

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ECONÔMICO NA PADRONIZAÇÃO DE
PROJETOS NAVAIS

por

Eduardo Donadel Basso

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2015

Avaliação do potencial econômico na padronização de projetos navais

por

Eduardo Donadel Basso

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alberto Tamagna, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Francisco José Kliemann Neto, PPGEP/UFRGS

Prof. Dr. Gladimir Grigoletti, ULBRA/ Uniritter

Prof. Dr. Luiz Alberto de Oliveira Rocha

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Maio de 2015

À Maiara, Magda, Roberto, André e Ignácio

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, à minha base: Maiara pela compreensão, apoio e carinho, Roberto, Magda pelos conselhos e paciência e Augusto pelo suporte e apoio, pessoas que são parte importante de minha vida, sem os quais a conclusão deste trabalho seria impossível.

Um profundo agradecimento também a meu orientador, Prof. Ignacio Iturrioz, por aceitar o desafio de trabalhar em um tema fora de sua área central de pesquisa.

A meu grande mestre André Casagrande, pelo apoio e suporte durante os momentos difíceis.

Ao pessoal da Globo Engenharia, pela compreensão nos momentos de falta.

E por fim, agradeço à UFRGS, ao PROMEC, aos colegas do GMAP e ao CNPq pelo apoio científico e financeiro, sem os quais este trabalho não teria existido.

RESUMO

A padronização figura como uma alternativa importante para a indústria, trazendo redução de custos, aumento de produtividade e de qualidade dos processos e produtos gerados. No setor naval da Bacia do Sudeste, ela apresenta-se de forma mais tímida, uma vez que o volume de embarcações produzidas é muito menor se comparado a indústrias de massa. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a padronização na indústria, demonstrando definições importantes relacionadas ao tema, bem como a apresentação de metodologias para a padronização de produtos e processos. De forma a gerar subsídios para a avaliação estrutural de projetos navais, são propostas duas diferentes metodologias, a primeira de cunho naval, proveniente da literatura técnica da área, e a segunda híbrida, baseada em uma norma para estruturas metálicas, que é validada através de uma análise não linear em elementos finitos. É realizado também um estudo preliminar visando desenvolver uma avaliação econômica, que considere diversos custos de fabricação e operação de uma embarcação, bem como contempla os benefícios da padronização. As metodologias mencionadas são utilizadas em três diferentes aplicações, aonde são propostas diversas configurações para o projeto de um painel básico de uma embarcação real, e os resultados destas análises são comparados ao projeto original, dando subsídios para uma avaliação preliminar da viabilidade econômica da padronização. Os dados gerados nestas análises são utilizados como parâmetros de entrada de um algoritmo de ajuste de leis potenciais chamado SLAW[®], aos quais são capazes de prever o custo de determinada configuração através do cálculo de alguns parâmetros do projeto, permitindo identificar quais parâmetros são mais importantes na definição do custo do objeto em estudo. Ao final tem-se uma discussão dos resultados obtidos através das ferramentas mencionadas, visando avaliar a importância da padronização no custo da embarcação.

Palavras chave: Padronização; Indústria Naval; Metodologia Híbrida; Lei Potencial; SLAW[®].

ABSTRACT

Standardization figure as an important alternative for the industry, bringing cost savings, increased productivity and quality of processes and products generated. In the naval sector of the Southeast Basin, it presents more timid, since the volume of produced vessels is much lower compared to mass industries. This paper presents a study on standardization in the industry, demonstrating important definitions related to the topic, and the presentation of methodologies for the standardization of products and processes. In order to generate subsidies for the structural evaluation, of naval projects, two different methods are proposed, the first hybrid, based on a standard for steel structures, which is validated through a non-linear finite element analysis, and the second from naval sector, belonging to the technical literature. There are also proposed the basis for a methodology for the economic evaluation, which considers various manufacturing and operating costs of a vessel and includes the benefits of standardization. The methods mentioned are used in three different applications, where several settings for a basic panel design of a real vessel are proposed, the results of these analysis are compared to the original design, giving data for the evaluation of the economic viability of standardization. The data generated in these analysis are used as input parameters of a potential laws adjustment algorithm called SLAW®, these laws are able to predict the cost of a specific configuration by calculating some design parameters, allowing to identify which parameters are most important the definition of the cost of the object under study. At the end it presents a discussion of the results obtained through the mentioned tools, to evaluate the importance of standardization in the cost of the vessel. Keywords: Standardization; Shipbuilding Industry; Hybrid Methodology; Power Law; SLAW®.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	A Bacia do Sudeste.....	15
1.2	A padronização e seus benefícios.....	16
1.3	Leis de Potência.....	16
1.4	Objetivos	17
1.4.1	Objetivo Geral	17
1.4.2	Objetivos Específicos	17
1.5	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
2.1	Leis de potência.....	19
2.1.1	Fundamentos	19
2.1.2	Exemplo de leis de potência.....	20
2.1.3	Ajuste por leis de potência	21
2.2	A padronização como alternativa para a redução de custos.....	22
2.2.1	Padronização na Indústria: uma visão geral.....	23
2.2.2	Benefícios econômicos diretos da padronização.....	23
2.2.3	Benefícios indiretos da padronização.....	24
2.3	Flambagem	25
2.4	Método dos Elementos Finitos	27
2.4.1	Aspectos Gerais.....	27
2.4.2	Métodos de Análise	28
2.4.3	Elementos de Casca.....	30
2.5	Imperfeições geométricas.....	32
3	CONTEXTUALIZAÇÃO: A Bacia do Sudeste	34
3.1	Cargas transportadas.....	34
3.2	Portos e terminais	35
3.3	Embarcações.....	35
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: Estado da arte da padronização na indústria naval.	40
4.1	Padronização na indústria naval.....	40
4.1.1	Benefícios da padronização na indústria naval	41
4.1.2	Movimentos de padronização na Indústria Naval	43
4.1.3	A padronização e sua relação com a modularização	49

4.2	Entrevistas com profissionais da área	52
4.2.1	Engenheiro Naval Ivan Tomas Erdos.....	52
4.2.2	Engenheiro Naval Miguel Pires	54
5	METODOLOGIA: algoritmo SLAW®	56
5.1	Funcionamento do SLAW®	56
5.2	Função custo de um tanque de refrigeração	57
5.2.1	Resultados	59
5.2.2	Influencia da Padronização na função custo	62
6	METODOLOGIA: Avaliações Estruturais	63
6.1	Avaliação estrutural – Método Naval.....	63
6.2	Avaliação de Perfis submetidos à tração e pressão uniforme	63
6.3	Avaliação das placas submetidas à pressão uniforme e compressão.	66
6.4	Avaliação Estrutural –Método Híbrido	68
6.4.1	Método híbrido: descrição.....	68
6.4.2	Método híbrido: Detalhamento do método	70
6.4.3	Método Híbrido – Validação.....	72
7	METODOLOGIA: Avaliação de Custos	80
7.1	Índices de benefício da padronização.....	86
8	APLICAÇÕES	89
8.1	Aplicação 1 - Função custo em uma estrutura naval considerando os esforços devido à pressão hidrostática.....	89
8.2	Aplicação 2: Função custo de uma estrutura naval considerando os esforços devido a pressão hidrostática e aos efeitos de onda em diferentes pontos da viga navio:	96
8.3	Aplicação 3: Função custo de uma estrutura naval com padronização de frota.....	111
9	CONCLUSÕES	115
10	REFERÊNCIAS	118
11	Apêndice A – A padronização na Indústria moderna	120
12	Apêndice B – Rotina para simulação linear elástica – Determinação da carga de colapso	125
13	Apêndice C – Obtenção detalhada função de custo para a aplicação 2	135
14	Apêndice D – Lista de aços de uma barcaça para transporte de líquidos.	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Bacia do Sudeste	15
Figura 2.1 – Função auto escalável no intervalo $[0,1]$ (a) e no intervalo $[0,100]$ (b).....	21
Figura 2.2 – Função não auto escalável no intervalo $[0,\pi]$ (c) e no intervalo $[0,10* \pi]$ (d).....	21
Figura 2.3 - Curva de aprendizado Indústria Naval (Andrew, 2009).....	23
Figura 2.4 - Progressão do Desconto Compra de Aço (Fonte: Autor)	24
Figura 2.5 - Coluna curta após a flambagem local (Fonte: Pfeil, 2010).....	26
Figura 2.6 - Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal para alguns perfis convencionais. (Fonte: Grigoletti, 2008).....	27
Figura 2.7 - Elemento utilizado (fonte: Ansys, 2007).....	30
Figura 2.8 - Teorias de Kirchhoff e Mindlin-Reissner	32
Figura 2.9 - Barra com imperfeição geométrica aplicada via aproximação de Young	33
Figura 3.1 - Embarcação Autopropulsada (Fonte: Navegação Aliança-Trevisa).....	36
Figura 3.2 - Sistema Empurrador Barcaça (Fonte: Navegação Guarita).....	36
Figura 4.1 - Aumento no custo de navios militares, os códigos indicam diferentes embarcações (Tedesco, M. 1994).....	40
Figura 4.2 - Crise na indústria naval (Tedesco, M. 1994) – Curva referente aos empregados em milhares	41
Figura 5.1 – Erro da equação única para custos de tanques de refrigeração	60
Figura 5.2 – Erro da equação A para o custo de refrigeração	60
Figura 5.3 – Erro da equação A para o custo de refrigeração	61
Figura 5.4 – Variação do erro da expressão proposta em função da relação L/D.....	62
Figura 6.1 – Perfil com medidas.....	64
Figura 6.2 - Dimensões do conjunto.....	64
Figura 6.3 - Fluxograma de cálculo para o método naval	67
Figura 6.4 - Curva índice de esbeltez versus fator χ para tensões de compressão	70
Figura 6.5 - Fluxograma do método híbrido – tensões de cisalhamento ou compressão	72
Figura 6.6 - Modelo bilinear.....	73
Figura 6.7 – (a) Localização do painel na embarcação, (b) dimensões padrão em mm , com quilha (1), costado (2) e cavernas gigantes (3).....	75
Figura 6.8 - Dimensões alteráveis	75
Figura 6.9 - Vinculações e Carregamento	76
Figura 6.10 - Tamanhos de elementos (espessura do perfil meramente ilustrativa)	76

Figura 6.11 - Análise de diferentes graus de imperfeições.....	77
Figura 6.12 - Ponto analisado.....	77
Figura 6.13 - Resultados para χ	79
Figura 7.1 - Metragem de Solda em um painel.....	82
Figura 8.1 – (a) Posição da região de estudo posição na barça, (b) corte transversal, (c) dimensões do perfil e (d) dimensões e restrições do painel na simulação.	90
Figura 8.2 – Região das tensões críticas.....	93
Figura 8.3 – Aplicação 1: Dados da etapa 2 (análise de custo), para identificar o significado de cada item , vide TABELA 7.4).....	94
Figura 8.4 - Embarcação sob alquebramento	97
Figura 8.5 - Embarcação sob tosamento.....	97
Figura 8.6 - Distribuição do fator c2 e número de painéis por região (L1=ponto médio)	98
Figura 8.7 - Seção mestra completa, regiões de análise e posição na embarcação em vermelho (centro de gravidade destacado ao centro)	100
Figura 8.8 - Fluxograma das propostas - Aplicação II.....	101
Figura 8.9 - Erro Relativo para a Aplicação 2.....	111
Figura 8.10 - Fluxograma propostas para a aplicação 3.....	113
Figura 8.11 - Comparativo Custo Logística	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Cargas transportadas (Fonte: R. T. Bacia Sul, 2013)	34
Tabela 3.2 – Infraestrutura Portuária (Fonte: R. T. Bacia Sul, 2013)	35
Tabela 3.3 – Dados Frota Sólidos (Fonte: Operadores Hidrovia, 2011)	37
Tabela 4.1 - Matriz de separação modular padrão (Fonte: Wade,1986)	46
Tabela 5.1 - Matriz de sensibilidade da análise SLAW® (para um caso hipotético).....	56
Tabela 5.2 – Matriz Unidades SLAW® (caso hipotético)	57
Tabela 5.3 - Dados relevantes para o custo de tanques de refrigeração	58
Tabela 5.4 – Unidades	59
Tabela 5.5 - Dados orçados (Parcial).....	59
Tabela 6.1 – Propostas adotadas ($t'=25.4\text{mm}$ em todos os casos)	75
Tabela 6.2 - Resultados Caso 5	77
Tabela 6.3 - Resultados da análise linear e flambagem.....	78
Tabela 6.4 - Comparativo dos resultados	79
Tabela 7.1 - Custos Praticados	81
Tabela 7.2 - Custos Acabamentos e Pintura	83
Tabela 7.3 - Índices utilizados na avaliação de custos	86
Tabela 7.4 - Resumo das Equações de Custo	88
Tabela 8.1 - Propostas elaboradas	92
Tabela 8.2 - Análises estruturais.....	94
Tabela 8.3 - Dados para entrada no SLAW®.....	95
Tabela 8.4 - Matriz unidades	95
Tabela 8.5 - Comparativo dos Resultados	95
Tabela 8.6 – Esforços máximos devido às ondas.	99
Tabela 8.7 - Propriedades da seção	101
Tabela 8.8 - Propostas elaboradas na aplicação II.....	102
Tabela 8.9 – Momentos fletores reais da embarcação.....	103
Tabela 8.10 – Resultados da análise estrutural para a aplicação 2	104
Tabela 8.11 – Resultados da Análise Estrutural 2 - Fatores de Segurança	104
Tabela 8.12 - Resultados da análise econômica para a aplicação II.....	108
Tabela 8.13 - Dados Slaw Aplicação II (“*” indica tratar-se da média ponderada).....	109
Tabela 8.14 - Resultados Slaw para a Aplicação 2.....	110

Tabela 8.15 –Propostas Geradas.....	113
Tabela 8.16 - Resultados da Análise Econômica	114
Tabela B1 - Resultados análise não linear físico geométrica	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAq	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
DWT	<i>Deadweight Tonnage</i> – peso morto da embarcação
DOD	<i>Department of Defense</i>
ECCS	<i>European Convention for Constructional Steelwork</i>
FMM	Fundo da Marinha Mercante
IACS	International Association of Classification Societies
NBR	Norma Brasileira
NK	<i>Nippon Kaiji Kyokai</i> – Sociedade Classificadora Japonesa
SSRC	<i>Social Science Research Council</i>
TUP	Terminal de Uso Privativo

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro do tanque, m
L	Altura do tanque, m
f_y	Tensão de escoamento, MPa
γ	Coeficiente de segurança, adimensional
χ	Fator de redução da resistência devido à flambagem, adimensional
d	Altura do perfil somado a meia espessura da chapa, mm
A_f	Área da flange do perfil, mm^2
A_w	Área da alma do perfil, mm^2
A_p	Área da chapa colaborante, mm^2
A	Área total, mm^2
e	Centróide do sistema perfil + chapa colaborante, mm
y'	Altura total perfil + espessura de chapa, mm
s	Espaçamento entre os perfis, mm
l	Comprimento do perfil, mm
b	Menor dimensão da chapa entre longitudinais de maior porte, mm
Pr	Pressão hidrostática no ponto de análise; MPa
σ_x	Tensão axial de compressão; MPa
t'	Espessura real, mm
t'req	Espessura requerida, mm
Dpeso	Diferença de peso em aço em cada proposta comparado ao projeto original; kg
Cfrete	Custo por kg transportada praticado na bacia, R\$
Nviag	Número de viagens por ano, un
Np	Número de painéis existentes na embarcação, un
ρ	Densidade da água, kg/m^3
g	Aceleração da gravidade m/s^2
h	Calado da embarcação, m
c1	Parâmetro relativo ao comprimento da embarcação, adimensional
c2	Parâmetro relativo à distribuição dos esforços na embarcação, adimensional
L1	Comprimento da embarcação, m
Bo	Boca da embarcação, m

L_{wl}	Comprimento da embarcação na linha da água, m
T	Calado da embarcação, m
V	Volume da carena, ou seja, da região do casco que fica submersa, m^3
$I_{seção}$	Momento de inércia da seção, mm^4
$y_{seção}$	Coordenada do centro de gravidade da seção em relação ao eixo y, mm
α	Fração de força, adimensional
σ_c	Máxima tensão normal para colapso, MPa
τ_c	Máxima tensão cisalhante para colapso, MPa
σ_d	Máxima tensão normal elástica para carregamento unitário, MPa
τ_d	Máxima tensão cisalhante elástica para carregamento unitário, MPa
σ_e	Tensão normal crítica para flambagem, MPa
τ_e	Tensão cisalhante crítica para flambagem, MPa

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, descreve-se primeiramente a Bacia do Sudeste, região onde atuam as embarcações objetivo deste trabalho, na sequência aborda-se a padronização na indústria em geral e seus benefícios e ao final fala-se sobre leis de potência, que são utilizadas nesta dissertação para modelar as funções de custo propostas. Os objetivos do trabalho e a estrutura do mesmo fechando o capítulo.

1.1 A Bacia do Sudeste

Conhecida também como Bacia Hidrográfica do Atlântico Sul, a Bacia do Sudeste é composta por diversos corpos d'água, possuindo um total de 185 mil quilômetros quadrados. Inicia-se na divisa entre os estados de São Paulo e Paraná, seguindo até o Arroio Chuí, no extremo sul do Rio Grande do Sul.

O foco deste trabalho é a região do extremo sul do país, e desta forma a apresentação da bacia em questão será vinculada somente ao estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 1.1 é apresentada a região abordada:

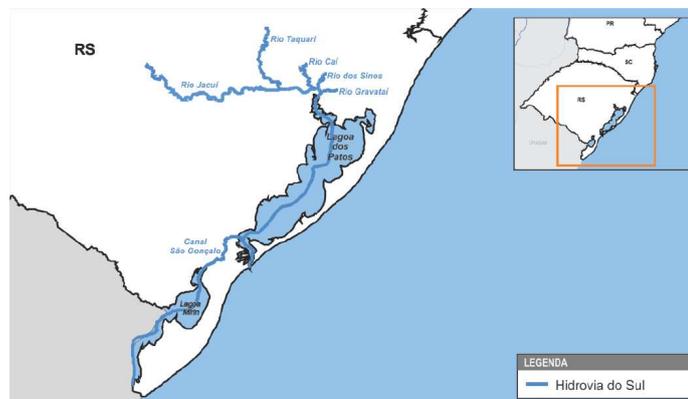


Figura 1.1 Bacia do Sudeste

Esta região abrange as Lagoas dos Patos e Mirim, os rios Jacuí, Taquari, Caí, dos Sinos e Gravataí, bem como o Canal de São Gonçalo.

Algumas características relevantes desta bacia que merecem ser mencionadas são sua composição diversa, com rios sinuosos e estreitos, que dificultam a utilização de grandes comboios devido à dificuldade de manobra em curvas mais fechadas e também a Lagoa dos Patos, que possui uma condição similar à de águas desabrigadas, exigindo das embarcações resistir a condições de operação próximas às existentes em mar aberto. Todas estas

características tornam esta bacia peculiar, com fatores que implicam diretamente no projeto e nos custos envolvidos.

As embarcações existentes nesta bacia são de dois tipos: autopropulsadas e comboios. As primeiras possuem corpo único, onde as regiões de carga, governo e propulsão formam uma única estrutura, as segundas são compostas por barcaças (região de carga) e empurradores (regiões de governo e propulsão). Estas embarcações possuem as mais diversas capacidades de carga, variando de 1500 a 6000 toneladas e comprimentos que variam de 40 a 100 metros.

As cargas transportadas variam entre grãos, derivados de soja e de petróleo, fertilizantes e agregados da construção civil, chegando a aproximadamente 22 milhões de toneladas em 2010.

1.2 A padronização e seus benefícios

Com a mecanização dos processos produtivos através da utilização de máquinas movidas a vapor e a revolução industrial, foi possível aumentar notavelmente a produtividade das linhas de fabricação nas indústrias, eliminando os processos artesanais e estabelecendo processos padronizados de produção.

Após a consolidação da padronização por Henry Ford no início do século 20, a indústria em geral começou a ver na padronização uma forma de reduzir custos. Assim, tornou-se possível que uma maior fatia da população pudesse adquirir itens até então de luxo, como veículos, ou ainda, possuírem mais exemplares de itens vitais, porém caros, como calçados e roupas.

Diversos custos inerentes a processos produtivos estão relacionados diretamente com a primeira produção de um determinado item. Quando ocorre a repetição de itens produzidos, estes custos são diluídos entre todos os itens. Além disto, diversos benefícios financeiros e operacionais, como as curvas de aprendizado, a redução de erros e o aumento na qualidade passam a existir.

1.3 Leis de Potência

Conforme Manzo (2008), leis de potência são equações que definem a proporcionalidade entre duas quantidades, tendo sua validade vinculada a um determinado intervalo, e descrevem o comportamento da função frente à escala presente. Sua forma geral é:

$$Y = c x X^b \quad (1.1)$$

Onde X é variável independente, c é constante, b é o expoente de escala e Y é a variável dependente.

De acordo com Mendez (2008), leis de potência são de enorme utilidade durante as fases iniciais de concepção de formulações para ajustar um determinado comportamento, quando a configuração de um sistema como um todo, bem como a escolha de seus parâmetros ainda são incertas. Neste caso, as leis de potência podem fornecer estimativas rápidas da viabilidade de um projeto, ajudando por exemplo a determinar bitolas ideais para tubulações e contribuir para as decisões sobre a configuração e seleção de materiais.

Estas leis são também úteis para sistemas de controle e algoritmos, podendo prever o comportamento de um sistema de tomada de decisões de forma muito mais rápida do que os modelos virtuais como os de elementos finitos, ou mecânica dos fluidos computacional.

1.4 Objetivos

Nesta seção são definidos o objetivo geral e os específicos a serem atendidos por este trabalho.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estabelecer as bases para uma análise de viabilidade econômica de projetos navais com vistas à padronização.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- elaborar metodologias para avaliar estrutural e economicamente projetos de embarcações;
- executar um estudo exploratório sobre a padronização e seus benefícios para as indústrias em geral, com enfoque maior na indústria naval, buscando inclusive obter opiniões técnicas de profissionais da área;
- aplicar as leis de potência na determinação de funções de custo em projetos navais;
- investigar projetos de embarcações com vistas à padronização, de forma a demonstrar seus benefícios frente a projetos não padronizados.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho aqui apresentado está estruturado em nove capítulos, iniciando pela presente introdução. O capítulo seguinte trata da fundamentação teórica, que apresenta de

forma resumida as características das leis de potência, na sequência é abordada a padronização e seus benefícios e por fim fala-se sobre as características necessárias para realizar a verificação estrutural em elementos finitos.

O próximo capítulo apresenta uma contextualização sobre a bacia do sudeste, região de interesse deste trabalho. Segue-se uma revisão bibliográfica, onde um estudo sobre a padronização na indústria (especialmente naval) é desenvolvido, de forma a serem apresentados diversos conceitos relacionados ao tema, ao final tem-se duas entrevistas com profissionais da área, aonde o tema da padronização na indústria naval foi abordado.

