem ser seguidas. Já as embarcações certificadas requerem documentação mais simples especialmente no quesito estrutural e de materiais.

Quando se iniciou a utilização do aço para a construção de embarcações, os métodos de construção e formas de cascos tradicionalmente utilizados em barcos de madeira foram praticamente mantidos, apenas substituídos pelo novo material. Isto inclui as formas dos cascos e a opção por um cavernamento transversal. Com o passar dos anos, as embarcações foram evoluindo e aumentando de tamanho. Nos dias atuais é mais comum a utilização de cascos com formas mais simples, chamados de *ferry-boats*.

4.2 CASCOS DO TIPO *FERRY-BOAT*

As embarcações conhecidas como *ferry-boat* na Região Amazônica caracterizam-se por apresentar cascos com formas mais quadradas e simples,

lembrando as formas de casco de balsas. A utilização deste tipo de casco facilita a construção, já que possui um maior número de chapas planas, tornando o processo construtivo mais fácil e rápido. Além disso, a área do convés é maior, acarretando em um maior espaço útil na embarcação, que pode ser utilizado para alocação de casarias, passageiros e cargas. Algumas vezes, uma balsa antiga é adquirida em leilão, reaproveitada e transformada em um casco para uma embarcação nova.

Uma tendência atual é construir a proa com formas mais arredondadas, o que traz vantagens no ponto de vista da hidrodinâmica, diminuindo a resistência ao avanço e os gastos com combustível. A Figura 18 mostra um *ferry-boat* com proa arredondada, porém percebe-se que a área do convés se mantém aproximadamente retangular, com bastante espaço útil.

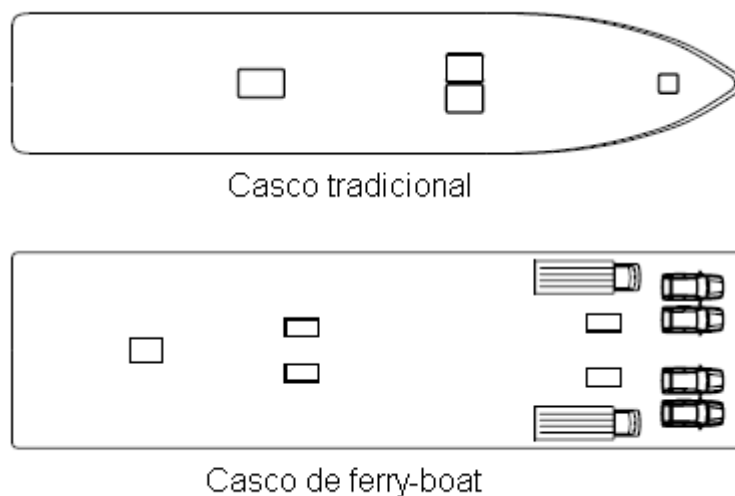
Figura 18 – Convés retangular e formas arredondadas de casco.



Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

A maioria das pequenas cidades e vilarejos na Amazônia possui acesso apenas pela água, através de embarcações, de forma que todo tipo de cargas é transportado ao mesmo tempo. Por isso, os armadores desejam barcos multiuso, que possuam uma flexibilidade para transportar diferentes tipos de equipamentos e cargas. Sendo assim, algumas embarcações podem apresentar espaço para o transporte de automóveis no convés, possuindo rampas de acesso para embarque e desembarque, geralmente localizadas na proa. Para este propósito, um casco do tipo *ferry-boat* torna-se vantajoso, por disponibilizar de uma área de carga na região da proa que muitas vezes não é acessível em um casco mais tradicional. A Figura 19 compara os dois tipos de cascos e evidencia esta vantagem dos *ferry-boats*.

Figura 19 – Diferença entre o espaço no convés para os dois tipos de cascos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pela presença de mais de um convés superior, muitas embarcações apresentam estabilidade transversal inicial limitada por possuir uma grande área vélica lateral – área lateral da embarcação que pode sofrer com a ação de ventos - e braço de emborcamento devido aos passageiros nos convés superiores. Desta forma, algumas vezes o número máximo de passageiros acaba sendo limitado pelos critérios de estabilidade, e não pela área disponível na embarcação, diminuindo a rentabilidade da embarcação. Nesse sentido, os cascos *ferry-boat*, por possuírem uma boca mais larga e formas mais quadradas, possuem uma melhor estabilidade transversal inicial se comparados aos cascos mais tradicionais, e tornam-se mais vantajosos, podendo garantir aos armadores o transporte de uma maior quantidade de passageiros.

Por outro lado, a boca mais larga presente nos *ferry-boats* acaba sendo menos favorável quanto à resistência ao avanço. Isso acarreta em uma menor velocidade da embarcação e maior consumo de combustível. As vantagens e desvantagens são levadas em conta pelos armadores no momento de construir uma embarcação, e o melhor tipo de casco é escolhido a fim de atender as demandas com a maior eficiência possível.

5. RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL

5.1 EMBARCAÇÕES ANALISADAS

Para o estudo foram analisadas sete embarcações com casco do tipo *ferry-boat*. Todos os barcos possuem arqueação bruta (AB) menor que 500 e não passaram por um processo de classificação. Foram utilizadas letras de A a G para nomear cada embarcação. As dimensões principais de cada barco podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões principais das embarcações analisadas.

Embarcação	L [m]	B [m]	P [m]	H [m]	Δ leve [t]	Δ carregado [t]	AB
A	42,30	10,00	2,20	1,93	114,56	680,86	456
B	20,05	6,00	1,40	1,18	32,91	97,29	87
C	30,62	8,00	1,40	0,97	81,34	174,94	198
D	24,12	5,50	1,35	1,02	10,43	103,44	80
E	35,00	9,00	2,50	1,84	149,87	360,95	376
F	40,30	10,00	1,70	1,35	139,91	442,95	292
G	39,80	10,00	2,40	2,09	201,44	483,15	497

Fonte: Elaborada pelo autor, dados obtidos no acervo da Netuno Engenharia Naval.

Onde:

- L Comprimento total.
- B Boca moldada.
- P Pontal moldado.
- H Calado carregado.
- Δ Deslocamento.
- AB Arqueação bruta.

Além das dimensões principais, uma análise mais completa das embarcações pode ser feita utilizando-se parâmetros adimensionais relacionando as

dimensões principais entre si. A Tabela 3 apresenta duas relações importantes na arquitetura naval: relação entre comprimento e boca L/B, e relação entre boca e pontal B/P.

Tabela 3 – Relações adimensionais entre as dimensões principais.

Embarcação	L / B	B / P
A	4,2	4,5
B	3,3	4,3
C	3,8	5,7
D	4,4	4,1
E	3,9	3,6
F	4,0	5,9
G	4,0	4,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Lamb (2003), os valores típicos para a relação entre comprimento total e boca L/B são de:

$$L/B = 4,0 \quad \text{Para } L \leq 30 \text{ m.} \quad (6)$$

$$L/B = 4,0 + 0.025 (L - 30) \quad \text{Para } 30 \leq L \leq 130 \text{ m.} \quad (7)$$

$$L/B = 6,5 \quad \text{Para } 130 \text{ m} \leq L. \quad (8)$$

Nas embarcações analisadas, o valor médio encontrado para a relação L/B foi de 4,0, sendo 3,3 e 4,4 os menores e maiores valores encontrados, respectivamente. Estes valores podem ser considerados como típicos, de acordo com o que foi apresentado por Lamb (2003).

A relação entre boca e pontal B/P é importante pois interfere diretamente na estabilidade transversal inicial da embarcação. Como mostrado anteriormente, várias embarcações utilizadas na Região Amazônica apresentam mais de um convés superior, podendo acarretar em problemas de estabilidade. A média encontrada para o valor de B/P nas embarcações analisadas foi de 4,6, sendo 3,6 e 5,7 os menores e maiores valores encontrados respectivamente.

Em grandes navios, esta relação geralmente apresenta valores entre 1,6 e 2,0 (LAMB, 2003). Quanto maior a relação B/P, melhor será a estabilidade transversal inicial. Desta forma, os valores apresentados para as embarcações

analisadas podem ser considerados bastante adequados de forma a garantir uma boa estabilidade transversal inicial, sendo esta uma das vantagens da utilização deste tipo de casco.

A embarcação A possui chapeamento do casco com espessura de 5/16 polegadas (7,94 mm). Excetuando-se esta embarcação, todos os outros cascos analisados possuem chapeamento com espessura de 1/4 polegadas (6,35 mm), valor muito utilizado para embarcações na Região Amazônica. Algumas vezes naquela região os construtores navais optam por um chapeamento com maior espessura, com o objetivo de aumentar a segurança da embarcação, mas são esquecidos outros fatores como custo e peso leve. Essa escolha se dá apenas pela experiência do construtor ou exigências dos armadores.

A Embarcação A utiliza o convés principal para o transporte de carga geral. Possui dois conveses superiores, sendo que o primeiro é utilizado para o transporte de passageiros em redes, e o segundo convés superior possui camarotes para passageiros. A Figura 20 apresenta a estrutura interna do casco da Embarcação A.

Figura 20 – Interior do casco da embarcação A.