Apresenta-se então o capítulo denominado metodologia, que contém duas metodologias para a verificação estrutural das embarcações empregando diferentes tipos de análise, seguida da apresentação das bases para a metodologia para avaliação de custos em estruturas navais. Por último também no mesmo capítulo de metodologia tem-se o procedimento que é utilizado posteriormente para o ajuste de funções custo através de leis de potência.

Tem-se então o capítulo contendo as aplicações deste trabalho, onde encontra-se a verificação estrutural seguida da avaliação de custos em três diferentes situações, a primeira levando em conta carregamentos e aspectos geométricos existentes em um único painel sem considerar padronização, a segunda buscando a padronização intranavio, ou seja, a padronização de diversos painéis dentro de uma mesma embarcação com estados de carregamento diferentes, o que permite discutir os benefícios da padronização de uma estrutura. Ao final deste capítulo, tem-se a terceira aplicação, que estende a padronização a um cenário mais representativo, considerando um intervalo de operação de 10 anos e a padronização de uma frota de navios, ou seja, padronização intraclasse. No capítulo final apresentam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo define-se de forma mais detalhada leis de potência demonstrando seus fundamentos, bem como exemplos comparativos que demonstram seu comportamento. Fala-se então sobre um dos objetivos deste trabalho, o ajuste de fenômenos através de leis de potência.

Na sequência fala-se sobre padronização, seu início, sua aplicação na indústria em geral e seus benefícios diretos e indiretos. Parte-se então para a seção sobre flambagem, fenômeno presente nas estruturas que serão estudadas neste trabalho, explicando seus diferentes modos. A próxima seção fala sobre o método dos elementos finitos, as etapas necessárias para o referido método, seguido do detalhamento de pontos importantes no método para a aplicação deste trabalho.

2.1 Leis de potência

Conforme dito na introdução, são leis que definem proporcionalidade dentro de um determinado intervalo. Sua forma geral é: $Y = c x X^b$, onde X e Y são variáveis, c é constante e b é o expoente de escala. Apesar de serem parecidas, não são funções exponenciais, estas são do tipo $Y = c x a^x$. A principal diferença é que a função exponencial tende a um valor assintótico muito mais rapidamente que uma lei de potência. As funções de potência possuem duas propriedades:

a) O logaritmo de $Y = c x X^b$ torna-se $\text{Log}(Y) = \log(c) + b x \log(X)$, o que é a equação de uma reta com inclinação b. Ou seja, para saber se uma série de dados segue uma lei de potência, representam-se seus logaritmos e então verifica-se até que ponto eles podem ser aproximados por uma reta, conforme a tolerância aceita.

b) Uma função de potência é invariante a mudanças de escala: ao aumentar a escala da função, a forma mantém-se a mesma.

Muitos fenômenos da natureza seguem leis de potência, e pode-se encontrar as mesmas em sistemas biológicos, onde chamam-se leis alométricas, geometria fractal presente em grande variedades de problemas na engenharia, estudo de redes complexas aplicáveis aos mais variados campos dentro da engenharia e na área social e estudo de distribuições de probabilidade em análises estatísticas.

2.1.1 Fundamentos

Conforme descrito na introdução, leis de potência são de enorme utilidade durante as fases iniciais de processos investigativos de fenômenos ainda desconhecidos, gerando as

primeiras equações capazes de descrever o comportamento destes fenômenos, baseados unicamente nos dados existentes.

De acordo com Manzo (2008), existem aspectos que caracterizam cada lei de potência e que podem servir para determinar se um fenômeno pode ou não ser representado através deste tipo de lei:

a) Escala característica: é a escala distintiva ou categoria de um fenômeno, ou seja, são as unidades utilizadas para caracterizar um determinado fenômeno, como metros para a altura média de uma população ou as rotações por minuto de um motor elétrico.

b) Efeito de escala: refere-se à mudança no resultado devido às alterações de escala analisadas, como dito anteriormente, leis de potência não apresentam variação em sua forma quando altera-se a escala. Desta forma, se o comportamento dos resultados (não o seu valor em si, mas a taxa com que o mesmo varia, ou seja, sua forma) alterar-se quando muda-se de escala, este fenômeno não poderá ser representado por uma lei de potência.

É importante citar aqui o fenômeno fractal que ocorre quando um comportamento ou característica não se altera com a mudança de escala, como os alvéolos pulmonares ou linhas costeiras. O fenômeno fractal é facilmente identificável quando é preciso colocar algo em uma imagem para dar noção de dimensão (como um carro, uma moeda ou um grão de arroz).

2.1.2 Exemplo de leis de potência

Conforme dito anteriormente, a lei potencial tem a propriedade de ser auto escalável, nas figuras 2.1 2 2.3 pode-se verificar isto. Apresenta-se a função $f = x^{2,1}$ para x variando entre 0 e 1, em (a), e variando entre 0 e 100 em (b), se observa neste caso que ao não indicar-se a escala dos eixos a forma da função será a mesma. Ao comparar este mesmo comportamento com o apresentado pela função $f = \text{sen}(x)$ na figura Figura 2.2, primeiramente no domínio $x (0, \pi)$ e após no domínio $x (0, 10 \times \pi)$. Neste caso independentemente da escala a forma da curva muda notavelmente.

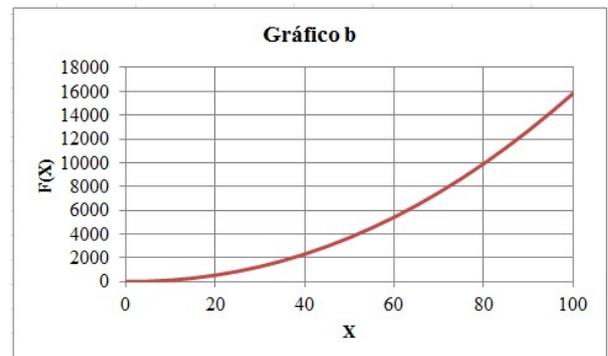
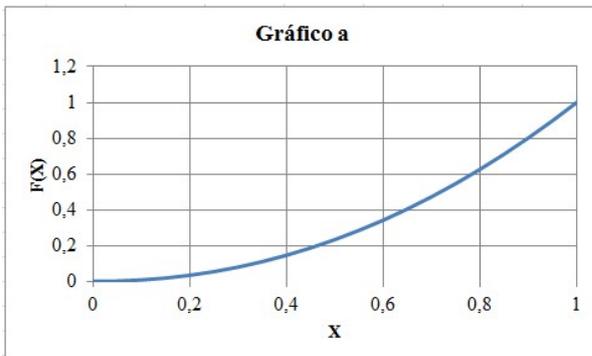


Figura 2.1 – Função auto escalável no intervalo [0,1] (a) e no intervalo [0,100] (b)

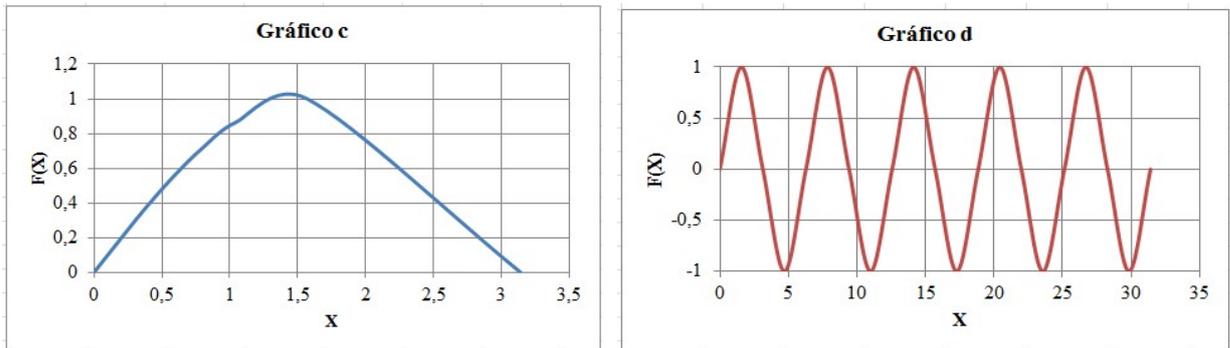


Figura 2.2 – Função não auto escalável no intervalo $[0,\pi]$ (c) e no intervalo $[0,10*\pi]$ (d)

Relacionado com a propriedade de a função potencial ser auto escalável está o fato de que muitos eventos na natureza tem natureza fractal, ou seja, seu padrão mantém-se similar independentemente da escala na qual está sendo observado, como o caso do contorno das nuvens e costas. Nestes casos, o evento estudado depende de uma função potencial, como discutido no capítulo de A. Corral no livro de Carpinteri e Lacidogna (2008). A seleção da função exponencial para realizar o ajuste proposto no presente trabalho se justifica em parte devido à característica da função exponencial se transformar em linear se ela for trabalhada em escala logarítmica, o que facilita seu ajuste. Outra razão do ponto de vista conceitual é que muitos eventos na natureza possuem um comportamento que segue a lei potencial.

Tanto a fractalidade como a validade das funções potenciais indicadas se dá dentro de certa faixa de valores para os parâmetros de entrada.

2.1.3 Ajuste por leis de potência

Mendez (2008) propõe que diversos fenômenos ou efeitos, como o custo de uma estrutura, possa ser ajustado com certo grau de precisão utilizando uma função multidimensional exponencial da forma:

$$C = K x a_1^{x_1} x a_2^{x_2} x a_3^{x_3} \dots a_n^{x_m} \quad (2.1)$$

Sendo K uma constante seguida dos parâmetros medidos (a_1 a a_n), cada um deles elevado a seu expoente (x_1 a x_m). Cada ponto da função estudada representa uma configuração entre todas as estudadas. Ao possuir os valores do fenômeno ou efeito medidos $C^\alpha \dots C^\beta$, sendo que a cada um corresponde um conjunto de parâmetros que definem a sua configuração (dimensão, forças aplicadas, etc.), é possível identificar para C^α os valores de

$a_{\alpha 1}$, $a_{\alpha 2}$...correspondentes. Utilizando esta informação pode-se aplicar um algoritmo de regressão para ajustar sobre o efeito estudado uma função potencial achando os valores x_1 , x_2 ..., expoentes que melhor ajustem a lei representada na expressão (2.1). Esta função poderá ser válida dentro de certas faixas dos parâmetros de entrada.

Estudando o grau destes expoentes é possível determinar também qual é a sensibilidade da função C aos parâmetros utilizados e discutir a possibilidade de eliminar os parâmetros menos significativos da expressão proposta.

2.2 A padronização como alternativa para a redução de custos

De acordo com Ping (2011), o advento do motor a vapor em 1782 por James Watt e por extensão a revolução industrial foram o estopim para os primeiros conceitos de padronização. A mudança de paradigma ocorrida através da substituição do trabalho artesanal pela fabricação com auxílio de máquinas movidas a vapor permitiu um grande salto tecnológico, com grande aumento de produtividade, divisão de tarefas, produção em linha entre outros inúmeros benefícios.

As novas tecnologias acabaram com a necessidade de uma mão de obra altamente especializada, uma vez que as atividades cíclicas junto às máquinas eram de baixa complexidade. Um trabalhador do campo tornava-se apto á produzir após um breve treinamento.

Pode-se dizer que, a partir desta época, a padronização começou a existir, no entanto, seu conceito foi formalmente estabelecido em 1798, quando o governo americano encomendou a Eli Whitney um lote de dez mil rifles a serem entregues em dois anos. Uma condição imposta pelo governo era de que estas armas fossem idênticas ao rifle francês Charleville, de forma a permitir o intercâmbio de peças nos campos de batalha. Para garantir êxito, Whitney desenvolveu seu protótipo em partes padronizadas e muito similares ao aparato francês, de forma que estas fossem facilmente montadas na fabricação final do rifle e, por extensão, intercambiáveis com seu irmão gêmeo francês.

Não é possível garantir que Whitney tenha sido a primeira pessoa a elaborar um projeto em partes padronizadas visando uma montagem final, porém há um consenso que sua proposta inovadora foi revolucionária nos Estados Unidos, sendo de grande valia na criação dos conceitos de produção em massa e alta qualidade. Graças a isto, Eli Whitney é conhecido como o pai da padronização.

2.2.1 Padronização na Indústria: uma visão geral

A grande mudança de paradigma nos métodos produtivos, através da mecanização dos sistemas de produção, da repetitividade das atividades e da produção de itens em série, em detrimento das produções artesanais existentes até então causou grande aumento da produtividade e possibilitou uma redução nos custos dos itens produzidos.

A introdução deste conceito permitiu o surgimento de diversas máquinas e processos de produção; no entanto, muitos destes implementos geravam produtos de baixíssima qualidade, ou ainda, processos de produção mal projetados geravam desperdícios de matéria prima e gravíssimos acidentes de trabalho.

Novamente, surge a necessidade de evoluir os sistemas de produção, buscando formas de melhorar a qualidade dos processos produtivos e dos produtos gerados por estes processos.

2.2.2 Benefícios econômicos diretos da padronização

Os benefícios mais salientes da padronização são os diretos, que podem ser medidos financeiramente, e referem-se aos tempos de execução das tarefas e à qualidade dos serviços executados. Abaixo se tem os principais benefícios econômicos existentes.

Curva de aprendizado: estudos como o de Andrew, (2009) mostram a evolução na fabricação através da repetição, tem-se curvas de aprendizado com redução de até 35%, conforme pode-se verificar na figura Figura 2.3:

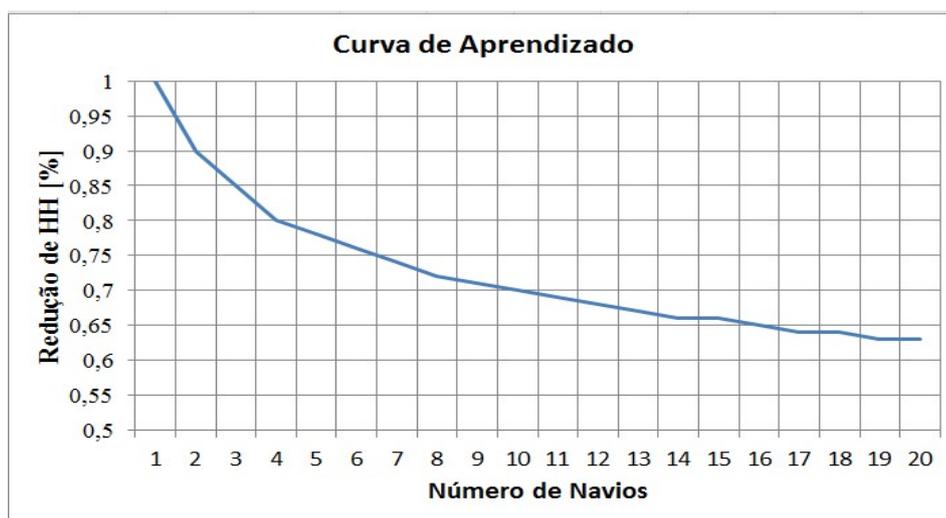


Figura 2.3 - Curva de aprendizado da Indústria Naval (Andrew, 2009)

Menor variabilidade de componentes: permitindo a diminuição de estoque de peças, como também a quantidade de diferentes processos a serem executados com tais componentes. Uma menor variabilidade possibilita ainda a melhoria nos procedimentos de

controle e armazenagem, isto se deve tanto ao estoque enxuto quanto à possibilidade de padronizar-se os procedimentos da área de suprimentos.

Redução de tempo de projeto: uma vez que não é mais necessário elaborar novos desenhos, somente alinhar o já produzido com a linha de produção, verificar matérias primas, etc...

Maior precisão nos orçamentos: pois é possível comparar os valores orçados inicialmente com os valores realizados quando da primeira construção.

Redução de custo unitário da matéria prima (poder de barganha): de acordo com cotações feitas com empresas do setor, partindo de um valor inicial de 4700 Kg de aço, tem-se descontos de 2% a 7%, dependendo da quantidade orçada, conforme pode ser visto na figura Figura 2.4:

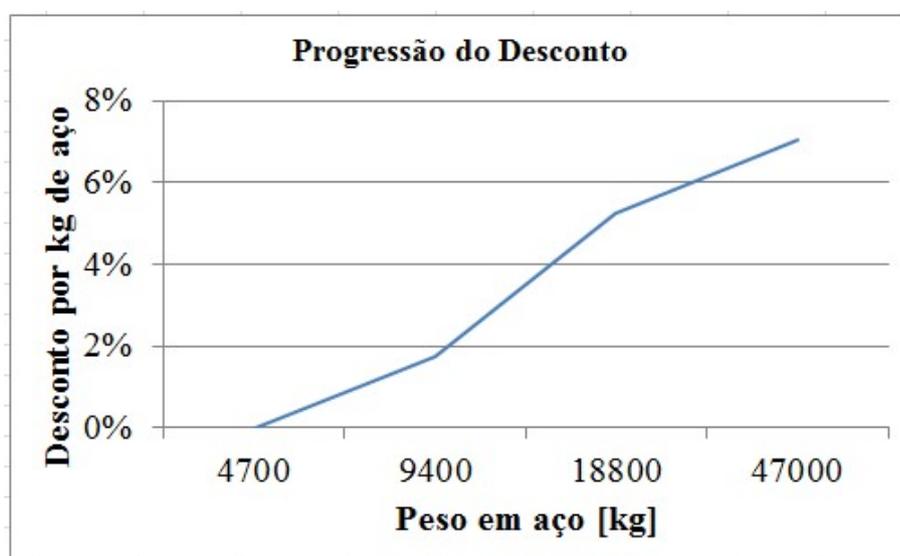


Figura 2.4 - Progressão do Desconto Compra de Aço (Fonte: Autor)

2.2.3 Benefícios econômicos indiretos da padronização

Além dos benefícios econômicos diretos da padronização citados na seção anterior, tem-se benefícios indiretos, tais como:

Comunicação e informação: a padronização facilita a transferência de tecnologia e de informações para todos os usuários, inclusive os clientes (via catálogos).

Registro da técnica: pela formalização escrita das técnicas dos funcionários a empresa pode absorver o conhecimento e mantê-lo registrado, garantindo o domínio tecnológico.

Manutenção e melhoria da qualidade: equipamentos padronizados permitem a intercambialidade dos componentes, funções e dimensões, além de aumentar a confiabilidade

devido ao histórico que começa a formar-se pela repetição da utilização de equipamentos padrão.

Produtividade: ao padronizar-se um processo fabril, é possível analisá-lo com maior clareza, o que em primeira instância facilita muito seu controle, além disto, torna possível o surgimento de melhorias, na produtividade, na qualidade, na implementação de novas ideias, uma vez que, como dito acima, ao padronizar tem-se a oportunidade de repensar todo o processo e, em alguns casos, pensar em automação e informatização de determinadas etapas deste processo.

Treinamento e segurança: além da produtividade, as curvas de aprendizado aumentam a segurança pelo surgimento de operários com melhor capacitação, reduzindo a chance de acidentes, permitindo melhores condições de trabalho.

Projeto: a utilização de componentes padronizados melhora o nível de engenharia do projeto, reduzindo a incidência de erros e alterações gradativamente, além de permitir a gestão dos materiais e recursos provisionados ao projeto.

Aquisições: a padronização dos processos permite definir perfis de consumo para matérias primas, consumíveis e etc., tornando possível prever com certo grau de exatidão datas e quantidades a serem compradas.

Finalizados os aspectos relativos à padronização, segue-se neste trabalho abordando temas importantes para o dimensionamento estrutural que serão utilizados nas análises das propostas de estruturas geradas no capítulo de aplicações. Outros aspectos relacionados com a padronização são abordados no Apêndice A deste trabalho.

2.3 Flambagem

O fenômeno que produz perda de equilíbrio em estruturas esbeltas produzida por tensões de compressão é denominado flambagem. Estruturas onde uma das dimensões é muito maior que as demais apresentam diversas tipologias de flambagem, e abaixo seguem definições breves destas tipologias:

Flambagem global: é caracterizada pela translação da seção transversal sem produzir-se a deformação da mesma. Os principais modos de flambagem global presentes em barras submetidas à compressão são os modos de flexão, torção e flexo-torção, de acordo com o tipo de rigidez que se instabiliza na estrutura.

A característica que define este tipo de flambagem, sendo comum a todos seus subtipos é a manutenção da forma da seção transversal, que não se deforma, ou seja, na forma de flambagem associada a seção transversal sofre um movimento de corpo rígido.

No caso de vigas submetidas à flexão em torno de seu eixo de maior inércia pode acontecer a flambagem lateral por torção. Este modo tem pouca reserva de resistência pós-flambagem.

Flambagem Local: quando os elementos que compõem um perfil (mesa, alma, aba, etc.) apresentam deformação no modo associado à carga crítica sendo que nesta deformação não há interação entre elementos estruturais contíguos estamos em presença da flambagem local; neste caso, os parâmetros que dominam a susceptibilidade à flambagem são a relação entre a largura e a espessura da chapa e as condições de contorno a que cada chapa esta submetida. Neste tipo de flambagem, os pontos de união das chapas que compõem o perfil não se movem (exceto no caso de chapas nas extremidades).

A flambagem local é um fenômeno de instabilidade em elementos estruturais bidimensionais, como por exemplo, as chapas componentes dos pilares metálicos. Ocorre em geral, em pilares curtos. Os elementos submetidos a este modo de instabilidade sofrem translações normais ao seu plano médio (ondulações), como mostra a figura Figura 2.5. Na flambagem local a estrutura apresenta uma reserva de resistência estrutural que permite definir a resistência da estrutura pós-flambagem.

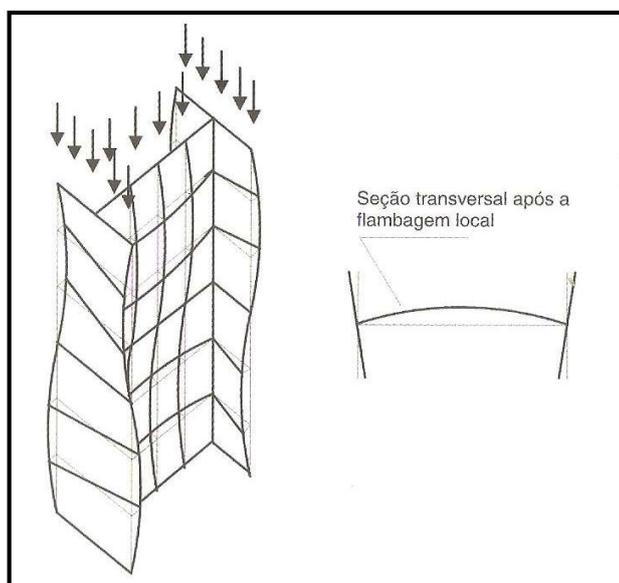


Figura 2.5 - Coluna curta após a flambagem local (Fonte: Pfeil, 2010).

Flambagem Distorcional: quando os pontos de união das chapas que compõem o perfil movem-se estamos frente à Flambagem por Distorção, onde os modos de flambagem

podem incluir o acoplamento de várias chapas. Basicamente, este fenômeno é causado pela perda de estabilidade do conjunto composto por mais de um elemento estrutural.

O modo distorcional ocorre geralmente em perfis com comprimento intermediário entre os que sofrem flambagem local e global. Também na flambagem distorcional a estrutura apresenta uma reserva de resistência que permite definir a resistência da estrutura pós-flambagem. Na figura Figura 2.6 se apresentam exemplos de configurações de flambagem distorcional.