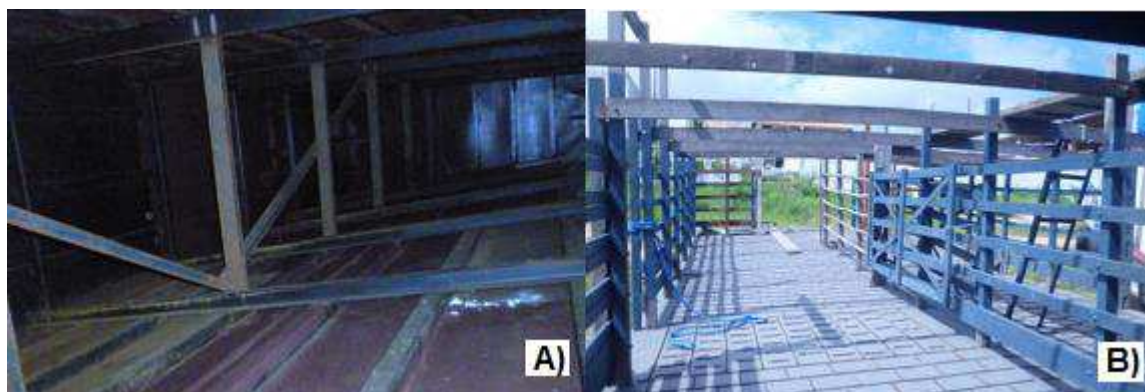
Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

A Embarcação B é destinada ao transporte de animais vivos, como bovinos, feito sobre o convés principal. É uma embarcação exclusiva para o transporte de cargas, e não transporta passageiros. Apresenta dois conveses superiores, localizados a ré, aonde estão os camarotes dos tripulantes, sala de comando e outras casarias. A Figura 21 apresenta a estrutura interna do casco da Embarcação B (Figura 21-A) e também o convés principal, preparado para o transporte dos

animais (Figura 21-B). Este tipo de embarcação é conhecido na região como “boieiro”.

Figura 21 – Embarcação B

A) Interior do casco e B) Vista do convés principal.

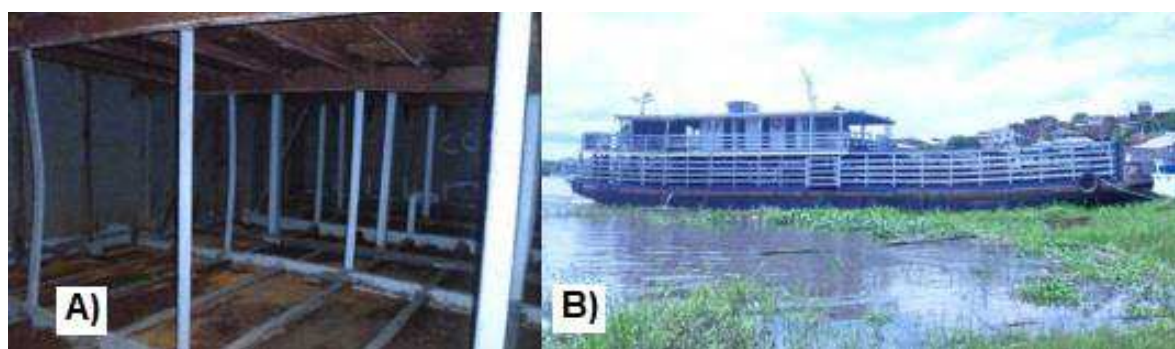


Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

As embarcações C e D também são do tipo boieiro, com a presença de um convés superior, e não transportam passageiros. A Figura 22 apresenta a estrutura interna do casco da Embarcação C (Figura 22-A) e a sua vista externa (Figura 22-B).

Figura 22 – Embarcação C

A) Interior do casco e B) Vista externa.



Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

A Embarcação E possui dois conveses, principal e superior, e transporta passageiros em redes em ambos. Além disso, na área sobre o convés principal localizada a vante das casarias, possui espaço para o transporte de automóveis, que é uma das vantagens dos *ferry-boats* em relação aos cascos mais arredondados. A Figura 23 apresenta a vista externa da embarcação E durante sua construção.

Figura 23 – Vista externa da embarcação E.



Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

A Embarcação F é utilizada para o transporte de carga no convés principal e nos porões. No convés principal também há rampas para embarque de automóveis. Apresenta dois conveses superiores, localizados a ré, onde estão os camarotes dos tripulantes, sala de comando e outras casarias. A Figura 24 mostra o interior do casco da Embarcação F.

Figura 24 – Interior do casco da embarcação F.



Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

A Embarcação G transporta passageiros em redes em dois conveses superiores, e o convés principal também pode receber passageiros em redes ou cargas. Possui também uma área de bar no terceiro convés superior. Na área a vante do convés principal, possui espaço para o transporte de automóveis. A Figura 25 mostra um detalhe da proa da Embarcação G.

Figura 25 – Vista externa da embarcação G.



Fonte: Acervo da Netuno Engenharia Naval.

Geralmente os porões da embarcação são utilizados para o transporte de cargas. Apesar disso, neste trabalho os cálculos foram sempre realizados considerando os porões vazios. Isso foi feito para que a pior condição fosse analisada, já que a presença de carga interna nos porões anularia parte da carga externa advinda da pressão da água sobre o casco, diminuindo a tensão resultante. No convés, os cálculos foram feitos utilizando a carga no convés especificada em projeto. Esta carga foi distribuída de forma uniforme em toda a região de carga do convés, conforme procedimento estipulado pela NORMAM (MARINHA DO BRASIL, 2005). Esta consideração de uma carga com densidade uniforme distribuída por toda a área de carga pode ser uma boa aproximação sob o ponto de vista de cálculos de estabilidade, porém ignora a presença de alguma carga com densidade muito elevada. Na Região Amazônica as embarcações transportam praticamente todos os tipos de cargas, e alguns equipamentos muito pesados possuem densidade que ultrapassa o valor utilizado nos cálculos. Idealmente este tipo de carga é alojado nos porões para tornar o centro de gravidade da embarcação mais baixo, porém para diminuir o tempo de permanência nos portos as vezes a carga é transportada sobre o convés.

A Tabela 4 apresenta as cargas de projeto utilizadas na análise do convés de cada embarcação.

Tabela 4 – Carga no convés utilizada nos cálculos.

Embarcação	Carga no convés [kg/m ²]	Carga no convés [MPa]
A	371	0,0036
B	320	0,0031
C	700	0,0069
D	820	0,0080
E	280	0,0027
F	470	0,0046
G	345	0,0034

Fonte: Elaborada pelo autor.

A carga atuando no fundo das embarcações foi considerada como a pressão da água, e depende da profundidade em que aquela região se encontra, ou seja, do calado da embarcação. A Tabela 5 apresenta os valores das cargas consideradas para o fundo das embarcações.

Tabela 5 – Carga no fundo utilizada nos cálculos.

Embarcação	Carga no fundo [MPa]
A	0,0151
B	0,0117
C	0,0095
D	0,0103
E	0,0181
F	0,0193
G	0,0205

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a análise do costado, foi utilizado o mesmo procedimento, ou seja, a carga externa desta região também é a pressão da água. Foram analisadas as regiões do costado com maior profundidade, representadas pela porção de painéis

reforçados presentes logo acima da região do bojo. Esta região geralmente não possui a maior distância em relação à linha neutra da embarcação, porém possui a maior carga externa, pelo fato de que a pressão varia linearmente com a profundidade.

5.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA LONGITUDINAL

Para a análise da estrutura longitudinal, a tensão longitudinal resultante da composição entre as tensões longitudinais primária, secundária e terciária foi comparada com a tensão de escoamento do aço σ_E , a fim de se descobrir o fator de segurança FS_x da estrutura longitudinal, seguindo a Equação 9.

$$FS_x = \frac{\sigma_E}{\sigma_1 + \sigma_{2x} + \sigma_3} \quad (9)$$

Onde:

- FS_x Fator de segurança da estrutura no sentido longitudinal.
- σ_1 Tensão primária longitudinal de flexão.
- σ_{2x} Tensão secundária longitudinal.
- σ_3 Tensão terciária longitudinal.
- σ_E Tensão de escoamento do aço.

A estrutura primária é constituída pela análise da viga-navio, incluindo nos cálculos os elementos longitudinais contínuos da embarcação.

A estrutura secundária longitudinal é constituída pelos perfis leves e sua chapa colaborante. Estes perfis são apoiados pelos perfis pesados transversais.

A estrutura terciária é constituída pelas chapas carregadas lateralmente. Estas chapas fazem parte dos três níveis estruturais, e são os pontos críticos analisados.

A Tabela 6 apresenta os valores encontrados para os fatores de segurança da estrutura longitudinal das embarcações analisando-se as chapas do costado.

Tabela 6 – Fatores de segurança FS_X da estrutura longitudinal.

Embarcação	Convés	Fundo	Costado
A	7,36	3,81	5,42
B	13,20	5,67	7,99
C	5,57	4,40	6,68
D	5,94	4,80	8,19
E	8,84	2,58	3,56
F	5,90	2,42	3,10
G	5,36	2,06	2,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Freitas (1977), o fator de segurança recomendável para as tensões longitudinais é de 1,5. Analisando-se os resultados da Tabela 6, nota-se que o fator de segurança é superior ao recomendado nas três regiões analisadas, porém no convés este valor apresenta as maiores variações, sendo 5,36 o menor valor encontrado, podendo significar que os perfis presentes no convés principal estejam superdimensionados. A Embarcação B possuiu, de forma geral, os maiores fatores de segurança. As embarcações E, F e G apresentaram fatores de segurança para o fundo e costado não muito distantes do sugerido por Freitas (1977), o que significa que as estruturas são mais adequadas.

5.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA TRANSVERSAL

As embarcações analisadas apresentaram cavernamento longitudinal, ou seja, possuem um maior número de perfis longitudinais com menor espaçamento entre si, e estes são sustentados por perfis transversais maiores e com maior espaçamento entre si. Desta forma, os perfis transversais acoplados à sua chapa colaborante, foram considerados como estrutura secundária pesada, e sobre eles age a tensão de flexão σ_{2y} .