Além dos diferentes modos de flambagem, é importante destacar que é possível haver interação entre os modos de flambagem local e global num mesmo perfil.

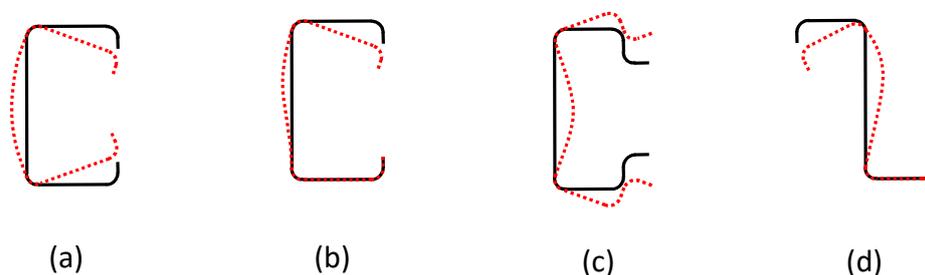


Figura 2.6 - Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal para alguns perfis convencionais. (Fonte: Grigoletti, 2008)

2.4 Método dos Elementos Finitos

Análises estruturais complexas podem se valer do método dos elementos finitos para sua resolução. Nesta seção explicam-se os passos para a solução de um problema utilizando o referido método, bem como demonstram-se características dos tipos de elementos empregados nas análises realizadas neste trabalho.

2.4.1 Aspectos Gerais

Equações diferenciais podem definir uma grande variedade de problemas físicos. Por exemplo, a equação de Poisson que governa deflexões de membrana, flexão de uma viga prismática, condução de calor e muitos outros problemas físicos.

Através da utilização do método de elementos finitos é possível obter, com certo grau de precisão, a solução para equações diferenciais complexas em determinados pontos selecionados no domínio de um sistema físico contínuo.

A principal função dos programas de elementos finitos é a redução de equações diferenciais para conjuntos de equações algébricas simultâneas, que então podem ser resolvidas por algoritmos computacionais. Estas soluções produzem os valores desconhecidos desejados, que podem ser deslocamentos e tensões de partes de uma estrutura, por exemplo.

Uma análise de elementos finitos pode ser dividida em três passos:

Passo 1 – Criação do modelo: a simulação em elementos finitos é feita através de um modelo, que representa geometricamente o problema a ser analisado. A estrutura deste modelo é dividida em elementos, que são contornados por pontos (nós), esta divisão em elementos chama-se discretização. Nesta etapa, determinam-se também as propriedades físicas do material, condições de fixação e carregamentos além das propriedades geométricas.

Passo 2 – Aplicação das equações: com o modelo concluído, o programa aplica as condições de contorno e as equações diferenciais parciais inerentes ao problema físico em questão. Neste processo, tem-se a minimização de um funcional (cálculo variacional) e aplicação da lei de conservação de energia. A maioria dos programas de elementos finitos para análise estrutural utiliza o princípio dos deslocamentos virtuais, para expressar as equações diferenciais de equilíbrio, em sua formulação integral equivalente.

Passo 3 – Resolução: com o modelo completamente definido, a principal fase da análise foi concluída. Os deslocamentos nodais são tratados como variáveis de uma função de interpolação, usualmente polinomial, que apresenta uma expressão analítica para o deslocamento em um ponto do elemento. Uma função polinomial (ou diferencial) deve ser formulada para cada um dos elementos do corpo. As equações polinomiais são então substituídas na formulação da equação diferencial parcial, resultando em um conjunto de equações algébricas simultâneas, as quais são resolvidas para obterem-se os valores nodais desconhecidos. Estes valores normalmente são deslocamentos os quais podem ser utilizados para calcular deformações e tensões em cada um dos elementos do modelo [Baran, 1988].

2.4.2 Métodos de Análise

Ao resolver um problema linear estático com elementos finitos, a equação obtida em forma matricial se pode escrever como segue:

$$Ku = P \quad (2.2)$$

Onde:

K =Matriz de rigidez, que é independente do nível de carga aplicada;

u = Vetor de deslocamentos nodais;

P = Vetor de cargas;

Em casos onde é necessário incluir o comportamento não linear físico e geométrico da estrutura em análise, tem-se variações na equação acima:

$$K_{NL}(P)u = P \quad (2.3)$$

Neste caso, a matriz de rigidez possui uma relação não linear com o nível de carga aplicado. Assim, não é possível obter o vetor de deslocamentos u , de forma que são necessários métodos iterativos para tal, entre eles pode-se citar o método de Newton-Raphson que é geralmente empregado quando a relação $P \times u$ é monotonicamente crescente [Chen e Han, 1988].

Para o caso de estar-se buscando estudar a relação entre o carregamento e o deslocamento ($P \times u$) após atingir um valor máximo de carga, é necessário empregar outros métodos, entre eles se destaca o Método de Comprimento do Arco (Arc-Length). Este método para análise estrutural foi originalmente desenvolvido por Riks (1972, 1979) e Wempner (1971) apud Rescke (2013) e mais tarde modificado por vários estudiosos.

Tem-se também casos aonde há apenas não linearidade geométrica, embora a estrutura não tenha sofrido grandes deformações, mas se instabiliza para um valor de carga P , ou seja, sofre flambagem, neste caso pode-se utilizar um método alternativo que permite alcançar uma solução simplificada, na qual a matriz de rigidez não linear possui através de equações não lineares transcendentais a influência de P sendo desenvolvida em séries de Taylor. Aonde apenas permanece o termo constante e linear em P , sendo desta forma possível reescrever a equação (2.2) como segue:

$$(K + K_g \alpha)u = P \quad (2.4)$$

Onde:

K_g = Matriz de rigidez geométrica.

É possível determinar o valor do escalar α que produz a singularidade do sistema de equações. A carga crítica será o vetor P escalado pelo valor dos autovalores. Determinado o valor de α (menor autovalor) será possível determinar o autovetor associado a este autovalor que fisicamente permitirá determinar a forma modal que determinará como a estrutura se instabiliza.

Esta forma de calcular a carga crítica em estruturas elásticas é válida se a estrutura sai para o desequilíbrio a partir da configuração indeformada. No caso de acontecer o desequilíbrio após acontecer grandes deformações ou grandes deslocamentos, então se deve calcular a carga crítica utilizando algum método iterativo, que resolva o problema não linear.

Para o caso de uma análise não linear, pode-se trabalhar aplicando o carregamento em forma incremental, e dentro de cada incremento de carga realizar um processo iterativo. Desta forma, as propriedades físicas são atualizadas a cada incremento de carga, bem como a posição de aplicação das cargas e os esforços atuantes na medida em que a configuração

geométrica vai alterando-se. O sistema de elementos finitos ANSYS® permite realizar este tipo de estudo. Os resultados que são obtidos se apresentam através de um mapeamento de resultados: deslocamentos, deformações e tensões em toda a estrutura analisada para os diferentes incrementos de cargas. Também é possível expor de forma gráfica a variação do valor de um destes resultados, como uma componente de deslocamentos, deformações ou tensões em uma determinada posição geométrica do modelo à medida que a carga vai sendo incrementada.

2.4.3 Elementos de Casca

Com a evolução dos métodos de elementos finitos, diversos tipos de elementos foram desenvolvidos, de forma a atender as diferentes teorias existentes, como barras, vigas, placas e sólidos.

Neste trabalho, foram utilizados elementos de cascas. As teorias referentes a estes elementos são explicadas abaixo, e o elemento específico utilizado será descrito na seção de validação do método.

Elementos dos tipos placas e cascas são sólidos tridimensionais, caracterizados por possuírem uma dimensão muito menor que as demais (sua espessura). Existem diversas teorias de placas, com destaque para a de Kirchhoff e a teoria de Mindlin-Reissner. [Baran, 1988]:

Dentre as possibilidades de elementos deste tipo, o adotado neste trabalho denomina-se SHELL281®, presente no software ANSYS®, trata-se de um elemento estrutural de 8 nós capaz de simular as condições de flambagem ao qual imagina-se que a estrutura esteja submetida. Este elemento trabalha com a teoria de Mindlin-Reissner que será explicada em seguida:

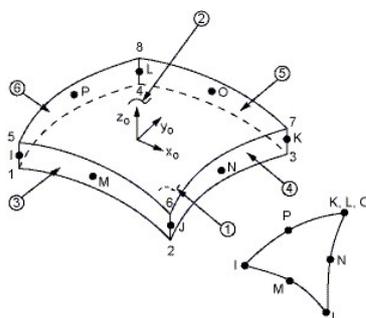


Figura 2.7 - Elemento utilizado (fonte: Ansys, 2007)

Hipóteses de Kirchhoff: basicamente podem ser aplicadas para placas finas, com isotropia total e submetidas a ações normais ao plano médio, ou seja, placas com espessura

suficientemente pequena, de forma a poder-se desconsiderar as deformações ocorridas nesta dimensão, além disto, estas hipóteses são:

- a superfície média da placa é plana e indeformável, ou seja, considera-se que a placa é fina ao ponto de poder ser considerada apenas por seu plano médio, ficando sua espessura inalterada mesmo durante a deformação da placa;

- ao imaginar-se uma linha perpendicular à seção média da placa, admite-se que esta linha continua perpendicular mesmo após a deformação;

- a tensão na direção normal ao plano médio da placa é irrelevante quando comparada com suas tensões na direção do plano.

Esta teoria ignora as deformações de cisalhamento, e conseqüentemente só aplica-se a placas finas, em que a relação entre a menor dimensão da placa e a espessura seja no mínimo 10 vezes.

Teoria de Mindlin-Reissner: de forma a complementar a lacuna deixada pela teoria de Kirchhoff, tem-se a Teoria de Mindlin-Reissner, que surge em consequência da existência de placas que não podem ser consideradas finas para as quais os efeitos das tensões cortantes transversais podem ser significativos, uma vez que para este tipo de placas as hipóteses de Kirchhoff deixam de ser admissíveis.

As hipóteses de Mindlin-Reissner que são consideradas válidas para placas espessas e moderadamente espessas, utilizadas para efeitos de representação do campo de deslocamentos e das tensões em placas com isotropia total, submetidas a tensões normais ao plano médio, são:

a) superfície média é plana e indeformável.

b) ao imaginar-se uma linha inicialmente perpendicular ao plano médio da placa, admite-se que não necessariamente esta linha permanecerá perpendicular a este após a deformação.

c) a tensão na direção normal ao plano médio da placa é irrelevante quando comparada com suas tensões na direção do plano.

d) as deformações de cisalhamento nesta teoria são consideradas constantes ao longo da espessura da placa e são diferentes de zero, contrariamente ao que acontecia na Teoria de Kirchhoff.

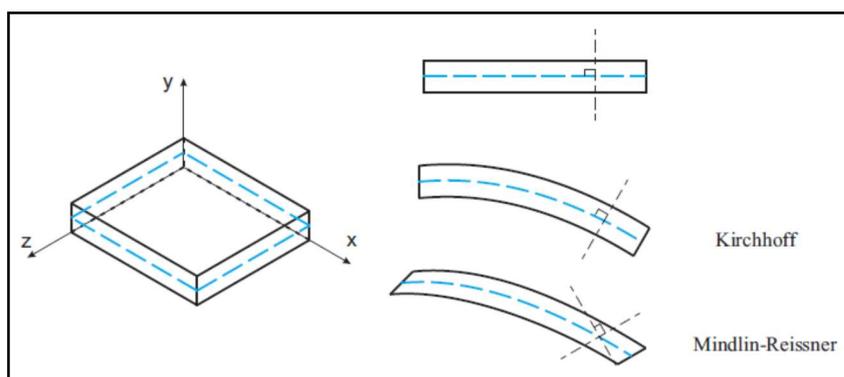


Figura 2.8 - Teorias de Kirchhoff e Mindlin-Reissner

Neste trabalho o método dos elementos finitos será utilizado para a realização de análise elástica linear, análises de autovalores para a determinação de forças elásticas de flambagem, além da realização da estimativa de carga de colapso considerando nos modelos não linearidade física (do material) e geométrica [Timoshenko, 1961].

2.5 Imperfeições geométricas

De acordo com Chodraui (2006), as imperfeições geométricas, assim como as tensões residuais, são normalmente oriundas do processo de fabricação dos perfis. Desta forma, trabalhar com a hipótese de chapas retilíneas e perfis perfeitamente retos ao longo do seu eixo afastam os problemas simulados da realidade.

Assim, pode-se dizer que existe então um acréscimo gradual no esforço de flexão quando existem imperfeições no perfil e/ou excentricidade na aplicação da força de compressão, o que pode ser melhor entendido pela análise de equilíbrio de uma barra bi apoiada na posição deslocada ilustrada na figura Figura 2.9.

Em 1807 Young propôs uma função senoidal para representar a imperfeição inicial global de perfis deste tipo submetidos a esforços de compressão, que trata-se de uma aproximação, porém aceitável em muitos casos. Vale lembrar que esta função aproximada destina-se a representar a imperfeição global do eixo do perfil, não abordando as imperfeições localizadas dos elementos/chapas que compõem o perfil, e que, se representadas, aumentariam drasticamente a complexidade da simulação, porém sem trazer benefícios equivalentes em termos de resultados mais realísticos.

Como prova da utilidade e importância da aproximação proposta por Young, ela foi utilizada para prever as imperfeições geométricas das barras que serviram como base para as curvas de resistência americanas e europeias (SSRC e ECCS, respectivamente).

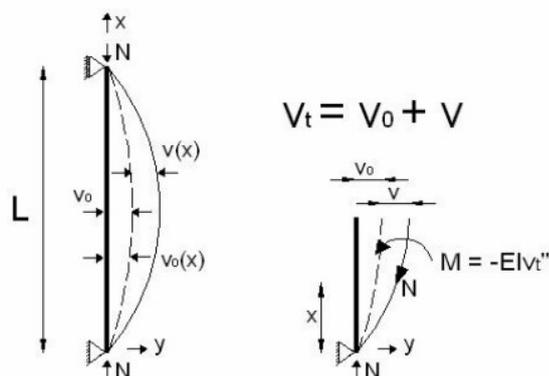


Figura 2.9 - Barra com imperfeição geométrica aplicada via aproximação de Young

As curvas americanas (Structural Stability Research Council) e europeias (European Convention for Constructional Steelwork), elaboradas para perfis laminados e soldados, adotam para representar a imperfeição inicial da barra o termo w_0 como uma senóide com o valor de $w_0 = L / 1000$ para amplitude no meio do comprimento da barra, como resultado da média estatística das imperfeições para barras de aço submetidas à compressão, o que é conservador, sendo que também pode ser utilizado $w_0 = L / 1500$, sugerido por Bjorhovde, (1972), e adotado nas curvas 1P, 2P e 3P do SSRC. Vale ressaltar que estes valores foram idealizados para considerar também outras excentricidades. Como, por exemplo, as oriundas da aplicação do carregamento.

Como a simulação de elementos finitos trabalha com a geometria conforme inserido pelo usuário, a mesma não apresenta, a priori, estas imperfeições. Sendo assim, a utilização das aproximações sugeridas por Young é de grande valia.

Nas simulações realizadas foram incorporadas excentricidades como o primeiro modo de flambagem da estrutura multiplicado por um fator que escala o campo de imperfeições. Outros autores, tais como Chodraui (2006) e Grigoletti (2008), empregaram esta metodologia com sucesso.

No próximo capítulo se apresenta a contextualização do presente trabalho, onde define-se a região de atuação das embarcações avaliadas.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO: A Bacia do Sudeste

Na sequência realiza-se uma descrição das características da Bacia do Sudeste, que servirá de suporte para as análises das aplicações realizadas ao final deste documento.

Conforme descrito na introdução, a Bacia do Sudeste é composta por lagoas, rios e canais, sendo um meio importante de escoamento da produção do Estado, bem como de entrada de insumos necessários à indústria e comércio locais.

3.1 Cargas transportadas

No relatório Técnico Bacia Sul (2013) da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), a tabela 3.1 mostra a distribuição das cargas transportadas na hidrovia via navegação interior no ano de 2011. É importante lembrar que a bacia também movimentava grande volume de cargas no porto de Rio Grande, porém sua movimentação até este local (ou a partir dele) é feita via modal rodoviário, não utilizando a navegação interior.

Tabela 3.1 - Cargas transportadas (Fonte: R. T. Bacia Sul, 2013)

GRUPO DE MERCADORIA	TONELADAS TRANSPORTADAS [Milhares de Toneladas]	SHARE [%]
SOJA	372.00	15.10
CELULOSE	335.00	13.60
FARELO DE SOJA	309.00	12.50
CARVÃO MINERAL	295.00	12.00
COMBUSTÍVEIS E ÓLEOS MINERAIS	281.00	11.40
MADEIRA	264.00	10.70
FERTILIZANTES	169.00	6.80
INDÚSTRIA MOAGEIRA	147.00	6.00
GORDURA E ÓLEOS VEGETAIS	95.00	3.90
ENXOFRE, TERRAS E PEDRAS	85.00	3.50
MALTE E CEVADA	24.00	1.00
OUTROS	89.00	3.60

É possível perceber grandes quantidades de granéis sólidos, como a soja e o carvão mineral, além de cargas unitizadas como a celulose. Percebe-se também baixíssima presença de contêineres estando inclusos na categoria outros, que por sua vez se concentram no porto de Rio Grande, e, como dito acima são distribuídos via modal rodoviário.

Entendendo que o modal hidroviário apresenta o menor custo por tonelada transportada, pode-se compreender o pequeno valor agregado das cargas, uma vez que custo do frete torna-se importante para cargas deste tipo, quando possível prefere-se abrir mão da agilidade de outro modal em favor de um custo de frete reduzido.

3.2 Portos e terminais

Para a movimentação deste volume de cargas, a infraestrutura da bacia dispõe atualmente de:

- 4 portos: Pelotas, Rio Grande, Estrela e Porto Alegre.
- 15 terminais de uso privativo (TUPs): Na Tabela 3.2 tem-se a relação destes portos e terminais de acordo com a via navegável, conforme o relatório técnico citado acima.

Tabela 3.2 – Infraestrutura Portuária (Fonte: R. T. Bacia Sul, 2013)

VIA NAVEGÁVEL	INSTALAÇÃO PORTUÁRIA
RIO JACUÍ	TUP COPELMINI
	PORTO DE ESTRELA
	TUP MISTA
	TUP MOINHO TAQUARIENSE
RIO DOS SINOS	TUP RIO DOS SINOS
RIO GRAVATAÍ	TUP NITERÓI
	TUP OLEOPLAN
	TUP SHV
	TUP TERGASUL
LAGO GUAÍBA	PORTO DE PORTO ALEGRE
	TUP CMPC GUAÍBA
LAGOA DOS PATOS	PORTO DE RIO GRANDE
	TUP BIANCHINI
	TUP CEVAL
	TUP TERMINAL LUIZ FOGLIATTO
CANAL DE SÃO GONÇALO	TUP YARA BRASIL
	PORTO DE PELOTAS
CANAL TERMINAL SANTA CLARA	TUP CIMBAGÉ
	TUP SANTA CLARA

3.3 Embarcações

Tomando por base dados de 2011 dos operadores da hidrovia, existem atualmente 3 grandes operadores presentes nesta bacia, que possuem embarcações autopropulsadas e também comboios. Eles possuem ao todo 24 embarcações para cargas sólidas em condições de operar. Algumas operando ininterruptamente, outras sendo específicas para alguns tipos de produtos, ficando inoperantes em parte do ano e, ainda, tem-se embarcações sem contratos atualmente, ficando então paradas em portos a espera de contratos, isto sem contar as embarcações para transporte de líquidos e gases, não contabilizadas neste levantamento em questão.

Autopropulsados

Embarcações autopropulsadas são compostas de um único corpo, que contempla a parte de propulsão, governo e área de carga em um mesmo bloco. Foram os primeiros tipos de embarcação de carga existentes e ainda hoje são muito utilizados, principalmente para condições de navegação mais severas, como é o caso de mar aberto e da Lagoa dos Patos.



Figura 3.1 - Embarcação Autopropulsada (Fonte: Navegação Aliança-Trevisa)

Comboios

Conforme dito anteriormente, a bacia possui algumas peculiaridades que não permitem que qualquer configuração de embarcação opere. Desta forma, os tipos de comboios presentes são de no máximo 1 barcaça para 1 empurrador.

Sistemas com comboios são eficientes em situações onde tem-se uma relação próxima entre o tempo nos portos e o tempo de navegação, ou seja, quando tem-se regimes de trabalho com viagens mais curtas, como é o caso da navegação interior, os comboios tornam-se uma alternativa interessante. Sistemas com comboios formados por diversas barcaças e 1 empurrador são mais eficientes; no entanto, mesmo sistemas 1 + 1 como os existentes na Bacia do Sudeste são atrativos, uma vez que é possível deixar a barcaça em processo de carregamento ou descarregamento e liberar o empurrador para navegar com outra barcaça.



Figura 3.2 - Sistema Empurrador Barcaça (Fonte: Navegação Guarita)

Dados da frota

De forma a demonstrar a capacidade logística da bacia, pode-se citar alguns dados das embarcações existentes. Por motivos de confidencialidade, os nomes das embarcações foram suprimidos, porém esta informação não é relevante neste caso. A Tabela 3.3 mostra algumas dimensões destas embarcações como o comprimento e a boca (que é basicamente a largura da embarcação), sua velocidade de operação, o número de tripulantes, seu porte bruto (sua capacidade de carga), o tempo médio de viagem e o ano de construção. Algumas informações não foram disponibilizadas por completo, de forma que a tabela está incompleta.

Tabela 3.3 – Dados Frota Sólidos (Fonte: Operadores Hidrovia, 2011)

# EMBARCAÇÃO	BOCA [m]	COMPRIMENTO [m]	VELOCIDADE [nós]	TRIPULANTES [n]	PORTE BRUTO [ton]	TEMPO MÉDIO VIAGEM [h]	ANO CONSTRUÇÃO [nn]
1	15,5	103	9	7	4700	16,7	2010
2	16,2	110	10	7	5400	15,0	2005
3	15,5	95	8	7	4300	18,8	1990
4	15,5	95	8	7	4300	18,8	1989
5	15,5	91	8	7	3300	18,8	1986
6	15,5	91	8	7	3300	18,8	1982
7	12,5	110	10	7	3700	18,8	1982
8	12,5	108	10	7	3700	15,0	1950
9	12,5	108	10	7	3500	15,0	1950
10	12,5	101	10	7	3400	15,0	1950
11	12,5	101	8	8	3200	15,0	1984
12	12,5	86	8	7	2900	18,8	1968
13	11,7	59	-	-	1400	18,8	1974
14	14,5	84	5	9	2700	25,0	2002
15	14,5	85	5	9	2800	30,0	1974
16	14,5	85	5	9	2800	30,0	1976
17	11,4	79	-	-	2000	30,0	1975
18	11,4	79	-	-	2000	-	-
19	11,4	79	-	-	1900	-	-
20	15,5	92	-	-	5900	-	-
21	15,5	92	-	-	5900	25,0	1981
22	15,5	92	-	-	5900	25,0	1981
23	15,5	92	-	-	5900	25,0	1981
24	11	40	6	-	-	25,0	1981

É possível perceber certo nível de padronização entre algumas embarcações, com casos de mesmo comprimento, boca e porte bruto, tratando-se de embarcações da mesma “série”. Pode-se entender isto como uma tentativa de padronização da frota.

No entanto, ao lembrar que todas estas embarcações navegam na mesma hidrovia, seria interessante que todas possuíssem dimensões próximas, de forma a otimizar sua carga útil. Isto não ocorre por diversas razões, como o fato de cada embarcação ser concebida focando exclusivamente na demanda particular a qual a mesma irá atender (“se precisa-se de somente 3300 toneladas de porte bruto, porque se fazer uma embarcação de 4300?”), ou ainda a evolução da hidrovia, permitindo embarcações de maiores dimensões (pode-se verificar a inexistência de embarcações com boca de 15,5 metros antes de 1981).

Neste sentido, pode-se inferir que a principal razão para não se observar uma maior padronização da frota está na falta de interesse de todos os envolvidos em entender a hidrovia, os terminais e as embarcações como um sistema único. Aonde a cooperação de todos os lados traria benefícios a todos.

De forma a tornar isto mais claro, Salles (2009) cita a bacia do Mississipi nos Estados Unidos, aonde os projetos das barcas são de gaveta, ou seja, não é uma demanda específica que determina a embarcação a ser construída, e sim, a demanda que busca ajustar-se a algumas opções de embarcações já pré-definidas. Todas estas embarcações já estão otimizadas para a hidrovia, atendendo aos requisitos de navegação exigidos, possuindo as máximas dimensões possíveis de modo a transpor eclusas sem dificuldades, possuindo projetos já aprovados pelas sociedades classificadoras, etc.

Ainda, uma vez que se tem modelos definidos de embarcações, os terminais e portos já são projetados para atender a estes tipos de embarcações, novamente tem-se uma otimização dos espaços e operações, com atracadouros de tamanhos adequados, equipamentos para movimentação da carga dimensionados adequadamente e ainda, equipes treinadas para os mesmos tipos de equipamentos, permitindo uma rápida reposição no caso de uma falta de profissional ou até mesmo de uma aposentadoria.

Outro ponto que pode ser percebido na Tabela 3.3 é a duração das viagens, enquanto tem-se viagens de semanas no caso de embarcações transoceânicas, aqui tem-se viagens de alguns dias. Esta pequena duração somada às operações de carga e descarga que duram no mínimo 12 horas, podendo chegar a 36 horas no caso de necessidade de aguardar a liberação de um terminal para utilização, mostra um potencial para a utilização do modelo empurrador barcaça. Infelizmente, este não é o modelo predominante na bacia, novamente devido à falta

de visão dos envolvidos em um sistema integrado, com terminais adequados a utilização de barcaças e não a embarcações autopropulsadas.

Após a contextualização realizada neste capítulo, no capítulo 4 a seguir, se realiza uma revisão bibliográfica, que trata da padronização tanto na indústria em termos gerais, como no setor naval em particular.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: Estado da arte da padronização na indústria naval

Neste capítulo apresentam-se diversos aspectos sobre a padronização na indústria naval, e no apêndice A fala-se sobre a padronização na indústria em geral.

4.1 Padronização na indústria naval

Independente do setor, qualquer indústria enfrenta escassez de recursos, e na indústria naval isto não é diferente, Tedesco,(1994) mostra isto utilizando o exemplo da marinha americana, que enfrenta uma situação desfavorável através da diminuição crescente dos recursos repassados pelo governo, além de um aumento dos custos para aquisição de componentes e equipamentos ao longo dos anos. Na figura Figura 4.1 abaixo é possível verificar o aumento no custo de produção de embarcações militares, onde cada embarcação é representada por um código na imagem.

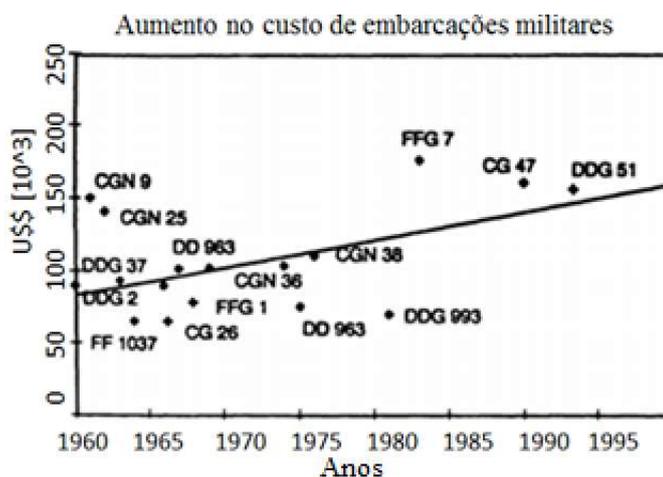


Figura 4.1 - Aumento no custo de navios militares, os códigos indicam diferentes embarcações (Tedesco, M. 1994)

A crise existente no setor atinge também a indústria naval civil americana, que sofre com a competitividade apresentada pelos países asiáticos. Prova disto é a figura Figura 4.2 que apresenta o decréscimo no número de estaleiros (em unidades básicas) e empregados (em milhares) desta indústria.

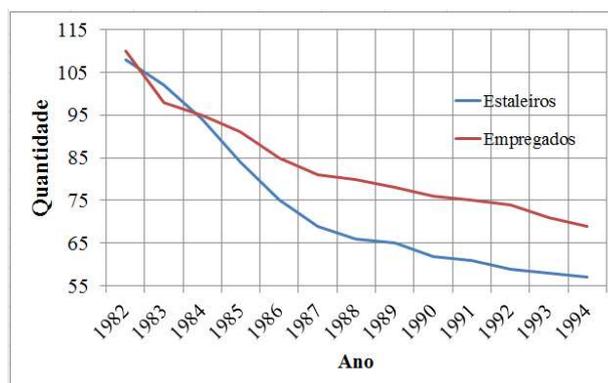


Figura 4.2 - Crise na indústria naval civil americana (Tedesco, M. 1994) – Curva referente aos empregados em milhares

Muito antes desta crise, a marinha americana cria o ato de catalogação e padronização (1952) buscando reduzir custos, este ato estabelece diretrizes para orientar as aquisições das forças armadas americanas, que são: selecionar preferencialmente itens já em uso nas forças armadas em detrimento de novos itens, reduzir sistematicamente o inventário, minimizando as entradas de novos itens e reduzindo o número dos existentes e fortalecer a indústria naval nacional, buscando utilizar itens produzidos por ela e encorajando-a a continuar no mercado.

Em Tedesco (1994) encontra-se a definição do Departamento de Defesa Americano (Department of Defense) para a padronização: “O processo pelo qual o DOD alcança a maior cooperação entre agências e serviços, pelo uso mais eficiente de pesquisa, desenvolvimento e produção de recursos e de acordo com a base mais ampla possível de utilização de quaisquer itens em comum”.

Assim, o departamento de defesa americano (DOD) vê na padronização uma possibilidade de contornar os desafios econômicos e operacionais existentes, avaliando como importantes os seguintes benefícios da padronização: redução dos custos de aquisição, redução de custos de ciclo de vida, redução do tempo de entrega e promoção do crescimento da indústria naval americana.

4.1.1 Benefícios da padronização na indústria naval

Conforme descrito em Campos (2004) e Ishikawa (1985), não há dúvidas da eficiência da padronização na indústria em geral, pode-se citar exemplos de sucesso na automobilística, na de eletrônicos e na aeroespacial. Especificamente na indústria naval, tem-se bons exemplos em países asiáticos como a Coreia do Sul, o Japão além dos Estados Unidos.

Em Tedesco (1994) cita-se o Japão, onde a padronização trouxe enormes benefícios para esta indústria. Uma prática que tornou-se comum entre os estaleiros do país é possuírem arquivos com as informações de mais de um fornecedor pré-aprovado para cada tipo de equipamento. Estas informações são atualizadas sempre que necessário, desta forma, os estaleiros evitam uma possível prejudicial dependência de um único fornecedor. Em paralelo, consegue-se evoluir as embarcações sem perder a padronização, pois ao surgir uma evolução de um equipamento, ela é pensada de forma a ser adaptada no local da versão anterior com a menor quantidade possível de alterações. Assim, estes fornecedores tornam-se parceiros de qualidade, ou seja, além de receberem informações, os estaleiros também fornecem informações, como as dimensões dos componentes e requerimentos de performance, estabelecendo uma relação de cooperação entre as partes envolvidas.

Nos Estados Unidos, a marinha sempre procurou trabalhar na redução de peso de suas embarcações, o que traz uma melhor performance, além de reduzir custos com combustível e liberar mais peso para carga de munição; no entanto, muitas vezes as ações necessárias para tal redução acabam por custar mais caro do que o seu benefício, principalmente devido às adaptações e erros cometidos e percebidos posteriormente.

No estudo feito por Kriezis (1990) apud Tedesco (1994) tem-se um comparativo entre uma abordagem para redução de peso, e outra para redução de custo para um cargueiro de grande escala, chegando a uma economia de U\$ 8614 por metro de corpo paralelo, enquanto perdeu-se U\$ 2555 por metro de corpo paralelo em termos de capacidade de carga, boa parte dessa economia se dá com a padronização.

Baseados nos benefícios existentes na indústria em geral, pode-se destacar alguns que se aplicam diretamente à indústria naval, dividindo-os por área:

Engenharia: redução no tempo de desenvolvimento de produtos, possibilidade de supervisão em níveis inferiores (sem utilização direta de supervisores), aumento da intercambialidade de peças e equipamentos, aumento da velocidade na elaboração de soluções, maior exatidão e facilidade na previsão de custos, aumento de tempo livre disponível para dedicação a aplicações especiais.

Controle de qualidade: simplificação do controle de qualidade pela utilização de itens com características e especificações já testadas e conhecidas, redução no tempo e quantidade de treinamento para novos colaboradores, diminuição do risco de erros de comunicação com fornecedores, controle do produto final otimizado, redução e simplificação das inspeções.

Manutenção: redução do tempo das manutenções preventivas, facilitando seu agendamento e sua execução através da diminuição de imprevistos, redução nas manutenções corretivas, tanto no tempo quanto na quantidade, redução no número de reparos específicos devido à redução de itens específicos, redução no tempo de treinamento de novos profissionais de manutenção.

Construção: devido às curvas de aprendizagem, tem-se um aumento na qualidade dos serviços prestados, bem como a redução no tempo necessário para cada etapa.

Projeto: maior precisão no dimensionamento dos recursos e tempos necessários para cada etapa, através da análise das partes padronizadas que já foram utilizadas em projetos anteriores.

4.1.2 Movimentos de padronização na Indústria Naval

Tedesco (1994) cita critérios e técnicas de padronização para o setor naval, que são listadas abaixo.

Técnicas de padronização: critérios para escolha de candidatos

Como dito anteriormente, a primeira (e talvez mais difícil) etapa da padronização é definir quais itens trarão maior retorno quando padronizados. Para elucidar esta questão elaborou-se um modelo para identificar os candidatos mais oportunos a serem padronizados dividido em 3 fases principais.

Nomeação dos equipamentos: trata-se de uma grande catalogação do universo onde pretende-se elaborar a padronização. Além de um levantamento dos itens, são verificadas características como população e suas características principais, para então procurar soluções semelhantes que possam ser aplicadas.

Análise econômica: novas informações são levantadas, acerca dos custos de manutenção e logística dos itens, determinando assim o potencial econômico da padronização.

Seleção de design: uma vez que a viabilidade econômica já foi definida, deve-se então verificar a viabilidade técnica. Nesta fase são analisados os desenhos e parâmetros técnicos existentes, para então determinar as mudanças no design para adaptação necessária a padronização e assim gera-se o novo design.

De forma a operacionalizar as etapas acima, alguns critérios são utilizados para avaliar o potencial econômico e operacional da padronização de um item, com um modelo capaz de elencar os candidatos à padronização e verificar o potencial de cada um para depois escolher quais serão padronizados primeiro. Estes critérios são explicados a seguir.

Redundância: basicamente, trata-se do nível de itens semelhantes que executem funções similares. Para tal, é importante caracterizá-los pelas suas funcionalidades e o valor das mesmas (como pressão de trabalho e bitola no caso de uma bomba, por exemplo), após isto, deve-se tentar mapear onde estas funções são necessárias e se seria possível utilizar um item existente que atenda a todas ou ao menos algumas destas funções, ou ainda, se seria possível criar um item capaz de fazê-lo.

Proliferação de APLs: item que indica a falta de padronização, a proliferação de aplicações (APLs) deve ser evitada ao máximo, uma vez que cada aplicação significa um item em específico e ainda pode indicar que determinado equipamento possui uma taxa de obsolescência muito alta ou que existe alguma outra característica envolvida que precisa ser estudada a fundo.

Dados de manutenção: os dados de manutenção são de grande importância, pois indicam peças com maiores ocorrências de manutenção, permitindo repensar as quantidades disponíveis no estoque de peças de reposição problemáticas. Além disto, estes dados motivam um estudo sobre as razões para esta frequência exagerada de reposições.

População: quando pensa-se em definir o potencial da padronização de um item, o número de vezes que o mesmo será utilizado é talvez o mais importante parâmetro, seja no mesmo navio, classe ou na frota inteira.

Obsolescência: alguns equipamentos, como por exemplo eletrônicos, costumam tornar-se obsoletos em pouco tempo. Dessa forma, esforços na padronização dos mesmos tornam-se inviáveis, visto que o tempo e capital necessário para uma repadronização no caso de uma evolução podem ser maiores do que uma simples substituição quando necessários. Neste estudo não tem-se dados sobre a frequência destas obsolescências, no entanto, é importante estudá-las para definir quais categorias não devem receber esforços de padronização.

Custos adaptativos: referem-se aos custos relativos à utilização de um equipamento no lugar de outro, sendo este segundo específico para tal função, é dividido em dois tipos: os custos devido à performance inferior, que é um risco existente quando ocorre a substituição de um item específico por um equivalente e os custos devido à adaptação, que tratam dos custos estruturais em adaptar um equipamento no lugar de outro, seja mão de obra, material ou outros.

Sobre estes custos, pode-se dizer que quanto mais rígida for a padronização, maiores eles serão, assim, podemos reforçar novamente o argumento que a padronização deve estar em mente não só entre navios existentes, mas também no design das novas embarcações.

Técnicas de padronização: agregação

A segunda etapa do método de padronização de Campos (2004), apresentado no Apêndice A deste trabalho pode ser aplicada na indústria naval através da técnica da agregação. Que consiste em encontrar pequenos padrões, ou seja, padrões que englobam poucas ocorrências, e aglutiná-los por semelhança a outros pequenos padrões, chegando a padrões maiores.

Uma utilização possível desta técnica é em relação às fixações dos equipamentos à estrutura do navio. Estas costumam ter cotas quase únicas para cada aplicação, no entanto, a diferença no posicionamento dos parafusos, e por extensão, dos furos nas chapas é muito pequena, ou seja, com um pequeno esforço seria possível ter-se posições para furos padronizadas, ao invés de ser necessário estudar cada aplicação de forma isolada.

Processos padrão (módulos)

Conforme descrito nas seções anteriores e no Apêndice A, a padronização é muito focada em processos; em se tratando da indústria naval, isto torna-se possível pela padronização dos estaleiros.

Para tal, primeiramente deve-se fazer um grande levantamento de todos os processos existentes. Após a identificação destes processos, é importante agrupar os itens que requerem processos similares, para que os mesmos sejam manejados mais adequadamente.

Um planejamento de produção padronizado leva à construção modular/por zonas, onde um módulo pode ser entendido como qualquer montagem estrutural feita diretamente na embarcação, dentro deste aceitam-se sub montagens, produtos inteiros e peças, uma forma de visualizar-se este sistema é o brinquedo Lego®, que é composto por pequenas partes que encaixam-se formando um grande módulo. O tamanho destes módulos depende do tamanho do estaleiro e de suas próprias características.

Apesar de padronizados, os módulos devem ser flexíveis de modo a permitir uma maior variedade de equipamentos que possam ser utilizados pelo navio, bem como prever a atualização da tecnologia. A ideia dos blocos não é fixar a função final do produto, mas sim facilitar um plano de produção eficiente baseado em funções do navio e características principais pré-estabelecidas.

A utilização de blocos permite que os operários executem as tarefas de um determinado módulo (como instalação elétrica ou hidráulica) com antecedência se comparados à construção tradicional, onde a estrutura de aço é montada quase que totalmente para depois partir-se para outros módulos, dessa forma, qualquer mudança necessária gerará retrabalho, isso se for possível executá-la. Ainda, este método garante maior facilidade de acesso a áreas que, caso fossem montadas diretamente no casco, estariam cobertas, necessitando o corte de chapas para seu acesso.

O fato dos blocos serem construídos e finalizados antes de sua montagem no casco garante que grande parte do navio esteja pronta na hora do lançamento, evitando trabalhos pós-lançamento, muito comuns em outros modelos de construção.

Assim que são montados no casco, os blocos perdem sua identidade, agrupando-se em zonas, ou seja, uma região com blocos semelhantes e com a mesma função.

Matriz de separação modular padrão

Para trabalhar utilizando o sistema de módulos citados na seção anterior, Wade (1986) representa na Tabela 4.1 através de vários X cada bloco de tarefas padrão, ou seja, um pacote que inclui listas de peças, desenhos de produção e cronogramas.

Tabela 4.1 - Matriz de separação modular padrão (Fonte: Wade,1986)

X	X	X	X	X	X	X	FABRICAÇÃO
X	X	X	X	X	X	X	SUBMONTAGENS
X	X	X	X	X	X	X	CONSTRUÇÃO
X	X	X	X	X	X	X	PRÉ-EDIFICAÇÃO
X	X	X	X	X	X	X	EDIFICAÇÃO
TANQUES	POPA	PROA	COSTADO	CONVÉS	FUNDO DUPLO	SUPERESTRUTURA	

Como pode-se ver, em um eixo tem-se as etapas da construção de uma embarcação, e em outro tem-se as regiões a serem construídas. Cada círculo representa um pacote de atividades, incluindo determinadas peças, desenhos e cronogramas conforme pode-se verificar a seguir:

Fabricação: aquisição e corte das chapas, tubos, cabos elétricos, fundição e escorvamento das peças aplicáveis.

Submontagem: fabricação dos painéis de maior espessura, como conveses e anteparas, pequenas montagens estruturais como braçolas e reforços, sub montagens de

encanamento, ventilação e elétrica necessários ao estágio de pré-forma, esta etapa pode incluir itens de trabalho quente, como o jateamento de escotilhas, portas e borboletas de passagens, além da pintura destes componentes.

Construção: incorporação das unidades tridimensionais, instalação de todo o trabalho quente criado até agora, jateamento e pintura do módulo.

Pré-edificação: instalação final de todos os itens prévios à edificação.

Edificação: Todas as atividades relacionadas à edificação estrutural do casco, englobando todas as tarefas que irão ocorrer durante a edificação estrutural, como a instalação dos tubos da popa e das peças necessárias para ligar o bloco à estrutura do navio.

Assim como os blocos, as zonas formadas pelos blocos podem ser construídas seguindo a mesma metodologia.

Cada um destes estágios difere dos demais por algumas atividades específicas, porém, após a definição das matrizes de blocos e zonas, é possível executar um trabalho de avaliação sobre as tarefas comuns existentes em diferentes estágios, agrupando-as, o que reduz tempo e custos de produção. Além disso, existem algumas tarefas que obrigatoriamente precisam ser feitas após outras, deve-se tentar reduzir esta necessidade, levando-se o máximo possível de atividades em paralelo.

Um procedimento ideal seria primeiramente identificar as tarefas da etapa de construção, após encontrar relações entre elas e então os trabalhos necessários para gerá-las (como pintar, cortar e afins). Com isto definido tem-se um bloco padrão de tarefas. Este procedimento pode ser repetido diversas vezes, gerando diversos blocos padrão.

Após pode-se verificar a correlação entre blocos ou zonas, com isso é possível estimar com mais precisão os custos e tempo de fabricação, pois se está descrevendo os blocos em termos dos trabalhos necessários em cada um deles, trabalhos estes fáceis de mensurar em termos de tempo e custo.

Padrões como referências: padrões de produção

Procedimentos padronizados são fáceis de medir e controlar, sendo úteis quando pensa-se em otimizá-los. Abaixo apresentam-se algumas definições utilizadas na padronização de processos na indústria naval.

Processo padrão: lista de procedimentos e instruções para executar uma tarefa.

Padrões de processo: os tempos necessários para executar os procedimentos do processo padrão.

Padrão de produção: é a aglutinação dos dois itens acima, não incluindo trabalhos não mensurados ou atrasos, seja no fornecimento como na própria execução da tarefa.

Padrões de programação: estimam a hora homem (HH) para operações específicas, podendo incluir diversos padrões de produção bem como os tempos entre eles, são utilizados para planejar a alocação da força de trabalho existente e servem como dados de entrada para os padrões de planejamento.

Padrões de planejamento: servem para determinar o orçamento de cada tarefa e criar eventos chave durante a produção.

Padrões de custo: servem para estimar o custo de produção total baseado nos padrões anteriormente citados.

Progresso dentro da marinha americana

Tedesco (1994) afirma que a padronização pode ser tanto pró ativa quanto reativa, a primeira acontece quando se esta na fase de design do navio e a segunda, quando se quer padronizar pois foi detectada a necessidade de redução de custos, por exemplo.

Em navios, pode-se padronizar intranavio, através da aplicação múltipla do mesmo equipamento ou componente, ou ainda, pode-se levar esta padronização para uma classe inteira de navios e o mais difícil, para a frota inteira.

Padronização de frota e classe, padronização intranavio

Apesar de difícil, os benefícios da padronização de uma frota inteira são enormes, em termos de logística, servem para reduzir o número de peças de reposição necessárias, bem como reduzir o número de novos itens à serem incluídos.

Para chegar-se neste nível de padronização, é preciso desenvolver e fabricar seus próprios componentes, ou firmar uma parceria com um fornecedor, isto pode causar uma relação de dependência perigosa eliminando a concorrência e prejudicando o mercado.

Quando se fala de grandes empreendimentos, pode-se ter processos de compra parecidos com os existentes em órgãos públicos, de forma que muitas vezes fica difícil selecionar o fornecedor correto. Para garantir a melhor compra, deve-se delimitar os requisitos básicos para cada componente, e abrir as negociações para que os interessados possam participar.

Um erro grave existente nestes processos de avaliação e seleção de fornecedores é a visão míope dos gestores, que não conseguem ver outras variantes além do custo e das características do componente. Ao se avaliar somente estes aspectos, corre-se o risco de gerar

novos custos adaptativos e de logística, no caso de escolher-se um novo item em detrimento de compra de um item já cadastrado e adaptado à aplicação final.

Para evitar isto, é necessário estabelecer outros critérios de avaliação. Abaixo tem-se uma proposta utilizada pela marinha americana, que segue a seguinte ordem para a escolha dos componentes a serem adquiridos:

1 - Padrão de classe (componentes padronizados utilizados atualmente).