Para a análise, a tensão secundária nos perfis pesados transversais, ou seja, a tensão agindo no sentido transversal σ_{2y} foi comparada com a tensão de escoamento do aço σ_E , através da Equação 10:

$$FS_{2y} = \frac{\sigma_E}{\sigma_{2y}} \quad (10)$$

Onde:

FS_{2y} Fator de segurança ao escoamento na tensão secundária transversal.

σ_{2y} Tensão secundária transversal.

σ_E Tensão de escoamento do aço.

Os perfis transversais são apoiados pelos pés-de-carneiro, anteparas longitudinais, ou pela estrutura do costado, dependendo do arranjo de cada embarcação. A porção com maior comprimento entre apoios foi escolhida, por ser a região mais crítica para análise. A Tabela 7 apresenta os valores encontrados para os fatores de segurança nos perfis transversais nas embarcações analisadas.

Tabela 7 – Fatores de segurança FS_{2y} da estrutura secundária transversal.

Embarcação	Convés	Fundo	Costado
A	24,69	5,94	9,84
B	12,49	1,89	2,53
C	21,60	15,64	19,02
D	22,53	17,68	13,79
E	29,96	4,55	5,43
F	28,14	6,71	8,46
G	18,27	3,01	6,30

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na estrutura secundária, considerando-se a presença da chapa colaborante, a linha neutra de cada perfil com sua chapa situa-se mais próximo da chapa do que da aba dos perfis, como foi mostrado na Figura 10. Levando-se em conta que as tensões de flexão variam linearmente com a distância entre o ponto analisado e a linha neutra, a estrutura secundária apresenta maiores tensões na aba interna, mais

afastada do chapeamento. Desta forma, os valores apresentados na Tabela 7 são os valores encontrados para a aba dos perfis transversais, que são os pontos mais críticos da análise.

Segundo Freitas (1977), o fator de segurança recomendável para as tensões secundárias no sentido transversal é de 1,25. Analisando-se os valores encontrados na Tabela 7, é possível constatar que os *ferry-boats* da Região Amazônica estão apresentando fatores de segurança consideravelmente maiores que o valor recomendado.

Para o fundo, é importante lembrar que os cálculos foram feitos para a condição de calado carregado porém com porões vazios, o que caracteriza a condição de maiores esforços na região. Com a presença de cargas sobre o fundo da embarcação, esta agiria verticalmente para baixo, anulando parcialmente a pressão hidrostática da água, e diminuindo o carregamento sobre a estrutura.

Na análise do fundo e costado, as embarcações C e D foram as que apresentaram os maiores fatores de segurança. Para a estrutura do fundo, a embarcação C apresenta fator de segurança 15,64, e a embarcação D possui um fator 17,68. Para o costado, os valores são de 19,02 e 13,79. Isso significa que os perfis transversais destas embarcações estão superdimensionados, e perfis com menores dimensões poderiam ser utilizados.

5.4 ANÁLISE DA ESTABILIDADE À FLAMBAGEM

Além da análise do fator de segurança da estrutura em relação à tensão de escoamento σ_E , também foi feita a análise da estabilidade contra a flambagem. Neste sentido, foi analisada a resistência à flambagem das chapas, seguindo a Equação 11:

$$FS_{FL} = \frac{\sigma_{Cr}}{\sigma_1 + \sigma_{2x} + \sigma_3} \quad (11)$$

Onde:

FS_{FL} Fator de segurança à flambagem das chapas.

σ_1 Tensão primária longitudinal.

- σ_{2x} Tensão secundária longitudinal.
 σ_3 Tensão terciária longitudinal.
 σ_{Cr} Tensão crítica de flambagem da chapa

A Tabela 8 apresenta os valores encontrados para o fator de segurança à flambagem das chapas.

Tabela 8 – Fatores de segurança em relação à flambagem.

Embarcação	Convés	Fundo	Costado
A	5,96	3,09	4,40
B	9,11	3,91	5,52
C	2,85	2,25	3,41
D	1,79	1,45	2,48
E	4,51	1,32	1,82
F	3,01	1,24	1,58
G	2,74	1,05	1,36

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Freitas (1977), o fator de segurança recomendável contra a flambagem de chapas é de 1,25. Analisando-se os valores encontrados na Tabela 8, é possível constatar que os *ferry-boats* da Região Amazônica apresentam em sua maioria valores adequados de segurança à flambagem.

A Embarcação G apresentou um fator de segurança de 1,05 nas chapas do fundo e 1,36 no costado. Esta embarcação possui o maior calado entre as embarcações analisadas, acarretando na maior pressão hidrostática da água. Para melhorar este fator de segurança, uma chapa com espessura mais grossa poderia ser utilizada no fundo, ou um espaçamento menor entre os perfis reforçadores.

É importante notar que os valores encontrados para os fatores de segurança à flambagem das chapas foram menores do que os valores dos fatores de segurança em relação à tensão de escoamento. Isso se deve ao fato de que geralmente a tensão crítica de flambagem é menor do que a tensão de escoamento.