2- Componentes suportados (que podem ser utilizados com o mínimo de adaptações possíveis).

3- Componentes novos.

Quando existem justificativas suficientes, novos componentes são aceitos, do contrário, fica-se obsoleto em poucos anos. Assim, percebe-se que, em se tratando de grandes empreendimentos ou órgãos públicos, como a Marinha, a padronização enfrenta algumas dificuldades extras, como por exemplo a impossibilidade de fazer parcerias demasiado aprofundadas com fornecedores.

De forma menos ambiciosa que a padronização de classe, tem-se a padronização intranavio, onde busca-se a minimização da variedade de equipamentos e componentes instalados.

De forma a ilustrar a aplicação, Tedesco (1994) apud Dickenson (1993) cita do protótipo FFG-7 criado em 1973 aonde a Marinha utilizou uma estrutura de compra “custo mais taxa de incentivo” no seu desenvolvimento, sendo a primeira fragata com o desenvolvimento permeado pelo custo e não mais pela performance. Ao final, todos os sistemas de combate utilizaram itens padronizados já existentes no estoque e ainda 42 equipamentos importantes foram padrões para a classe inteira.

Para a construção da FFG-7 a Marinha fez especificações de equipamentos e do custo total, e coube ao estaleiro selecionado fazer a seleção dos fornecedores e fazer o planejamento da construção.

4.1.3 A padronização e sua relação com a modularização

A crescente demanda do mercado consumidor final em qualquer segmento é de produtos únicos e customizados. Isto pode parecer um grande problema e desafio para a padronização pois, ao contrário do início da revolução industrial, onde a produção em massa trabalhava dias gerando produtos exatamente iguais e de baixo custo, atualmente o consumidor exige um diferencial, algo que o identifique com o que está comprando. Sendo

assim, como aliar a redução de custo obtida pela padronização ao anseio por produtos personalizados por parte do mercado?

Volante (2012) cita como resposta a modularização em massa, ou seja, sob uma plataforma padronizada, são dadas diversas alternativas, com possibilidade de combiná-las de diversas formas diferentes, Estas alternativas possuem componentes padronizados, que são produzidos em série, como antigamente, que compõem conjuntos com alto nível de customização, gerando módulos intercambiáveis, esta modularização pode ser classificada conforme descrito abaixo:

Modularização por compartilhamento de componentes: trata-se da utilização de componentes comuns em diferentes equipamentos, com isso se pode reduzir os custos e aumentar a variedade de produtos finais, diminuindo o tempo de finalização de produção. Dumaine (1989) apud Tedesco (1994) cita um bom exemplo deste tipo de modularização na General Electric, que substituiu 28.000 peças específicas por 1275 partes compartilhadas em uma linha de 40.000 *circuit breakers* diferentes.

Modularização *cut to fit*: ocorre quando os componentes padronizados possuem variações pré-estabelecidas. Este tipo de modularização se aplica muito bem a construção naval, uma vez que cada navio apresenta certos pré-requisitos únicos, requisitos estes que podem ser alcançados com este nível de personalização.

Modularização tipo chassis: trata-se de criar plataformas capazes de receber diversos componentes diferentes com facilidade. Como exemplo cita-se as empresas do ramo automotivo, que na mesma plataforma produzem carros sedan, hatch, pick ups.

Modularização seccional: esta vai de encontro com a anterior, uma vez que ao invés de preocupar-se com uma plataforma onde os componentes possam ser montados, propõe-se a criar componentes que se encaixem entre si. Assim, pode-se ter navios que podem mudar suas dimensões sem perder performance, ou mesmo, podem ser retiradas seções danificadas sem grandes paradas, pois as seções remanescentes se encaixariam perfeitamente. Para tanto, é muito importante que a sociedade classificadora vigente já tenha pré-autorizado as possíveis mudanças.

Exemplo de modularização: Bethlehem Steel Corporation

Gallagher (1993), apresenta um exemplo bem sucedido de aplicação da modularização em embarcações: entre as décadas de 50 e 70, uma empresa do setor metalmeccânico chamada Bethlehem produziu navios tanque de diversas capacidades. Na década de 50, foram feitos 12 navios idênticos de 35.700 DWT para diferentes clientes. Apesar de apresentarem alguns

requisitos específicos de cada cliente, em termos práticos, tratava-se da mesma embarcação. Já na década de 60 a demanda do mercado era por embarcações com capacidade de 62.000 DWT, e procurando manter uma filosofia de padronização, a empresa optou por desenvolver estes navios sob o projeto dos anteriores. Obviamente algumas adequações importantes precisaram ocorrer, como um sistema de propulsão mais potente e o aumento no comprimento e profundidade do casco. No entanto, procurou-se manter o mesmo maquinário quando possível, bem como os mesmos fornecedores, e assim o *layout* geral manteve-se idêntico.

Após apenas três embarcações, nova demanda, agora a capacidade necessária era de 70.000 DWT, convencida dos benefícios da padronização, a empresa seguiu nesta linha, alterando somente a quantidade de tanques na meia nau. Alguns navios depois, 120.000 DWT, novamente, o projeto recebeu um sistema de propulsão mais potente (porém, na mesma casa de máquinas), um aumento no comprimento e largura do casco e, neste caso, uma nova proa.

No início dos anos 70, a Bethlehem já estava construindo navios de 265.000 DWT, sem grandes mudanças em relação ao projeto inicial, provando que a modularização seccional pode ser aplicada com sucesso na indústria naval.

Com a repetição do design, os custos de projeto mantiveram-se baixos, bem como os custos de produção, pela utilização dos mesmos componentes e processos. Relacionamentos duradouros com fornecedores garantiram custos de aquisição baixos e tempos de entrega reduzidos.

Níveis de padronização em embarcações

De forma a permitir diferentes níveis em termos de padronização, são sugeridos abaixo classificações que serão utilizadas no capítulo de aplicações, e que referem-se ao projeto e fabricação de componentes estruturais e decidirão os benefícios que serão aplicados para cada proposta gerada. Primeiramente tem-se os níveis de padronização intranavio e após, tem-se os níveis para a padronização da frota inteira.

Padronização intranavio total (T): neste caso, o dimensionamento é baseado na região aonde os esforços são maiores, após estende-se esta mesma configuração para todo o corpo paralelo, ou seja, para toda a região aonde seria possível replicar o mesmo projeto, esta configuração gerará uma estrutura com maior robustez e peso do que seria necessário nas regiões mais próximas das extremidades, mas trará maiores descontos em virtude dos valores dos itens de benefícios gerados.

Padronização intranavio intermediária (I): aqui são feitos três diferentes dimensionamentos, baseados em regiões macro que contemplem esforços similares, um dimensionamento para a região que recebe maiores esforços, um para a região intermediária e outro para a região aonde tem-se os menores esforços. Esta configuração gerará estruturas mais próximas dos limites de segurança sendo mais leves. No entanto, os benefícios da padronização serão inferiores.

Padronização intranavio nula (N): neste caso, são feitos dimensionamentos diferentes para cada uma das regiões da embarcação, gerando assim 5 diferentes configurações. Aqui tem-se estruturas ainda mais leves, porém sem os benefícios da padronização.

Padronização total de frota (Tf): na padronização total de frota tem-se somente um tipo de configuração, dimensionado pela região de maior esforço e aplicado em toda a extensão do corpo paralelo da embarcação, porém neste caso estende-se esta padronização para a frota inteira, de forma que os benefícios poderão sofrer alterações em seus valores.

Padronização intermediária de frota (If): segue os mesmos moldes da padronização intranavio intermediária, porém sendo estendida a frota inteira.

Padronização nula de frota (Nf): neste caso tem-se as mesmas três diferentes configurações da padronização intermediária, no entanto trabalha-se com a hipótese que cada embarcação da frota pertence a um projeto diferente, ou seja, são embarcações diferentes, que não se beneficiam de curvas de aprendizagem nem compartilham custos de classificação ou projeto.

4.2 Entrevistas com profissionais da área

De forma a enriquecer o trabalho, foram feitas entrevistas com dois profissionais com larga experiência no projeto, construção e operação de embarcações de navegação interior. Estas entrevistas eram voltadas ao tema padronização, no entanto, os entrevistados foram encorajados a falar sobre outros temas ligados à questão dos custos na área naval.

4.2.1 Engenheiro Naval Ivan Tomas Erdos

O engenheiro naval Ivan Tomas Erdos possui mais de 50 anos de experiência no projeto de embarcações, sendo responsável pelo projeto de importante percentual das embarcações que navegam atualmente na bacia citada neste trabalho.

Suas qualificações na área naval mostram a relevância de suas opiniões para o tema deste trabalho, e suas opiniões são expressas na transcrição feita abaixo de uma entrevista feita com este profissional durante a execução deste trabalho.

- A padronização é levada em conta nos projetos de embarcações interiores de nossa bacia?

“Muito pouco, uma vez que tem-se uma pequena demanda por novas embarcações, o que não motiva a criação de uma série de embarcações padronizadas. Além disto, cada contratante possui uma aplicação diferente para sua embarcação, e tenta extrair o máximo possível da mesma. Com isso, benefícios provenientes da padronização de embarcações são substituídos por projetos extremamente específicos, que tornem a embarcação em questão tão otimizada quanto possível. O embarcador raramente valoriza os aspectos relativos a manutenção quando contrata o projeto, e é neste ponto que tem-se grandes benefícios na padronização.”

- O senhor vê benefícios na padronização? Quais?

“Vejo alguns aspectos onde a padronização pode ser útil, primeiramente em termos do projeto, onde ao repetirmos o projeto, conseguimos reduzir não somente o custo deste, mas também da fabricação (curvas de aprendizagem, menor incidência de erros, etc.), e principalmente, conseguimos facilitar muito a reposição de componentes.”

“Estes são os benefícios para as embarcações, no entanto, tem-se também um grande benefício em relação à hidrovia ao termos embarcações padronizadas: podemos padronizar a infraestrutura da hidrovia, me refiro aqui a eclusas e terminais por exemplo”.

- Já houveram tentativas de padronização da bacia?

“Sim, eu particularmente cheguei a projetar uma embarcação modular, aonde com a troca de alguns módulos, seria possível alterarmos as capacidades da embarcação, e até o tipo de carga que a mesma transportava. Infelizmente o projeto não foi bem aceito pelas empresas que contratam projetos de embarcações.”

- Além da padronização entre embarcações, tem-se também a possibilidade de padronizar internamente as embarcações, o senhor busca isto em seus projetos?

“Ao contrário de bacias como a do Mississipi, onde tem-se uma grande variedade de bitolas de chapas e perfis, tem-se aqui somente quatro espessuras de chapa por exemplo, ou seja, fica muito difícil padronizar um projeto. Sobre equalizarmos bitolas de perfis, geralmente isto não é feito pois causaria um aumento no peso morto da embarcação, que significa menos carga útil. Fora isso, faz-se o possível para diminuir a variabilidade de componentes, mas de fato, o foco é sempre a performance e não a padronização”.

“Em relação á utilização de chapas mais grossas padronizadas, aonde teríamos um aumento de peso, porém um aumento na vida útil das embarcações (aumento da sobre

espessura de corrosão),tem-se hoje tratamentos de superfície eficientes que garantem excelente sobrevida as chapas. Estes tratamentos são considerados suficientes nesta questão, o que inviabiliza a proposta de chapas muito grossas.”

4.2.2 Engenheiro Naval Miguel Pires

O engenheiro Naval Miguel Pires possui grande experiência no gerenciamento de estaleiros, havendo trabalhando em diversos estaleiros em todo o país. Adquiriu grande conhecimento das dificuldades existentes na construção de embarcações, sendo capaz de trazer uma visão sistêmica dos estaleiros e de sua operação, sendo grande entusiasta da padronização e modularização da bacia do sudeste e de seus componentes.

Sua larga experiência e visão sobre o tema navegação interior enriquecem de forma importante o conteúdo desta dissertação.

- Os demais modais para transporte de cargas, como o ferroviário e o rodoviário, são amplamente padronizados, estando vinculados a tamanhos de containers e bitolas de trilhos por exemplo, por que o mesmo não acontece na hidrovía?

“Ao contrário dos demais modais, as embarcações de navegação interior são vistas como representantes de menor escala das embarcações de mar aberto, isto é um grande equívoco, pois à exceção do meio em que transitam, todas as demais características não são semelhantes. Enquanto no mar tem-se uma imensidão de rotas e possibilidades, na navegação interior tem-se rios, eclusas e pontes que delimitam o trajeto, exatamente como acontece com trens e caminhões. Esta visão errônea da navegação interior precisa ser desfeita, dissociando-a da navegação marítima. Ao conseguirmos mudar esta cultura, ficará mais fácil promover a padronização aqui.”

- Pode-se dizer então que é difícil promover a padronização em embarcações de mar aberto?

“Não exatamente, tem-se por exemplo a questão dos acessórios para as embarcações, estes são padronizados pela ABNT. Além disto, embarcações militares costumam ser amplamente padronizadas, isto ocorre pois estas são vistas como equipamentos e não como algo único e independente. Todos os equipamentos fazem parte de uma cadeia maior, aonde é possível verificar os benefícios da padronização.”

“A dificuldade em padronizar embarcações de mar aberto está no fato de termos uma infinidade de opções de rotas, de capacidades, de cargas, etc. Já na navegação interior, tem-se os limitadores que comentei acima, além de termos uma determinada variedade de cargas em cada bacia, que acabam por facilitar a padronização”.

- Tem-se cases de sucesso em relação à padronização de bacias ao redor do mundo? Porque nestes locais obteve-se êxito?

“Sem dúvida, podemos citar primeiramente a bacia do Mississipi nos Estados Unidos, aonde tem-se barcaças com projetos de prateleira, ou seja, não é o projeto que adequa-se à carga, e sim a carga que adequa-se ao projeto, ou melhor, à bacia, uma vez que a bacia toda e não somente a embarcação são padronizadas. Desde o início, a bacia foi vista como um sistema, e não como uma composição de diferentes elementos. Aqui no Brasil não houve esta preocupação no início.”

“Podemos citar outro case de sucesso: a bacia do rios Reno e Danúbio. Neste caso a bacia foi desenvolvendo-se separadamente por cada um dos países banhados pela mesma, até que por volta do ano 2000, 17 países desta região fizeram um grande esforço e iniciaram a padronização da hidrovia. Isto nos mostra que é possível atingirmos a padronização, mesmo que isto não tenha sido feito até agora.”

- O senhor é um grande entusiasta da padronização, quais os benefícios econômicos que o senhor vê com a padronização das hidrovias?

“Os benefícios são inúmeros, se pensarmos primeiramente na padronização das embarcações, tem-se as curvas de aprendizado, que possibilitam redução do tempo de execução das etapas de construção da embarcação e reduzem a incidência de erros nestas etapas. Tem-se também o poder de barganha proveniente da compra de maiores quantidades do mesmo tipo de perfil ou chapa, em detrimento da compra de pequenas quantidades de diversos tipos.”

“Em termos de manutenção, tem-se a intercambialidade de componentes, o que permite a redução dos estoques para reposição, e garante maior agilidade durante as manutenções.”

“Pensando agora na bacia, tem-se a otimização nos treinamentos do pessoal, pois ao termos embarcações padronizadas, os profissionais treinados em uma destas embarcações ficam automaticamente habilitados a operar em todas. Tem-se também a otimização da infraestrutura, com eclusas, canais e pontes projetadas para uma embarcação padrão, com dimensões definidas, assim será possível termos embarcações adequadas para a hidrovia, respeitando as dimensões padronizadas e garantindo um melhor aproveitamento da hidrovia”.

A seguir se apresenta no capítulo 5 a metodologia utilizada para o ajuste da função custo.

5 METODOLOGIA: algoritmo SLAW[®]

Neste primeiro capítulo que trata das metodologias aplicadas à esta dissertação, apresenta-se a descrição do algoritmo SLAW[®], proposto por Mendez (2005). Este algoritmo permite ajustar utilizando métodos de regressão com funções potenciais.

5.1 Funcionamento do SLAW[®]

O SLAW[®] permite o ajuste de um determinado fenômeno caracterizado por um resultado que será chamado aqui de efeito e os parâmetros que caracterizam dito fenômeno. A informação obtida através de experimentos e/ou simulação (conjunto de efeitos e parâmetros associados) é processada pelo software que realizando uma regressão propõe uma expressão potencial como a apresentada na seção 2.1.3 que ajusta o efeito e seus parâmetros.

A informação básica a ser utilizada pelo programa para realizar o ajuste (conjunto de efeitos e parâmetros associados obtidos por ensaios e/ou simulação) é organizada em uma matriz como a apresentada na Tabela 5.1 chamada de matriz de sensibilidade da análise, que possui uma coluna com os efeitos obtidos chamado na tabela de F(A..D), nas demais colunas são colocados os parâmetros associados a dito efeito indicados aqui como A,B,C,D:

Tabela 5.1 - Matriz de sensibilidade da análise SLAW[®] (para um caso hipotético)

F(A..D)	A	B	C	D
53455.36	16	4	1	10
106910.72	16	4	2	10
160366.08	16	4	3	10
213821.44	16	4	4	10

De forma a permitir que o algoritmo possa verificar a relevância dos parâmetros, é importante que somente um parâmetro seja alterado por vez. No exemplo da Tabela 5.1 no conjunto de dados incorporados é alterado o parâmetro C mantendo A,B e D inalterados. No conjunto total de dados a ser incorporados, como informação básica todos os parâmetros devem ser alterados seguindo este padrão.

Outra informação a ser fornecida ao algoritmo é uma matriz com as unidades dos parâmetros utilizados, conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Matriz Unidades SLAW® (caso hipotético)

F(A..B)	A	B	C	D	
Custo	Altura	Espessura	Área	g	
R	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i> ²	<i>m/s</i> ²	
1	0	0	0	0	R
0	1	1	2	1	<i>mm</i>
				-2	<i>s</i>

Na Tabela 5.2 acima, tem-se parâmetros lineares, como altura e espessura, que apresentam expoente 1, tem-se também área, que apresenta expoente 2, bem como a gravidade, que tem expoente (-1), pois como se sabe a unidade segundos vem dividindo neste parâmetro.

Com estes dados fornecidos é possível alimentar o algoritmo de regressão e obter o ajuste a uma função potencial e o erro cometido ao realizar dita predição. Como a função resultado é uma função potencial do tipo apresentada na expressão (2.1) que no caso do exemplo ilustrativo seria:

$$F(A,B,C,D)=K A^{x1} B^{x2} C^{x3} D^{x4} \quad (5.1)$$

Eliminando os parâmetros que possuam os expoentes menores será possível obter funções mais simples. O nível de erro cometido ao comparar a função obtida com o conjunto de dados utilizado no ajuste permitiu medir a qualidade do ajuste realizado ou simplesmente identificar a importância de alguns parâmetros frente a outros no cálculo do efeito, que é considerado o maior benefício do algoritmo: dar ao usuário a possibilidade de investigar a relevância de cada parâmetro no efeito que está sendo estudado.

Uma vez selecionada a lei de potência adequada, o software plota uma curva onde é possível confrontar os valores experimentais, representados por pontos, com a curva que representa os resultados utilizando a lei de potência em questão.

Abaixo realiza-se a avaliação de um exemplo simples, que possui solução analítica fechada, permitindo ilustrar as possibilidades que a ferramenta apresentada fornece.

5.2 Função custo de um tanque de refrigeração

De forma a esclarecer ainda a utilização do algoritmo, gerou-se a seguinte aplicação, onde deseja-se investigar os custos de fabricação e operação de um conjunto de tanques de refrigeração. Na tabela 5.3 abaixo tem-se as informações relacionadas com esta aplicação e na expressão (5.2) a equação que será utilizada para avaliar os dados de entrada.

Tabela 5.3 - Dados relevantes para o custo de tanques de refrigeração

Custo Material Tampos	$6/m^2$
Custo Material Costado	$10/m^2$
Custo de Material de Isolamento	$80/m^2$
Altura máxima permitida	150m
Diâmetro máximo permitido	4m
Espessura	10 mm
Quantidade máxima de tanques	4

A expressão analítica que determina o efeito custo se apresenta a seguir:

$$C[\$] = 20 \frac{\pi D^2}{4} + 6\pi DL + 80 \left(\frac{2\pi D^2}{4} + \pi DL \right) \quad (5.2)$$

Onde:

D = Diâmetro do tanque.

L = Altura do tanque.

Como pode ser visto, a equação (5.2) é formada pela soma de três termos, ou seja, não se trata de uma função potencial. Porém é possível notar que os termos da função custo serão mais o menos importantes em função da relação L/D adotada, uma vez que estes parâmetros estão presentes nos diferentes termos da expressão.

Na Tabela 5.5 abaixo tem-se uma lista com os parâmetros de entrada e os efeitos a estes associados (neste caso o custo dos tanques), informação obtida empregando a equação (5.1). Desta forma, foi possível criar uma base de dados de custos de construção de tanques. Na Tabela 5.4 é realizada a análise de unidades dos parâmetros utilizados, onde o diâmetro (D), e a altura (L) e a espessura (t) são medidos em metros, e a quantidade de tanques (n) medida em unidades.

Apesar de o valor custo existente na tabela 5.5 ser gerado com a equação (5.1), em aplicações de interesse prático a geração de dados seria feita por simulação numérica e/ou utilizando valores medidos de ensaios, como poderiam ser orçamentos para venda dos tanques neste caso.