6. CONCLUSÃO

Após a análise dos fatores de segurança obtidos nos cálculos, pode-se concluir que as embarcações apresentarem fatores de segurança elevados se comparados aos critérios estabelecidos, principalmente na região do convés principal. Isso mostra que o arranjo e dimensões dos perfis atualmente utilizados poderia ser otimizado, economizando material, e ao mesmo tempo mantendo a segurança das embarcações.

Este trabalho foi realizado analisando embarcações que foram construídas utilizando-se apenas da experiência dos construtores, que fazem a escolha pelo arranjo estrutural sem a realização de cálculos ou do auxílio de um engenheiro naval. Em uma região tão vasta e de grande importância econômica para o país, projetos adequados para as embarcações poderiam representar uma diminuição nos custos de fretes e dos produtos, melhorando a competitividade daquela região. A importância do trabalho do engenheiro naval ainda precisa ser disseminada, e a análise de embarcações já construídas podem ajudar a mostrar para construtores e armadores a importância do engenheiro naval e da sua função no mercado, podendo fornecer projetos mais otimizados com menores custos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, poderiam ser feitos novos estudos da estrutura dos barcos da Amazônia utilizando outros critérios de análise, que podem incluir também cisalhamento e torção. Além disso, outros componentes estruturais como as anteparas e os pés-de-carneiro poderiam ser analisados.

Durante o período de estágio, alguns outros problemas no ramo da engenharia naval mostraram-se necessidades da Região Amazônica e poderiam render bons temas para trabalhos futuros. Neste trabalho, os conveses superiores não foram considerados como efetivos para a rigidez da viga-navio. Desta forma, uma análise da influência da presença de conveses superiores em embarcações de passageiros pode ser realizada. Além disso, geralmente na Região Amazônica não são feitos quaisquer estudos para o dimensionamento do sistema propulsivo das embarcações, e um estudo nesse sentido pode representar uma grande economia e melhora de performance dos barcos.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, Oscar Brito. **Projeto Racional Otimizado e Automatizado da Estrutura de Embarcações**. 1996. 149 f. Tese (Livre Docência) - Curso de Engenharia Naval, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BRASIL. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Atlas do Transporte**. 2006. Disponível em: <[http://cms.cnt.org.br/Imagens CNT/Site 2015/Pesquisas PDF/Atlas_Transporte_2006.pdf](http://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/Site2015/Pesquisas/PDF/Atlas_Transporte_2006.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2016.

BRASIL. GOVERNO DO ESTADO DO AMAZÔNAS. **APL de Construção Naval: Cidade pólo: Manaus**. 2008. 62 f.

BUREAU COLOMBO. **Regras Para Construção e Classificação de Embarcações de Aço que operam na Navegação Interior**. Rio de Janeiro, 2008. 218 f.

FREITAS, E. S. **Análise Estrutural do Navio**. 1977 PNV, EPUSP

GRABB, James E.; SCHUMACHER, Keith B.. **Rational Design of the Midship Section Structure of Longitudinally Framed Tankers**. 1960. 63 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval, Department Of Naval Architecture And Marine Engineering, Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 1960.

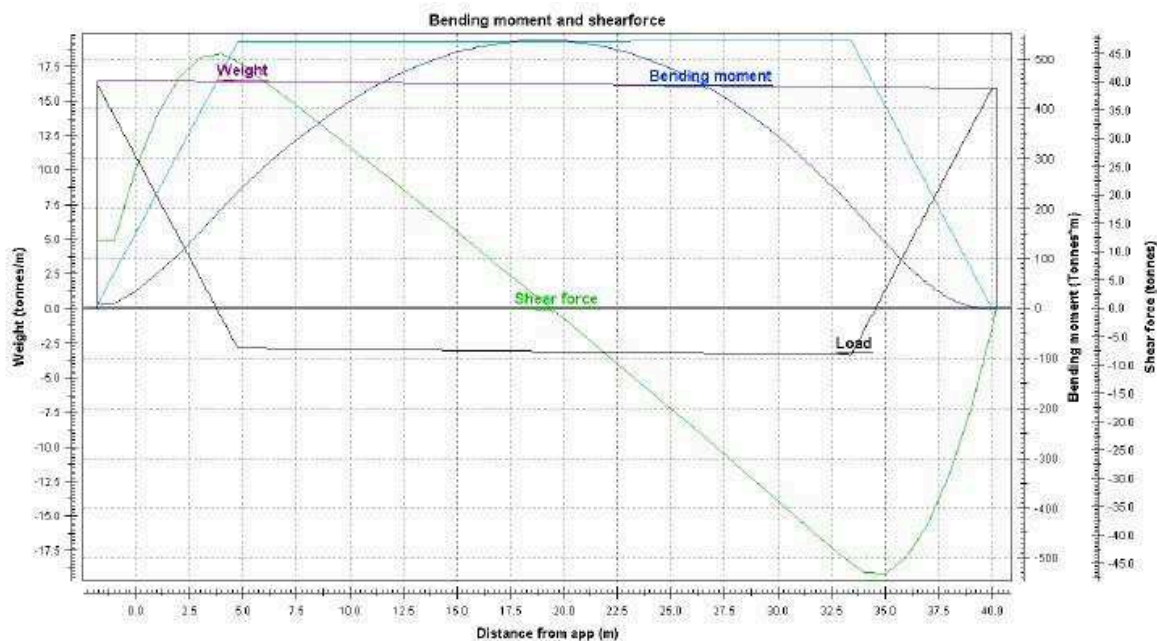
LAMB, Thomas. **Ship Design and Construction**. SNAME, 2003. 1508 f.