Tabela 5.5 - Dados orçados (Parcial)

Custo [R\$]	D [m]	L [m]	N [un]	t [m]
13643.3	1	50	1	0.01
27286.6	1	50	2	0.01
40929.9	1	50	3	0.01
54573.2	1	50	4	0.01
27569.2	2	50	1	0.01
55138.4	2	50	2	0.01
82707.6	2	50	3	0.01
110276.8	2	50	4	0.01
41777.7	3	50	1	0.01
83555.4	3	50	2	0.01
125333.1	3	50	3	0.01
167110.8	3	50	4	0.01
27145,3	1	100	1	0,01
54290,6	1	100	2	0,01
81435,9	1	100	3	0,01
40647,3	1	150	1	0,01
81294,6	1	150	2	0,01
121941,9	1	150	3	0,01

Tabela 5.4 – Unidades

C	D	L	N	
R\$	m	m	n	
1	0	0	0	\$
0	1	1	0	m
0	0	0	1	n

5.2.1 Resultados

Conforme descrito por Mendez (2008), após a análise realizada pelo programa, é gerada uma lei de potência que descreve o comportamento do custo (C[R\$]). Notar que a espessura foi considerada uniforme em todos os casos, isto foi forçado de forma a verificar se o algoritmo eliminaria este parâmetro na análise realizada. Frente aos parâmetros utilizados, neste caso, a expressão obtida foi:

$$C[\text{R\$}] = 2186,37 \times D^{1,36} \times L^{0,47} \times n \quad (5.3)$$

Esta expressão busca atender a todo o intervalo de valores L/D, que vão de 0,001 a 100, nela eliminou-se o termo t referente à espessura, uma vez que o próprio algoritmo eliminou o termo. A expectativa era que uma única expressão para um intervalo tão grande acabasse por apresentar grande erro para algumas regiões do intervalo. Na figura 5.1 abaixo é possível verificar o erro em questão, que foi calculado utilizando a equação (5.4):

$$E_{\text{erro}} = \sqrt{\left(\frac{V_{\text{slaw}} - V_{\text{real}}}{V_{\text{slaw}}}\right)^2} \quad (5.4)$$

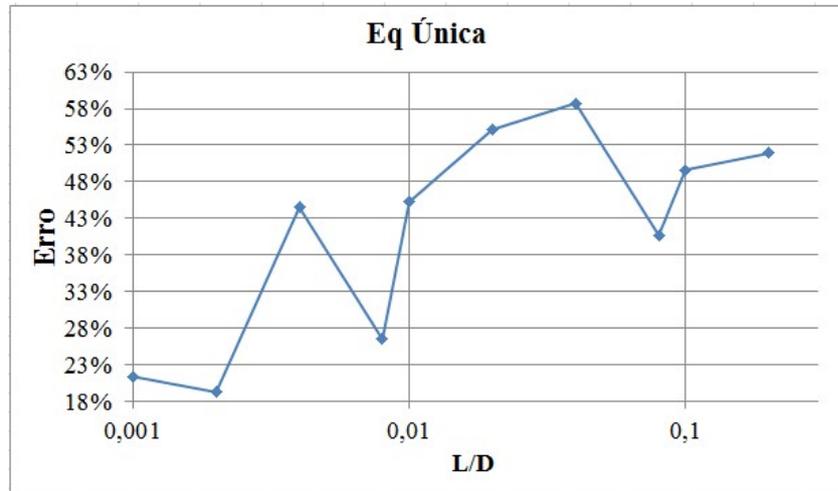


Figura 5.1 – Erro da equação única para custos de tanques de refrigeração

A partir deste resultado, buscou-se trabalhar com intervalos de L/D menores. Assim, foram separados dois grupos de dados de entrada de acordo com a relação L/D, o grupo A, onde L/D varia de (0,001) a (0,1), e grupo B, onde L/D varia de (1) a (100). Desta forma, duas novas equações foram obtidas:

$$Ca[R\$] = 148,4 \times D^{1,99} \times n \quad (5.5)$$

$$Cb[R\$] = 290 \times D^{1,01} \times L^{0,98} \times n \quad (5.6)$$

Estas equações apresentaram grande melhora nos resultados quando respeitados os limites de aplicação para cada uma delas, conforme pode ser vistos nas figuras Figura 5.2 e Figura 5.3 abaixo:

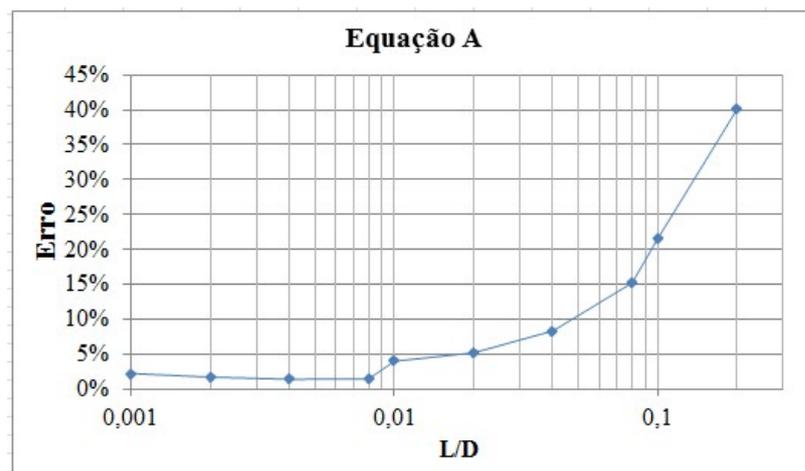


Figura 5.2 – Erro da equação A para o custo de refrigeração

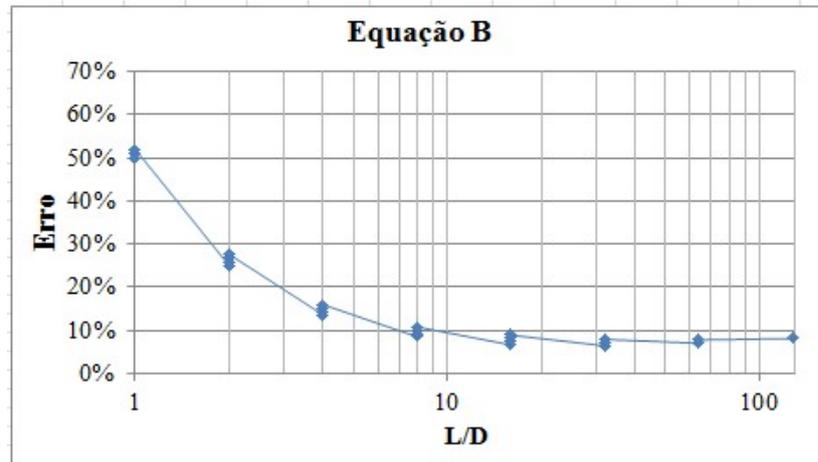


Figura 5.3 – Erro da equação A para o custo de refrigeração

Baseado nestes resultados surgiu a ideia de uma função composta, pela soma de dois termos. Cada termo trataria de uma parte das relações L/D, gerando assim uma função de potência capaz de atender a todo o intervalo existente.

É importante notar que a expressão (5.1), pode ser reescrita como se apresenta a seguir:

$$C[R\$] = 45 \times \pi \times D^2 \times n + 86 \times \pi \times D \times L \times n \quad (5.7)$$

Ao dividi-la em dois termos, o primeiro leva em conta o diâmetro elevado ao quadrado, e o segundo considera igualmente a altura do tanque e o diâmetro e assim concebeu-se a expressão (5.8), que é o simples somatório das expressões (5.5) e (5.6) para cada intervalo geradas pelo SLAW®.

$$(ca + cb)[R\$] = 148,4 \times D^{1,99} \times n + 290 \times D^{1,01} \times L^{0,98} \times n \quad (5.8)$$

A variação do erro cometido utilizando a função obtida somando duas leis de potência em função da relação L/D é apresentada na figura 5.4.

Pode-se perceber que esta segunda proposta de função custo melhora notavelmente o ajuste atendendo a todo o intervalo de L/D. No entanto, a expressão (5.8) não é, a priori, uma função potencial única, e sim, a soma de duas funções potenciais.

Isto de certa forma mostra que em casos mais complexos se poderá também utilizar a estratégia de separar a função custo em partes.

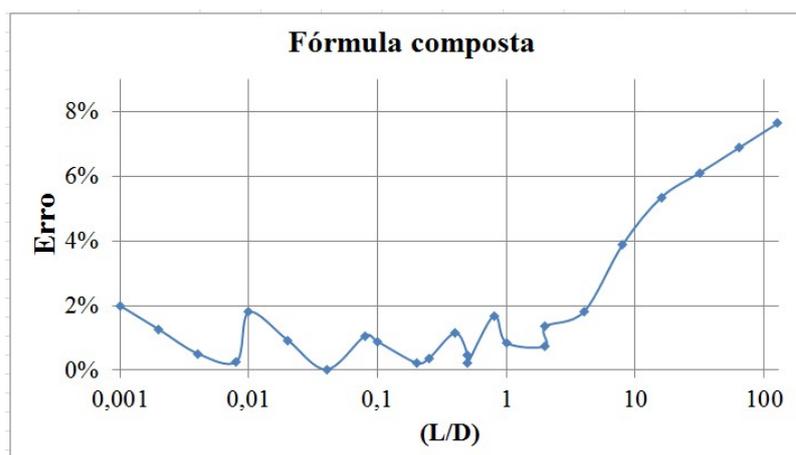


Figura 5.4 – Variação do erro da expressão proposta em função da relação L/D.

5.2.2 Influencia da Padronização na função custo

Nota-se que a expressão analítica da função custo (5.2) que forneceu os dados não considera o número de tanques em sua composição. No entanto, em casos reais é sabido que a construção de uma maior quantidade de tanques idênticos implica em reutilizar o mesmo projeto, repetir tarefas e comprar maiores quantidade de material, todos estes aspectos de padronização trazem redução de custos. Este mesmo efeito se pode evidenciar em uma estrutura complexa na qual se padronizem procedimentos construtivos e ou características geométricas do objeto em análise, como bitolas de perfis, espessuras de chapas entre outros.

Para ter-se um indicativo da redução deste custo, pode-se pensar em diferentes formas de economia quando da repetição da fabricação de um mesmo tanque, como as citadas na seção 2.2.2.

Pode-se pensar em um fator de redução que contemple a curva de aprendizado e a redução por aumento na quantidade de aço adquirida, citadas na seção 2.2.2. Este fator obviamente irá variar de acordo com a quantidade de tanques e com o peso em aço destes tanques, podendo chegar a uma redução de 15% para 2 tanques, 20% para 3 e 25% para 4 tanques.

A continuação no capítulo 6 apresenta as duas metodologias empregadas para avaliar as propostas de projetos navais gerados no capítulo de aplicações.

6 METODOLOGIA: Avaliações Estruturais

Neste capítulo são apresentadas as duas metodologias propostas para a validação estrutural das configurações geradas no capítulo de aplicações. Inicia-se pela metodologia naval, que aborda estruturas típicas pertencentes a cascos de embarcações e possibilita uma estimativa rápida e eficiente das condições de certa configuração perante os esforços existentes.

Na seção seguinte, aborda-se uma metodologia híbrida, que contempla elementos pertencentes a uma norma de estruturas metálicas e análises lineares elásticas em elementos finitos com determinação de carga crítica. E, ao final desta seção, tem-se a validação do método através de uma análise de maior complexidade em elementos finitos.

6.1 Avaliação estrutural – Método Naval

De acordo com Okumoto (2009), estruturas principais do casco, como anteparas, conveses e costados são compostos de chapas e perfis, que em termos dos esforços existentes podem ser tratados como conjuntos de reforçadores que incluem partes das chapas a eles soldadas como contribuintes na resistência aos esforços.

A distribuição dos esforços em uma estrutura destas é demasiado complexa, sendo difícil seu dimensionamento sem a utilização de métodos numéricos bem elaborados. Porém, em caráter preliminar, o autor supracitado sugere formulações simplificadas com o intuito de avaliar rapidamente projetos de estruturas navais. Estas formulações são adotadas neste trabalho para realizar a avaliação das configurações estruturais analisadas no capítulo de aplicações.

As formulações são divididas por tipo de estrutura: chapas e perfis, e levam em conta o estado de carregamento, bem como as propriedades mecânicas dos materiais e as geometrias dos componentes. Ao final desta seção tem-se um fluxograma que explica resumidamente o método.

6.2 Avaliação de Perfis submetidos à tração e pressão uniforme

A análise dos perfis baseia-se na relação entre o módulo resistente admissível (Z_{adm}) e o módulo resistente necessário devido ao carregamento imposto (Z_{req}):

$$FS = \frac{Z_{adm}}{Z_{req}} \quad (6.1)$$

O cálculo do módulo de seção do perfil baseia-se no seu momento de inércia e na distância do centróide, que leva em conta a largura colaborante da chapa ao qual o mesmo está soldado.

Para o cálculo da equação (6.1), são levadas em conta as dimensões dos perfis e a disposição dos perfis na estrutura, sendo estas dimensões descritas nas figuras abaixo. Na figura Figura 6.1 se apresentam os componentes estruturais citados: o perfil bulbo, comumente utilizando, com suas medidas principais e a definição da área da flange (em vermelho), da área da alma (em azul); e da largura colaborante da placa (em verde). Na figura Figura 6.2, se situa o conjunto perfil mais chapa dentro da estrutura do navio. Também se determinam aqui as dimensões relevantes do conjunto, (largura da chapa (b), comprimento da chapa (l) e espaçamento entre reforçadores (s)) todas estas dimensões são definidas pelo projeto, podendo ser alteradas de forma a atender as normas das sociedades classificadoras. A verificação estrutural aqui apresentada vai permitir auxiliar neste tipo de decisão, de forma a permitir ao projetista testar diversas configurações e buscar a que melhor atenda ao propósito do projeto.

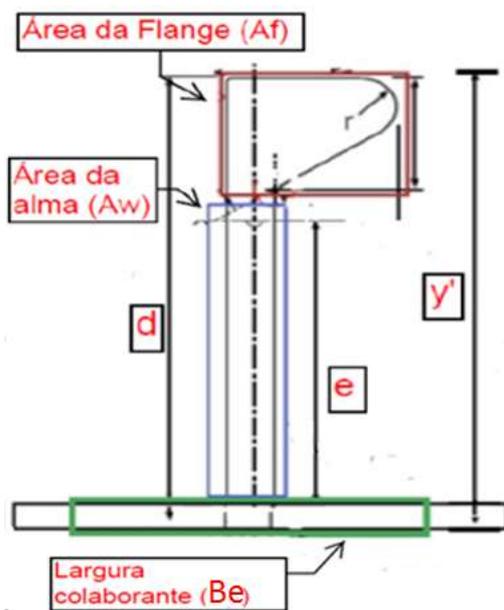


Figura 6.1 – Perfil com medidas

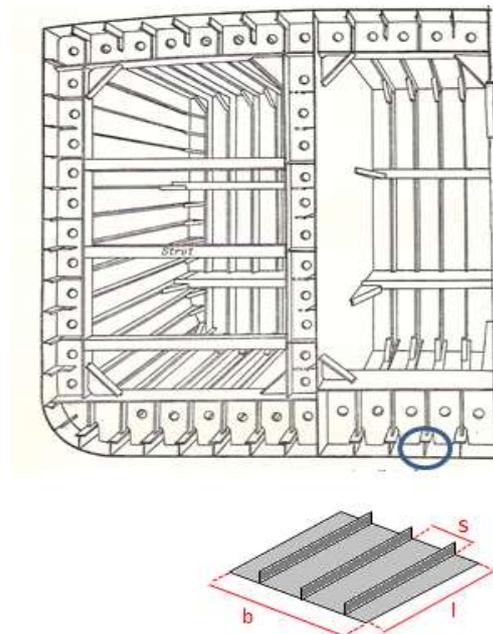


Figura 6.2 - Dimensões do conjunto

Onde:

d = altura do perfil somado a meia espessura da chapa, em mm

A_f = área da flange do perfil, em mm^2

A_w = área da alma do perfil, em mm^2

A_p = área da chapa colaborante, em mm^2

A = área total (perfil + chapa colaborante), em mm^2

e = centróide do sistema perfil + chapa colaborante, em mm

y' = altura total perfil + espessura de chapa, em mm

s = espaçamento (span) entre os perfis, em mm

l = comprimento do perfil, ou seja, distância entre duas cavernas gigantes, nas quais o perfil apoia-se, conforme descrito na seção 3.2 , em mm

b = menor dimensão da chapa entre longitudinais de maior porte, como anteparas, quilhas e afins , em mm

Conforme dito no início desta seção, pode-se entender que as estruturas navais possuem perfis com larguras colaborantes que envolvem parte das chapas a que estão fixados, esta largura colaborante (B_e) contribui com o reforçador na resistência aos esforços existentes, Okumoto (2009) define de forma simplificada, baseado na regra de classificação da sociedade classificadora japonesa (NK).

$$B_e = \min[0,2 \times l; s] \quad (6.2)$$

Com estas dimensões, é possível calcular o momento de inércia do perfil, seu centróide e por extensão, o módulo de seção admissível:

$$I = d^2 \times \left[Af + \frac{A_w}{3} - \frac{(A_w + 2 \times Af)^2}{4 \times A} \right] \quad (6.3)$$

$$e = \frac{d}{A} \times \left(Af + \frac{A_w}{2} \right) \quad (6.4)$$

$$y = \max[e; y' - e] \quad (6.5)$$

$$Z_{adm} = \frac{I}{y} \quad (6.6)$$

Para o cálculo do módulo de seção necessário, primeiramente se precisa determinar a pressão aplicada no perfil (P_o), que é metade de toda a pressão existente na chapa. Isto se dá pelo fato de termos um perfil de cada lado da chapa para suportar esta pressão, assim a mesma é dividida igualmente entre os perfis:

$$P_o = P_r \times s \quad (6.7)$$

P_r = pressão hidrostática no ponto de análise;

Com a pressão determinada, é possível determinar o momento máximo no perfil, entendendo-o como uma viga, pode-se utilizar a equação já conhecida para vigas bi engastadas com carregamento distribuído:

$$M_{max} = \frac{P_o \times l^2}{12} \quad (6.8)$$

Assim, pode-se determinar o módulo resistente necessário, que leva em conta o momento fletor máximo no perfil e a tensão de escoamento do material é determinado conforme a equação abaixo:

$$Z_{req} = \frac{M_{max}}{(f_y - \sigma_x)} \quad (6.9)$$

Onde,

σ_x = Tensão axial de compressão; em MPa

As tensões axiais de compressão citadas acima podem ocorrer dependendo da condição de navegação e da posição do painel onde este perfil está. Maiores esclarecimentos serão dados na aplicação II.

Com estas equações, calculam-se o módulo resistente admissível e o requerido. Caso o valor de FS presente na equação (6.1) seja menor do que 1, a estrutura não é validada.

6.3 Avaliação das placas submetidas à pressão uniforme e compressão

Para o caso de placas, compara-se a carga admissível e a carga requerida. Para a carga admissível, utiliza-se a seguinte equação:

$$P_{admI} = \frac{16}{s} x * MP_{adm} \quad (6.10)$$

Onde

MP_{adm} = Momento plástico admissível, conforme descrito abaixo:

$$MP_{adm} = \frac{f_y \times t'^2}{4} x 2 \left(1 - \frac{\sigma_x}{f_y}\right) \quad (6.11)$$

Para a carga requerida, novamente utiliza-se a pressão hidrostática no ponto estudado:

$$P_{req} = P_r \times s \quad (6.12)$$

A exemplo da equação (6.11), tem-se também a equação de momento plástico requerido:

$$MP_{req} = \frac{P_{req} \times s}{16} \quad (6.13)$$

Compara-se então as equações (6.10) e (6.12), gerando a equação que compara os esforços requeridos com os admissíveis (FSpl):

$$FSpl = \frac{P_{adm}}{P_{req}} \quad (6.14)$$

Além deste comparativo, para o caso de placas faz-se um comparativo em relação especificamente à espessura da chapa, compara-se neste caso a espessura real (t') com a espessura requerida (t'_{req}):

$$t'_{req} = \sqrt{\frac{Pr}{4 \times f_y}} \times \frac{s}{\sqrt{2 \times (1 - \frac{\sigma_x}{f_y})}} \quad (6.15)$$

Assim, chega-se ao fator de segurança relativo às espessuras de chapas:

$$FSt' = \frac{t'}{t'_{req}} \quad (6.16)$$

Abaixo se apresenta um fluxograma que demonstra as etapas para a avaliação estrutural do método naval empregado.

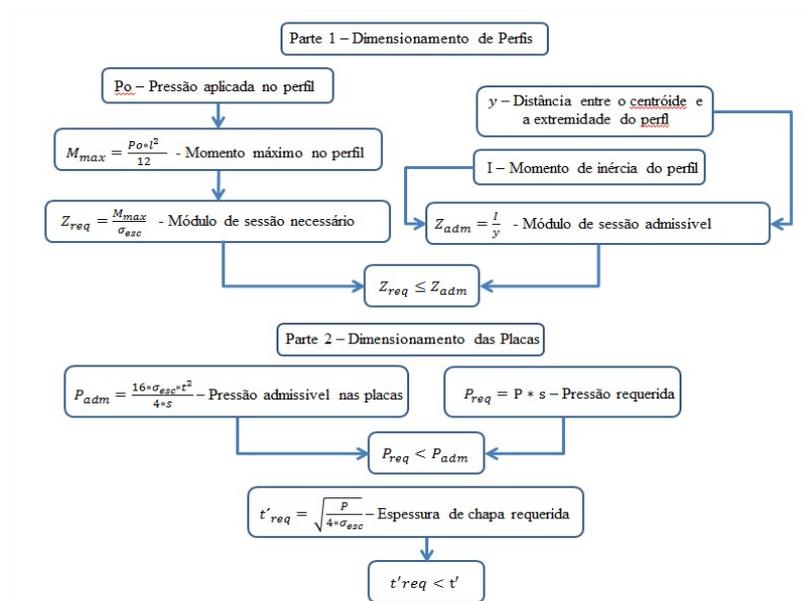


Figura 6.3 - Fluxograma de cálculo para o método naval

6.4 Avaliação Estrutural – Método Híbrido

Outra metodologia para a avaliação estrutural apresentada neste trabalho trata-se de um método híbrido, que combina a utilização de análises numéricas simples associadas à aplicação de expressões analíticas e semi-empíricas apresentadas pela norma NBR 8800.

Nas próximas seções, se apresenta a descrição da metodologia, seguida de seu detalhamento e de um fluxograma que demonstra o procedimento a ser seguido. Ao final tem-se a validação do método, que contempla uma aplicação com condições de carregamento e vinculação através de uma simulação não linear físico-geométrica. Cabe salientar aqui que esta metodologia não é permitida pelas normas de estruturas navais, sendo válida para utilização em estruturas metálicas de perfis soldados e laminados na construção de edifícios para uso civil e industrial [NBR8800:2008] e mostra a tendência atual no cálculo estrutural que consiste em permitir uma mistura entre expressões analíticas tipicamente utilizadas em normas de cálculo com análises de elementos finitos de relativa simplicidade, como uma análise elástica e um análise de autovalores para determinar a carga crítica.

6.4.1 Método híbrido: descrição

Conforme dito, a metodologia híbrida que será descrita foi baseada em uma norma nacional para estruturas de aço [NBR 8800:2008]. De acordo com a seção 5 da referida norma, é possível determinar a partir de uma análise elástica linear de elementos finitos as tensões de trabalho, (σ_{sd} e τ_{sd}), sobre a estrutura que devem ser verificada para que a mesma possa ser considerada aceitável perante os seguintes estados limites:

- a) Estados limites de escoamento sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{sd} \leq \frac{f_y}{\gamma_{al}} \quad (6.17)$$

- b) Estados limites de escoamento sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{sd} \leq \frac{0,6f_y}{\gamma_{al}} \quad (6.18)$$

- c) Estados limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{sd} \leq \frac{\chi f_y}{\gamma_{al}} \quad (6.19)$$

- d) Estados limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{sd} \leq \frac{0,6\chi f_y}{\gamma_{al}} \quad (6.20)$$

Onde:

f_y = Tensão de escoamento.

γ_{al} = Coeficiente de segurança.

χ = Fator de redução que leva em conta a redução de resistência devida a flambagem.

σ_{sd} e τ_{sd} = Tensões solicitantes devido as cargas aplicadas.

Para realizar o cálculo do fator χ uma expressão semi-empírica representada como uma curva na Figura 6.4 que relaciona este coeficiente com um índice de esbeltez (λ_0) calculado com as seguintes expressões:

a) Para tensões normais:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_e}} \quad (6.21)$$

b) Para tensões de cisalhamento:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0,6f_y}{\tau_e}} \quad (6.22)$$

Nestas expressões, o valor de σ_e é a tensão na região onde se está fazendo a verificação na condição em que a estrutura sofre flambagem elástica. Esta informação pode ser obtida a partir de uma análise de autovalores. Desta forma, o método proposto permite obter a carga de colapso de uma estrutura metálica utilizando expressões da norma (6.17) a (6.22), incluindo a curva da figura Figura 6.4 e soluções de elementos finitos elástica linear (para obter σ_d e τ_d) e/ou achar a carga crítica de flambagem elástica (para obter a tensão σ_e).