MARINHA DO BRASIL. DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. **Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação Interior: NORMAM-02/DPC**. 2005. 409 f.

RAWSON, K. J.; TUPPER, E. C.. **Basic Ship Theory: Hydrostatics and Strength**. 5. ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 2001. 400 f.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO - EMBARCAÇÃO A

Cálculo do momento fletor máximo da viga-navio, através do software *DELFTShip*:



Mean draft	1.933 (m)
Displacement	680.851 (tonnes)
Minimum shearforce	-46.677 (tonnes)
Maximum shearforce	45.011 (tonnes)
Maximum sagging moment	-0.047 (Tonnes*m)
Maximum hogging moment	537.901 (Tonnes*m)

Dimensões principais da Embarcação A

Embarcação A	
L [m]	42,30
D [m]	1,54
B [m]	10,00
P [m]	2,20

Cálculo do módulo de seção mestra da embarcação

Elemento	n	be [cm]	h [cm]	hi [cm]	d [m]	
Chapa - Convés Principal	1	500,000	0,800	220,000	2,204	
Chapa - Costado	1	0,800	180,000	40,000	1,300	
Chapa - Antepara Longitudinal	1	0,800	230,000	0,800	1,158	
Chapa - Fundo	1	460,000	0,800	0,000	0,004	
Longitudinal - Convés	Flange	9	7,500	0,635	212,500	2,128
	Alma	9	0,635	7,500	212,500	2,163
Longitudinal - Fundo	Flange	9	7,500	0,635	7,665	0,080
	Alma	9	0,635	7,500	0,800	0,046
Longitudinal - Costado	Flange	4	0,635	7,500	40,000	1,150
	Alma	4	7,500	0,635	40,000	1,150
Travessa Longitudinal	Flange	2	0,635	7,500	42,500	1,150
	Alma	2	7,500	0,635	42,500	1,150
Chapa - Bojo	1	40,000	0,800	0,000	0,200	

Ln	1,12	m
W	172089	mm ³
I total	1241,56	cm ² m ²
W _{SM convés}	2307,61	cm ² m
W _{SM fundo}	2209,30	cm ² m
W _{SM costado}	3430,01	cm ² m

Cálculo da tensão primária longitudinal

Região	M ₁ [t*m]	W _{SM} [cm ² m]	σ ₁ [MPa]
Convés	537,90	2307,61	22,86
Fundo	537,90	2209,30	23,88
Costado	537,90	3430,01	15,38

Cálculos para a tensão terciária na chapa

Elemento	a [mm]	b [mm]	a/b	p [MPa]	t [mm]	ky	kx	σ _{3y} [MPa]	σ _{3x} [MPa]
Convés	1350	500	2,70	0,0036	8	0,34	0,50	4,83	7,11
Fundo	1350	500	2,70	0,0151	8	0,34	0,50	20,08	29,53
Costado	1350	500	2,70	0,0112	8	0,34	0,50	14,87	21,86

Cálculos para a tensão secundária pesada

Região	L ₂ [mm]	b [mm]	p [MPa]	q [N/mm]	M _f [N*mm]	L ₁ /b	c [mm]
Convés	2000	1350	0,0036	4,91	1637780	0,86	480,06
Fundo	2000	1350	0,0151	20,41	6802745	0,86	480,06
Costado	1800	1350	0,0112	15,11	4079925	0,77	428,92

Onde:

M_f Momento fletor máximo do perfil $M_f = \frac{qL^2}{12}$ [N*mm].

Perfil pesado do convés = Perfil U 185x70x8 mm

	be [mm]	h [mm]	h _i [mm]	d [mm]	A [mm ²]	A*d [mm ³]	A*d ² [mm ⁴]	i total [mm ⁴]
Chapa	480,06	8,00	0,00	4,00	3840	15362	61448	81931
Aba 1	62,00	8,00	8,00	12,00	496	5952	71424	74069
Aba 2	62,00	8,00	185,00	189,00	496	93744	17717616	17720261
Alma	8,00	185,00	8,00	100,50	1480	148740	14948370	19169453
Somatório					6312	263798	32798858	37045715
Ln	42	mm						
W	172089	mm ³						
σ _{2y} convés	9,52	Mpa						