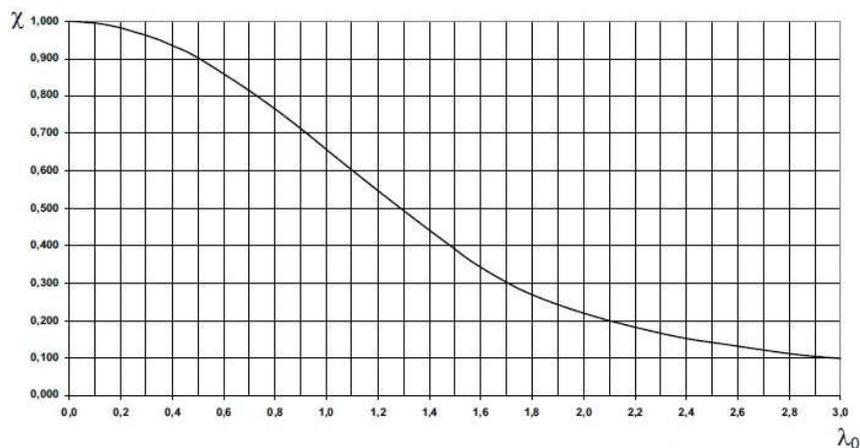


Figura 6.4 - Curva índice de esbeltez versus fator χ para tensões de compressão

Assim, ao obter os valores de λ_0 , e por extensão, de χ , é possível fazer o comparativo entre as tensões existentes (σ_{sd} ou τ_{sd}) com a resistência f_y , associada ao fator de segurança indicado, permitindo fazer uma primeira verificação estrutural.

6.4.2 Método híbrido: Detalhamento do método

Conforme descrito acima, o método híbrido necessita dos dados de entrada solicitados pela norma, para tal, é necessário montar um modelo de elementos finitos conforme descrito nas seções anteriores, de forma a obter estes resultados.

Este método permite a utilização de simulações numéricas para fornecer parâmetros intermediários no cálculo da carga de colapso. Estes parâmetros são obtidos através de uma análise de flambagem linear elástica para a determinação da tensão crítica. A construção destes modelos é relativamente simples, não havendo necessidade de um especialista para a correta interpretação dos resultados. Utilizando esta ferramenta de cálculo poderão ser estudadas diferentes propostas de projeto de forma ágil (se comparado à utilização de simulações não lineares em elementos finitos), permitindo ao projetista avaliar a integridade estrutural e o cumprimento às normas pertinentes.

Simulação

De forma a obter os esforços requeridos pela NBR 8800, o método exige a simulação elástica e a determinação numérica da carga de flambagem elástica da estrutura. No Apêndice B mostra-se de forma detalhada a simulação em si, com o código utilizado para um caso trabalhado nesta dissertação. Abaixo é apresentado o detalhamento de cada uma destas etapas.

Simulação linear elástica

Nesta primeira etapa, determinam-se os maiores valores de tensões encontradas para uma pressão unitária ($p=-1\text{MPa}$) (Novamente, é importante destacar que este carregamento é unitário, pois será escalado em função da pressão hidrostática existente e também na simulação não linear). Uma vez que se está avaliando um possível caso de flambagem, a tensão objetivo poderá ser a maior em termos de compressão, para o caso de tensões normais, ou a maior cisalhante.

Após a implementação de geometria, material, carregamento e restrições, aplica-se o carregamento unitário e roda-se uma simulação linear simples. Desta simulação são retirados os valores de tensões normais compressivas (σ_d) e cisalhantes (τ_d) máximas.

Análise de flambagem

Com os valores de tensões determinados, executa-se uma simulação de flambagem, ou seja, o *software* resolve um problema de autovalores. Nesta simulação o menor autovalor F_1 e seu modo associado são calculados. Este valor é o fator de multiplicação da carga crítica, ou seja, o percentual da carga aplicada (que neste caso foi unitária) que vai produzir a flambagem elástica da estrutura.

Verificação da estrutura

Os valores de tensão da análise linear e de carga crítica da análise de flambagem são suficientes para a primeira parte dos cálculos. Assim, é possível seguir conforme descrito pela NBR 8800 na verificação da estrutura.

Tensão crítica

Para a determinação da tensão crítica, considera-se a equação (6.23) no caso da tensão normal ser a mais relevante e a equação (6.24) no caso de tensão de cisalhamento. O fator F_n é o fator pelo qual deve-se multiplicar a pressão hidrostática unitária aplicada para obter o carregamento que leva o modelo a flambar elasticamente:

$$\sigma_e = \sigma_d \times F_n \quad (6.23)$$

$$\tau_e = \tau_d \times F_n \quad (6.24)$$

O índice (d) indica que a tensão a ser utilizada varia caso a caso, sendo necessário avaliar individualmente ainda na análise linear para determinar qual o esforço mais importante. As tensões σ_d ou τ_d são obtidas de uma análise elástica linear com pressão unitária aplicada.

Índice de esbeltez e fator de redução para flambagem:

O próximo passo é a determinação do índice de esbeltez (λ_0) e o fator de redução para flambagem (χ). O cálculo destes parâmetros já foi determinado anteriormente na seção 6.4.1. Entrando com o índice λ_0 na figura Figura 6.4 obtém-se o coeficiente de redução χ .

Determinação das tensões de cálculo:

As tensões de cálculo são determinadas pelas equações (6.19) e (6.20) e a partir delas é possível calcular a pressão última suportada pelo painel conforme a equação (6.205):

$$p_{lim} = (-1\text{MPa}) \times (\text{MIN}[\left(\frac{\chi f_y}{\sigma_d}\right), \left(\frac{0.6 \chi f_y}{\tau_d}\right)]) \quad (6.25)$$

Para o caso analisado tem-se que $p_{lim} = 0,033 \text{ MPa}$, ao comparar este valor com o valor de pressão solicitante é possível avaliar o coeficiente de segurança da estrutura avaliada.

Determinação dos estados limites:

Conforme descrito na seção 6.4.1, as equações (6.17) a (6.20) são utilizadas para o cálculo da resistência da estrutura, e assim os estados limites podem ser calculados para então determinar se a estrutura falha. A seguir se apresenta um fluxograma que ilustra o procedimento seguido nesta seção, onde pode-se verificar cada uma das etapas necessárias para esta determinação:

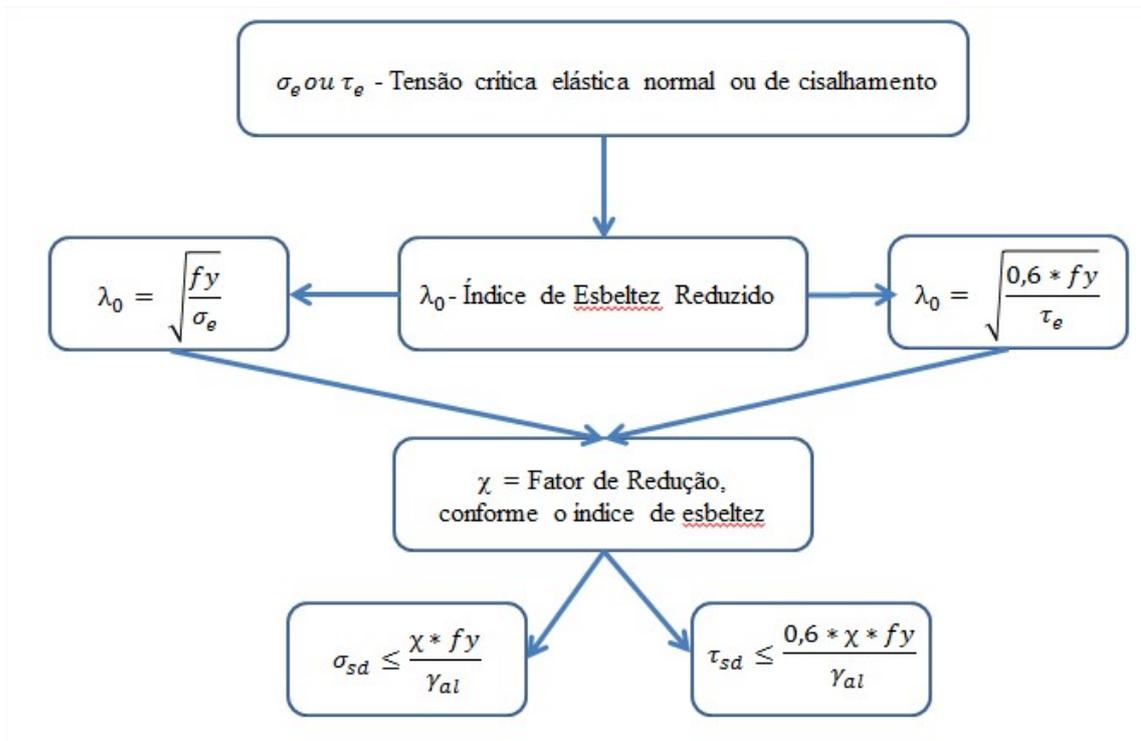


Figura 6.5 - Fluxograma do método híbrido – tensões de cisalhamento ou compressão

6.4.3 Método Híbrido – Validação

Para validar o método aqui apresentado, tem-se duas alternativas possíveis.

Alternativa 1: Comparar os resultados obtidos pelo método proposto com resultados experimentais, para isto seria necessário construir uma estrutura metálica, a qual seria instrumentada de forma a obtermos a sua carga de colapso. Os dados coletados seriam comparados com os valores obtidos pelos cálculos da norma, validando através dos comparativos entre os mesmos.

Alternativa 2: Através de uma análise não linear física e geométrica (FEM-NLFG) levando em conta as imperfeições da estrutura obter as cargas de colapso.

Ambas as opções apresentariam incertezas, a primeira, inerentes às medições, e a segunda, devido ao modelo. Embora sendo o primeiro caminho o mais adequado, devido à razões econômicas neste trabalho, vai se proceder segundo indicado na alternativa 2.

Validação do método realizando uma análise de um modelo de elementos finitos não linear físico-geométrico (FEM-NLFG).

Utilizou-se um modelo de casca de elementos finitos possuindo como lei constitutiva um modelo elastoplástico bilinear com encruamento cinemático, onde após atingir-se a tensão de escoamento, o valor do módulo de elasticidade (E) é reduzido para E/100.000, como pode ser visto na imagem abaixo.

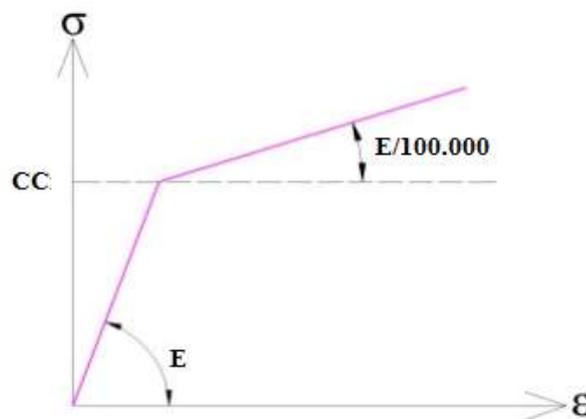


Figura 6.6 - Modelo bilinear

Por encruamento cinemático, entende-se que a região que determina o encruamento do material, composta pela resultante dos valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 , é alterada assim que uma das fronteiras é atingida. Neste momento, a região deforma-se na direção desta componente.

Na análise com o modelo de elementos finitos não linear obteve-se uma pressão teórica de colapso que será comparada com o valor limite obtido segundo a análise limite obtida com a metodologia híbrida.

A simulação FEM-NLFG será realizada aplicando uma pressão no modelo quatro vezes superior à pressão $P_{lim}=0,033 \text{ MPa}$, desta forma garantindo que as configurações dimensionadas segundo o método híbrido para suportar a as tensões geradas pelo carregamento “P” colapsariam:

$$p_{NLFG} = 4 \times p_{lim} \quad (6.26)$$

A análise em FEM-NLFG é realizada de forma incremental, verificando através de um esquema iterativo o equilíbrio em cada incremento de pressão, nos diversos incrementos.

Na sequência, aplica-se em cada incremento da análise FEM-NLFG uma pressão:

$$p = \alpha \times p_{NLFG} \quad (6.27)$$

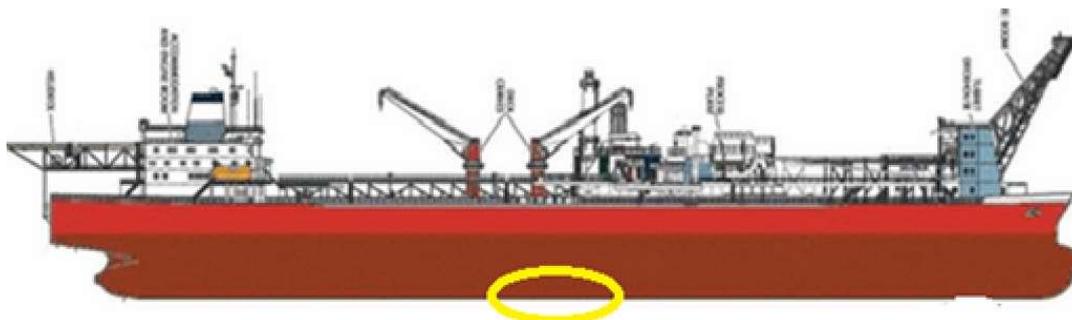
Onde α pode variar de 0 a 1 durante toda a análise, por exemplo, no caso de chegar-se a aplicar uma fração da carga $\alpha=0,5$ isto indicaria que o modelo nesta situação suporta $P_\alpha=2 \times P_{lim}$.

No modelo numérico será possível comparar a pressão P obtida com o método híbrido com os valores de pressão de colapso obtidos com o modelo FEM-NLFG . Para definir quando considerar o colapso no modelo de FEM-NLFG comparável com o método híbrido serão comparados valores de tensões máximas calculadas com os dois métodos.

Painel da embarcação utilizado para avaliar a metodologia híbrida

A seguir apresenta-se o painel estrutural que será utilizado para realizar a validação. Na figura Figura 6.7(a) e ilustra-se a localização do painel na extensão da embarcação, já na figura Figura 6.7 (b) tem-se o detalhamento da localização na estrutura do fundo do casco, e na figura Figura 6.7 (c) é possível ver a configuração geométrica a ser simulada com suas principais dimensões indicadas. Pode-se perceber na parte central desta chapa a presença de um reforçador, que colabora na rigidez do conjunto.

Partindo desta base, criaram-se 5 diferentes configurações para a espessura e altura do perfil, de forma a explorar os diferentes tipos de colapsos a serem avaliados com a metodologia híbrida apresentada. Estas configurações estão apresentadas na figura Figura 6.8.



(a)

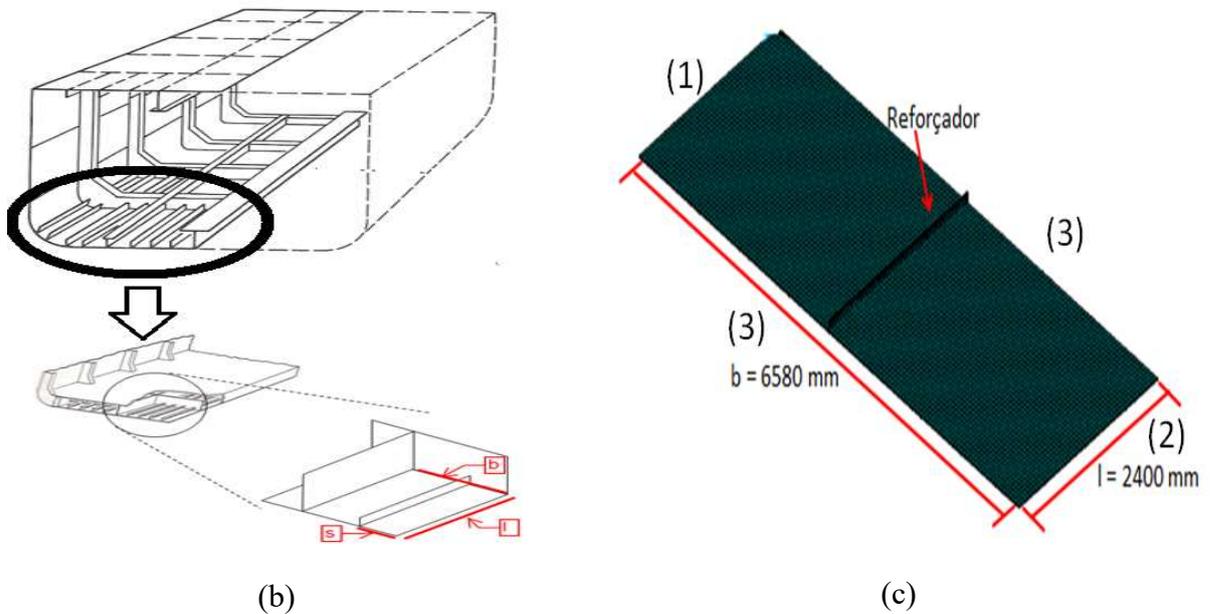


Figura 6.7 – (a) Localização do painel na embarcação, (b) dimensões padrão em mm , com quilha (1), costado (2) e cavernas gigantes (3)

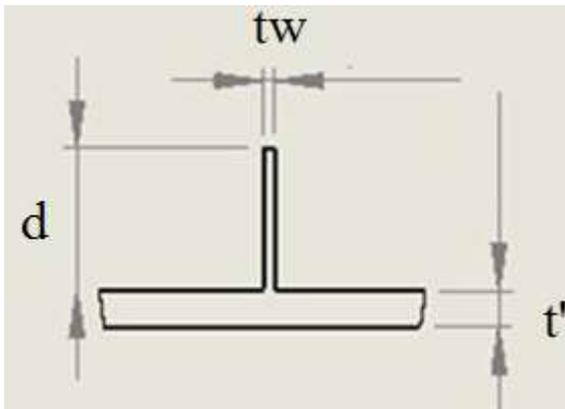


Figura 6.8 - Dimensões alteráveis

Tabela 6.1 – Propostas adotadas ($t'=25.4\text{mm}$ em todos os casos)

CASO	tw [mm]	d [mm]
1	7,9	100
2	3,95	100
3	2,63	100
4	7,9	300
5	7,9	600

Vinculações e estado de carregamento:

Para a simulação das vinculações, adotou-se que as laterais à esquerda e à direita (regiões em amarelo) da figura Figura 6.9 serão consideradas engastadas, uma vez que na embarcação as mesmas estão apoiadas em estruturas com rigidez muito superior (a quilha na esquerda (1) e o costado à direita (2)) como se ilustra na Figura 6.7. Para as extremidades anterior e posterior (regiões em azul) na figura Figura 6.9, adotou-se que as mesmas estariam simplesmente apoiadas, uma vez que elas estão em contato com as cavernas gigantes (3), que

são mais rígidas que as próprias chapas, mas não apresentam a mesma rigidez da quilha e o costado, pode verificar isto também figuraFigura 6.7.

Como carregamento, adota-se uma pressão P_{NLFG} definida na expressão (6.26), (6.27) aplicada sobre toda a região da chapa como indicado na figuraFigura 6.9.

Para realizar o cálculo pela metodologia híbrida, é considerada a mesma geometria e condições de contorno, considerando o carregamento unitário para determinar assim a distribuição de tensões em uma análise elástica linear e então determinar a pressão crítica resolvendo um problema de autovalores.

Para realizar as análises numéricas, modelou-se a estrutura com elementos de casca SHELL281[®], já descrito na fundamentação teórica. Os elementos utilizados possuem tamanho de aresta 50 mm na chapa, já para o reforçador, foi utilizada uma redução progressiva, atingindo o limite de 12,5 mm na parte superior, um detalhe da malha utilizada se apresenta na figuraFigura 6.10.

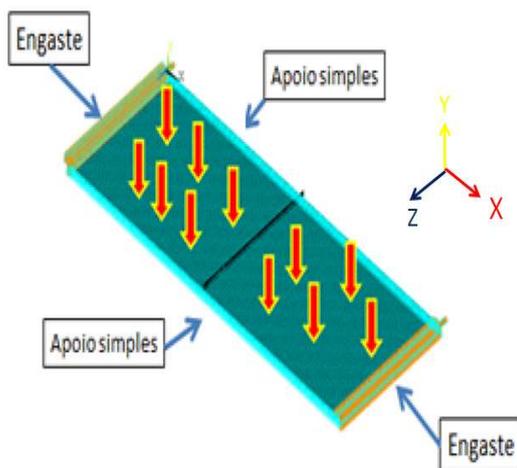


Figura 6.9 - Vinculações e Carregamento

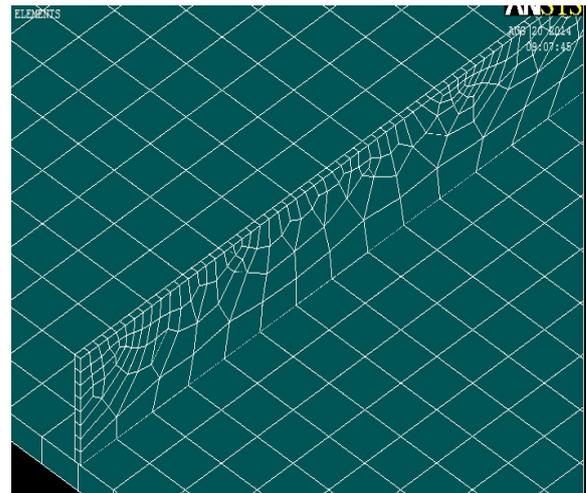


Figura 6.10 - Tamanhos de elementos (espessura do perfil meramente ilustrativa)

Imperfeições geométricas

Buscando aproximar o modelo em FEM-NLFG das condições reais, foram adicionadas excentricidades aqui denominadas como $w_{o(x,y)}$ obtida como o produto do primeiro modo de flambagem da estrutura por um fator escalar w_o .

NaFigura 6.11 é apresentado o deslocamento lateral δ_x versus o fator de carga α aplicado (ver definição de α na expressão 6.29), da parte superior do reforço (conforme indicado em amarelo na Figura 6.12 para uma das configurações testadas. Pode-se verificar os

resultados para diversos campos de excentricidades aplicados, com w_0 valendo 1/500, 1/1500 e 1/3000.

Percebe-se que neste caso para α entre 0,20 e 0,25 tem-se uma mudança abrupta na não linearidade da estrutura o qual é coerente com os resultados apresentados na tabela 6.2, que mostra a carga crítica dentro do intervalo citado para α :

Tabela 6.2 - Resultados Caso 5

PNLFG	(α)	P (α)	Plim (Eq. 6.25)
0.132	0,2 - 0,25	0,026 - 0,033	0.033

Devido à sua maior efetividade, nas demais configurações foi adotado $w_0=l/3000$, sendo l o vão do perfil de reforço, no valor de 2400 mm.