Perfil pesado do fundo = Perfil U 185x70x8 mm

	be [mm]	h [mm]	h _i [mm]	d [mm]	A [mm ²]	A*d [mm ³]	A*d ² [mm ⁴]	i total [mm ⁴]
Chapa	480,06	8,00	0,00	4,00	3840	15362	61448	81931
Aba 1	62,00	8,00	8,00	12,00	496	5952	71424	74069
Aba 2	62,00	8,00	185,00	189,00	496	93744	17717616	17720261
Alma	8,00	185,00	8,00	100,50	1480	148740	14948370	19169453
Somatório					6312	263798	32798858	37045715
Ln	42	mm						
W	172089	mm ³						
σ _{2y} fundo	39,53	Mpa						

Perfil pesado do costado = Perfil U 185x70x8 mm

	be [mm]	h [mm]	hi [mm]	d [mm]	A [mm ²]	A*d [mm ³]	A*d ² [mm ⁴]	i total [mm ⁴]
Chapa	428,92	8,00	0,00	4,00	3431	13725	54902	73202
Aba 1	62,00	8,00	8,00	12,00	496	5952	71424	74069
Aba 2	62,00	8,00	185,00	189,00	496	93744	17717616	17720261
Alma	8,00	185,00	8,00	100,50	1480	148740	14948370	19169453
Somatório					5903	262161	32792312	37036986
Ln	44	mm						
W	170903	mm ³						
σ_{2y} costado	23,87	Mpa						

Cálculos para a tensão secundária leve

Região	L ₂ [mm]	b [mm]	p [MPa]	q [N/mm]	M _f [N*mm]	L ₁ /b	c [mm]
Convés	1350	500	0,0036	1,82	276375	1,56	308,29
Fundo	1350	500	0,0151	7,56	1147963	1,56	308,29
Costado	1350	500	0,0112	5,60	849984	1,56	308,29

Perfil leve do convés = Perfil L 75x75x6,35 mm

	be [mm]	h [mm]	hi [mm]	d [mm]	A [mm ²]	A*d [mm ³]	A*d ² [mm ⁴]	i total [mm ⁴]
Chapa	308,29	8,00	0,00	4,00	2466	9865	39461	52614
Aba	68,65	6,35	76,65	79,83	436	34798	2777743	2779208
Alma	6,35	75,00	8,00	45,50	476	21669	985957	1209199
Somatório					3378	66332	3803161	4041021
Ln	19,6	mm						
W _{aba}	43220	mm ³						
W _{chapa}	139486	mm ³						
σ_{2x} convés aba	6,39	Mpa						
σ_{2x} convés chapa	1,98	Mpa						

Perfil leve do fundo = Perfil L 75x75x6,35 mm

	be [mm]	h [mm]	hi [mm]	d [mm]	A [mm ²]	A*d [mm ³]	A*d ² [mm ⁴]	i total [mm ⁴]
Chapa	308,29	8,00	0,00	4,00	2466	9865	39461	52614
Aba	68,65	6,35	76,65	79,83	436	34798	2777743	2779208
Alma	6,35	75,00	8,00	45,50	476	21669	985957	1209199
Somatório					3378	66332	3803161	4041021
Ln	19,6	mm						
W _{aba}	43220	mm ³						
W _{chapa}	139486	mm ³						
σ _{2x fundo aba}	26,56	Mpa						
σ _{2x fundo chapa}	8,23	Mpa						

Perfil leve do costado = Perfil L 75x75x6,35 mm

	be [mm]	h [mm]	hi [mm]	d [mm]	A [mm ²]	A*d [mm ³]	A*d ² [mm ⁴]	i total [mm ⁴]
Chapa	308,29	8,00	0,00	4,00	2466	9865	39461	52614
Aba	68,65	6,35	76,65	79,83	436	34798	2777743	2779208
Alma	6,35	75,00	8,00	45,50	476	21669	985957	1209199
Somatório					3378	66332	3803161	4041021
Ln	19,6	mm						
W _{aba}	43220	mm ³						
W _{chapa}	139486	mm ³						
σ _{2x costado aba}	19,67	Mpa						
σ _{2x costado chapa}	6,09	Mpa						

Composição das tensões longitudinais

Região	σ_1 [MPa]	σ_{2x} [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_x total [MPa]
Convés	22,86	1,98	7,11	31,95
Fundo	23,88	8,23	29,53	61,63
Costado	15,38	6,09	21,86	43,33

Fator de segurança à flambagem FS_{FL} e ao escoamento FS_x

Região	σ_x total [MPa]	σ_{Cr} [MPa]	FS_{FL}	FS_x
Convés	31,95	190,46	5,96	7,36
Fundo	61,63	190,46	3,09	3,81
Costado	43,33	190,46	4,40	5,42

Fator de segurança ao escoamento FS_{2y} da estrutura secundária transversal

Região	FS_{2y}
Convés	24,69
Fundo	5,94
Costado	9,84

ANEXO A – VISTA DA SEÇÃO MESTRA - EMBARCAÇÃO A