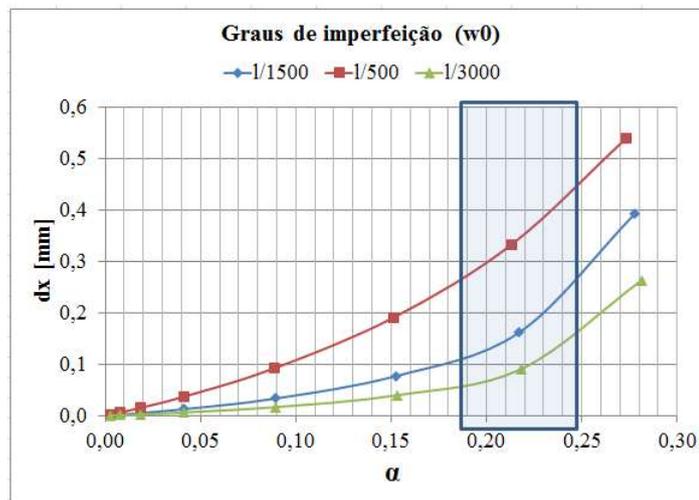


Figura 6.11 - Análise de diferentes graus de imperfeições

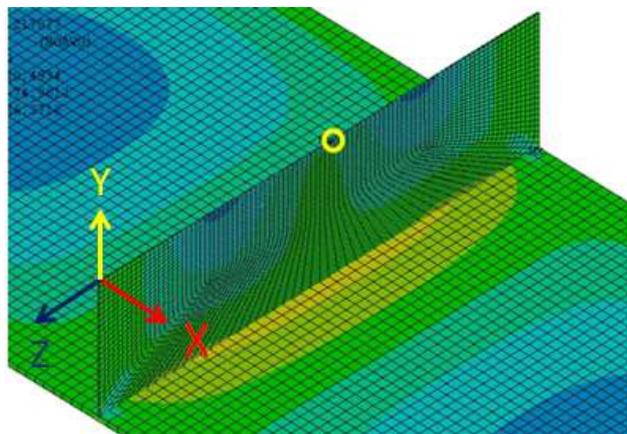


Figura 6.12 - Ponto analisado

Resultados da Validação

Realizam-se as análises lineares e após ocorre a aplicação do método acima proposto nas configurações 1 a 5 presentes na Tabela 6.1. Os resultados obtidos na aplicação do método híbrido são apresentados na Tabela 6.3. Na segunda coluna é apresentado o autovalor obtido na análise de flambagem realizada em cada caso, denominado aqui de $F1$. Para obter a pressão crítica de cada configuração (pressão para a qual a estrutura flambaria elasticamente), tem-se que multiplicar este fator por (1MPa). Na terceira coluna da Tabela 6.3 tem-se a tensão de compressão elástica máxima obtida na estrutura para uma pressão uniforme aplicada na placa de 1MPa. Multiplicando a segunda e terceira coluna para cada configuração é possível calcular a tensão de flambagem σ_e , utilizando a curva da Figura 6.4 é possível calcular o fator de redução χ , apresentado na quarta coluna da mesma tabela. Este parâmetro é utilizado na expressão (6.19) para calcular a tensão na qual a estrutura chega a uma condição limite em sua região mais solicitada, com ela é possível determinar a tensão de colapso apresentada na quinta coluna. Na sexta e última coluna da tabela se indica o tipo de colapso ocorrido.

Tabela 6.3 - Resultados da análise linear e flambagem

CASO	F_n	σ_d (p=-1MPa)	σ_e ($F1 * \sigma_d$)	χ	$\chi * f_y$	Mec. de falha
1	0,0643	27192	1748,4	0,933	293,89	Plasticidade
2	0,017	34981	594,7	0,842	265,23	Plasticidade
3	0,00575	38684	222,4	0,625	196,87	Misto
4	0,0315	7440	234,36	0,64	201,6	Misto
5	0,031	2700	83,7	0,286	90,09	Flambagem

É importante salientar aqui que, no caso de as maiores tensões atuantes terem sido de cisalhamento, teria-se um procedimento similar. No entanto, a equação utilizada seria diferente (vide equação (6.20)). Observar também que comparando os valores das colunas 5 e 6 da tabela 6.3 se percebe que nos casos onde o colapso ocorre devido à plastificação da estrutura, a tensão de colapso σ_c na região mais solicitada é muito menor que o valor da σ_e , por outro lado, na medida em que a flambagem começa a governar a forma de colapso, a tensão de colapso e a de flambagem aproximam-se.

Na Figura 6.13 foram indicados os pontos da curva utilizados:

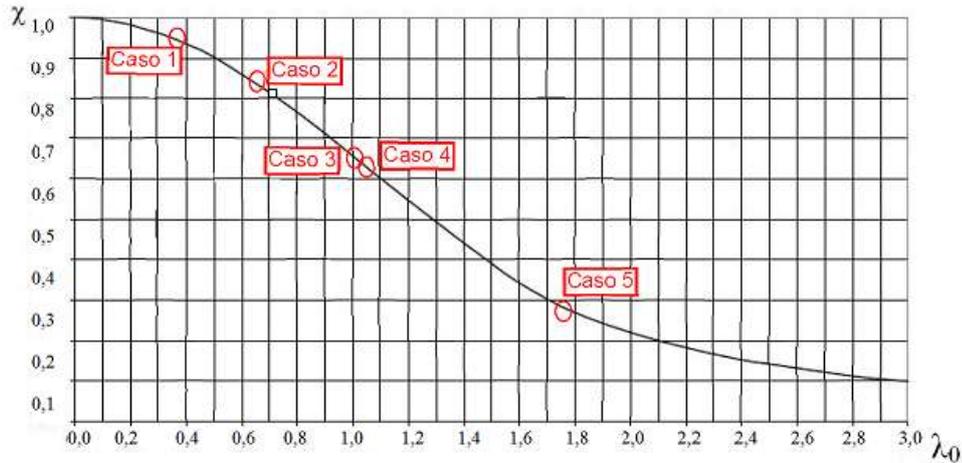


Figura 6.13 - Resultados para χ

Na Tabela 6.3 tem-se a comparação dos resultados obtidos com o método híbrido e com o método MEF-NLFG. É importante observar que a comparação foi realizada para as 5 análises propostas e que no caso do método não linear é determinado um intervalo no qual tanto em termos da pressão de colapso como da tensão os resultados são semelhantes aos obtidos com o método híbrido. Desta forma considera-se validado, ainda que parcialmente, o método híbrido empregado.

Tabela 6.4 - Comparativo dos resultados

CASO	Tensão de colapso (Met.Híbrido)	Tensão de Colapso (MEF_NLFG)	P _{lim} (Met.Híbrido)	P _{lim} (MEF-NLFG)
1	293,89	264,13 - 298,15	0,011	0,009 - 0,012
2	265,23	259,9 - 279,3	0,008	0,007 - 0,010
3	196,87	190,3 - 232,7	0,005	0,004 - 0,006
4	201,6	194,8 - 220,5	0,0271	0,022 - 0,028
5	90,09	85,2 - 98,9	0,0334	0,032 - 0,041

Complementando a avaliação estrutural, apresenta-se no próximo capítulo uma metodologia para avaliação de custos.

7 METODOLOGIA: Avaliação de Custos

Para a determinação dos custos envolvidos em uma embarcação, deve-se levar em conta todas as etapas existentes, projeto, construção, operação e manutenção. Fazer um levantamento completo destes custos é sem dúvida uma tarefa complexa, onde talvez o valor exato não seja conhecido.

Como forma de facilitar este levantamento, foi obtido o orçamento de uma embarcação conhecido como *OS5*. Estes tipos de orçamentos são solicitados pelos órgãos financiadores para a liberação de empréstimos aos interessados em adquirir embarcações, sendo avaliados por uma banca técnica em entidades como o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) e o Fundo da Marinha Mercante FMM. Assim, pode-se aceitar estes valores como muito próximos da realidade.

Como poderá ser visto na sequência, este tipo de orçamento não envolve todos os tipos de parâmetros existentes no custo da embarcação, porém os itens existentes serão de extrema utilidade para indicar valores e itens que possam compor as funções de custo que serão avaliadas nas aplicações do capítulo 8.

Na Tabela 7.1 tem-se os valores praticados na etapa de orçamentação para uma barcaça de líquidos no ano de 2007, por questões de sigilo, o nome da embarcação e alguns detalhes característicos foram suprimidos.

Analisando a Tabela 7.1 é possível observar que os itens do grupo 3 e 5 são pontuais e seus custos não poderiam, a priori, ser distribuídos por toda a embarcação. Porém, ao compreender que seus componentes são necessários para o funcionamento da mesma, como é o caso dos propulsores por exemplo, é justificável distribuir este custo. Este trabalho não abordará estes custos, uma vez que não foi possível encontrar uma forma correta de fazer esta distribuição.

Já nos demais itens é possível fazer esta distribuição vinculada a algum critério mais prático. Para manter o padrão adotado para a parte estrutural, optou-se por utilizar o peso da embarcação em aço como critério. Assim, utilizando a informação do peso da embarcação, é possível determinar o custo por tonelada dos itens pertencentes aos grupos 1,2 e 4.

Nas seções seguintes todos os custos citados são abordados, de forma a permitir que em trabalhos futuros, seja possível avançar na análise econômica contemplando todos os custos envolvidos.

Tabela 7.1 - Custos Praticados

DESCRIÇÃO	Valor [R\$]
1) Material	
Chapa Lisa - Aço Nacional (R\$/Ton)	2 600,00
Chapa Corrugada - Aço Nacional (R\$/Ton)	4 600,00
Perfil Importado (R\$/Ton)	2 900,00
Perfil Nacional (R\$/Ton)	2 900,00
Tubos estruturais (R\$/Ton)	6 900,00
2) Mão de Obra Estrutural	
HH por tonelada (HH/ton)	150,40
Custo HH (R\$/HH)	30,00
Custo Metro de Solda (R\$/m)	30,00
Total Grupo 1 e 2	7 178 900,00
3) Máquinas, tubulações, elétrica e acessórios	
Máquinas Nacionais (R\$)	623 000,00
Máquinas Importadas (R\$)	511 559,00
Tubulações Nacionais (R\$)	853 400,00
Tubulações Importadas (R\$)	259 000,00
Elétrica Nacional (R\$)	189 200,00
Elétrica Importada (R\$)	36 650,00
Acessórios Nacionais (R\$)	310 000,00
Acessórios Importados (R\$)	45 200,00
HH Própria (Un)	26 500,00
HH Contratada (R\$)	70 000,00
Total Grupo 3	3 909 087,00
4) Acabamento e Pintura	
Acabamento Nacional (R\$)	72 000,00
Acabamento Importado (R\$)	36 900,00
Pintura Nacional (R\$)	406 000,00
Pintura Importada (R\$)	-
HH Própria (Un)	6 200,00
HH Contratada (R\$)	286 000,00
Total Grupo 4	776 230,00
5) Custos diretos de Produção	
Classificação (R\$)	250 000,00
Outras despesas diretas (R\$)	742 000,00
Projeto (R\$)	1 005 000,00
Total Grupo 5	1 997 000,00

Custos estruturais

Para o levantamento do custo da parte estrutural, leva-se em conta o custo dos diferentes tipos de aço. Estes itens são contemplados na equação abaixo:

$$C1 = \text{Peso}_{\text{CLisa}} \times 2600 + \text{Peso}_{\text{CCorr}} \times 4600 + \text{Peso}_{\text{perfil}} \times 2900 + \text{Peso}_{\text{Tub}} \times 6900 \quad (7.1)$$

Como pode ser visto acima, a equação (7.1) leva em conta o material de cada componente estrutural da embarcação através dos itens “Peso CISA”, “Peso CCorr”, “Peso Perfil”, e “Peso Tub”, que contemplam o material referente às chapas lisas, chapas corrugadas, perfis e tubulações estruturais subsequentemente. Na sequência apresenta-se o custo de horas homem e metragem de solda, necessários tanto na parte estrutural, como nos demais componentes.

Custos de Mão de Obra e Soldagem

Complementando a equação anterior, abaixo são listados os custos de pessoal para fabricação da embarcação. Aqui tem-se o custo estimado de mão de obra e o custo ao metro de solda.

$$C2 = \text{Peso}_{\text{TOTAL}} \times 150 \times 30 + \text{Msol} \times 30 \quad (7.2)$$

Pode-se perceber que a equação contempla as horas homem, através do termo envolvendo “Peso TOTAL” e a metragem de solda “Msol”. Para o cálculo da metragem de solda, utiliza-se a equação abaixo, que calcula toda a metragem de interface entre a chapa, o perfil e a estrutura à sua volta, ou seja, o perímetro da chapa (linhas amarelas e vermelhas da Figura 7.1) e a metragem de soldagem dos perfis (linhas verdes) em ambos os lados dos perfis (a descrição dos valores para l, b e s estão indicados na Figura 6.2 mostrada anteriormente):

$$\text{Msol} = 2 \times l + 2 \times b + 2 \times l \times \frac{b}{s} \quad (7.3)$$

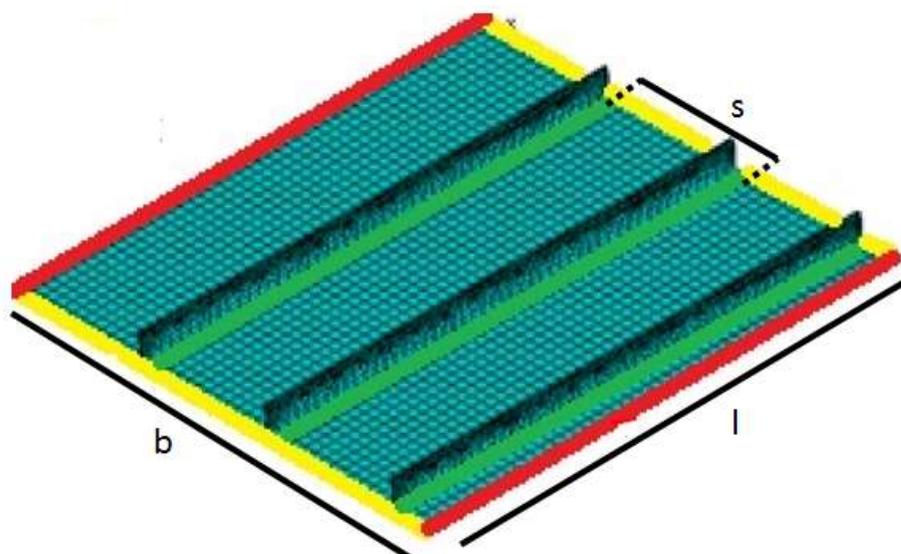


Figura 7.1 - Metragem de Solda em um painel

Custo de acabamentos e pintura

Conforme dito anteriormente, o critério adotado para distribuição destes custos foi o peso em aço da embarcação. De acordo com a planilha de orçamentação obtida, esta embarcação tem aproximadamente 977 toneladas de aço em sua composição, assim, é possível elaborar a Tabela 7.2 para complementar a tabela de custo da seção anterior e, a partir de seus dados, gerar a equação abaixo:

Tabela 7.2 - Custos Acabamentos e Pintura

Descrição	[R\$/Ton]
Acabamento Nacional	73,69
Acabamento Importado	37,77
Pintura Nacional	415,56
Pintura Importada	-
HH Própria (Un)	190,38
HH Contratada (R\$)	292,73

$$C3 = P_{eso_{TOTAL}} \times (73,69 + 37,77 + 415,56 + 190,38 + 292,73) \quad (7.4)$$

Custo máquinas

Máquinas, tubulações e componentes elétricos estão distribuídos por toda a embarcação. Sendo assim, pode parecer justo não incluí-los no custo de setores da embarcação onde estes itens não estão presentes. No entanto, vale lembrar que a embarcação é um conjunto autônomo que precisa ser auto suficiente quando em operação. Desta forma, todos os componentes existentes são necessários para seu funcionamento. Assim, mesmo partes da embarcação simples como a região de carga, devem ter uma parcela do custo destes equipamentos incluída em seu próprio custo. O custo relativo a estes componentes será denominado aqui de C4 e seu valor conforme a tabela é de R\$ 3.909.087,00 para a embarcação estudada.

Custos diretos de produção

Os itens abaixo incluem despesas inerentes à construção da embarcação, porém estão majoritariamente ligados a serviços necessários ao andamento da obra, não estando vinculados à uma região específica da embarcação e sim a momentos e condições da obra.

Classificação (C5)

Para que uma embarcação possa operar, ela deve passar por uma série de vistorias, estas iniciam ainda na fase de aprovação do projeto, avançando durante a construção através

de visitas periódicas e após a conclusão da embarcação, através de provas de mar e diversos procedimentos para comprovar a segurança do equipamento como um todo.

Este processo não finaliza com a entrega da embarcação: trata-se de um trabalho contínuo durante toda a operação da mesma, exigindo que a cada determinado intervalo de tempo, sejam feitos reparos e verificações do estado atual da embarcação.

Instituições chamadas sociedades classificadoras possuem o direito de efetuar os procedimentos de classificação em nome da autoridade marítima nacional, Emilio (2010) define sociedades classificadoras como organizações que estabelecem e aplicam padrões técnicos relativos ao projeto, construção e inspeção das embarcações.

Os custos de classificação estão muito mais atrelados à complexidade do projeto do que à quantidade de aço envolvida.

Vale citar aqui que no caso da construção de um novo navio utilizando o mesmo projeto, ainda assim é necessária a classificação. No entanto seu custo é reduzido, uma vez que será majoritariamente no sentido de verificação e acompanhamento, não sendo necessária a aprovação completa do projeto novamente. O custo relativo a este processo será denominado aqui de C5 e seu valor para esta embarcação conforme a tabela 7.1 será de R\$ 250.00,00.

Projeto

Seguindo a mesma linha do custo de classificação, não pode-se vincular o projeto ao peso em aço da embarcação, mas sim a complexidade do mesmo. Entende-se existir uma tendência de projetos com maior valor agregado serem de maior complexidade, sendo esta complexidade uma das justificativas para um maior valor em um projeto. O custo relativo ao projeto será denominado aqui de C6 e seu valor nesta embarcação é de R\$ 1.005.000,00;

Outras despesas diretas

Este item genérico inclui gastos com pequenos serviços, como segurança, limpeza, testes, documentação e demais gastos ocorridos desde o projeto até a entrega da embarcação. Eles variam conforme o formato de construção adotado, como por exemplo a utilização de um estaleiro próprio ou alugado, ou ainda, a terceirização de alguns serviços como a utilização de rebocadores e o transporte dos blocos. Estes custos serão denominados aqui de C7 e possui neste caso o valor de R\$ 742.000,00.

Custo de logística

Projetos padronizados tem uma tendência a não possuírem a melhor performance possível, dado que a solução não é pensada para um caso só, e sim para toda uma cadeia de possibilidades, de forma a poder se valer dos benefícios de ter-se estruturas padrão. No entanto, essa perda de performance deve ser mensurada para que seja possível avaliar com maior exatidão os reais benefícios de um projeto padronizado.

No caso de embarcações, uma forma de avaliar este custo de performance é pelo peso em aço, espera-se que uma estrutura padronizada seja mais pesada do que a opção voltada à performance.

Para mensurar esta perda, parte-se do princípio de que cada quilo a mais de peso significa menos material transportado e mais “peso morto”. Desta forma, é possível propor uma equação que considere a diferença de peso e a vincule com o preço por tonelada transportada cobrado pelas empresas:

$$C8 = \frac{D_{\text{peso}} \times C_{\text{frete}} \times N_{\text{viag}}}{N_p} \quad (7.5)$$

Onde:

D_{peso} = Diferença entre o peso em aço da proposta atual em comparação ao projeto original;

C_{frete} = Custo por kg transportada praticado na bacia (para o caso da bacia e da embarcação deste trabalho, adotou-se R\$ 40 por tonelada)

N_{viag} = Número de viagens por ano (60 neste caso)

N_p = Número de painéis existentes na embarcação

De forma a facilitar o entendimento, apresenta-se na Tabela 7.3 todos os índices abordados nesta seção:

Tabela 7.3 - Índices utilizados na avaliação de custos

Índice	Definição
$Peso_{Clisa}$	Peso referente às chapas lisas do painel
$Peso_{perfil}$	Peso referente aos perfis do painel
$Peso_{Tub}$	Peso referente aos tubos estruturais do painel
$Peso_{Corr}$	Peso referente às chapas corrugadas do painel
$Peso_{TOTAL}$	Peso total dos elementos estruturais do painel
$Msol$	Metragem de solda do painel
D_{peso}	Diferença de peso em kg entre a proposta atual e o projeto original
C_{frete}	Custo de frete por tonelada
N_{viag}	Número de viagens consideradas
N_p	Número de painéis considerados

7.1 Índices de benefício da padronização

Para quantificar os benefícios da padronização citados nas seções anteriores, foram elaborados índices à serem agregados aos custos que são afetados pela padronização, abaixo apresentam-se estes índices, seus significados e o equacionamento para o cálculo deles:

Índice de redução de custo de aço (B1)

Este índice leva em conta o poder de barganha em função da compra de uma maior quantidade de aço e seu valor é função do peso total da embarcação e da progressão de descontos citada na fundamentação teórica (Figura 2.4).

$$B1 = f(Peso_{TOTAL}, desc) \quad (7.6)$$

Índice de redução de HH (B2)

Este índice leva em conta a redução das horas necessárias a cada tarefa. Como já foi explicado, esta redução é proveniente da repetição de um mesmo processo, aumentando a produtividade. O índice leva em conta a quantidade de painéis idênticos produzidos, comparando este número com o gráfico da Figura 2.3 da fundamentação teórica.

$$B2 = f(N_{painéis}, desc) \quad (7.7)$$

Índice de redução de projeto (B3)

A precificação das equipes de projeto que trabalham na concepção de uma embarcação geralmente é medida em função das horas necessárias para o projeto, a previsão destas horas leva em conta diversos parâmetros, como a complexidade da embarcação, isto está diretamente ligado à quantidade de planos (ou cavernas) diferentes que serão necessárias. Pode-se entender que nas regiões de popa e proa existirão diferentes cavernas conforme aproxima-se dos limites das mesmas, no entanto, para o corpo paralelo, pode-se ter uma grande redução nos tipos de cavernas a serem projetadas ao trabalhar-se com cavernas padronizadas, podemos estender este conceito aos painéis citados neste trabalho.

Assim, este índice leva em conta os diferentes tipos de painéis de cada proposta, somando o custo $C6$ para cada novo tipo de painel:

$$B3 = f(N_{\text{tipos-Painéis}}, C6) \quad (7.8)$$

Índice de aumento da vida útil (B4)

Conforme citado anteriormente, estruturas padronizadas tendem a possuir dimensionamento em excesso se comparados à estruturas pensadas em termos de performance. No entanto, isto traz um benefício a médio prazo: a redução nos custos de reformas, uma vez que tem-se por exemplo maiores espessuras de chapa, permitindo um intervalo de tempo maior até que a corrosão natural do meio torne a espessura real crítica. Como forma de mensurar este benefício, este trabalho sugere o índice abaixo, que compara os fatores de segurança das equações (6.1), (6.14) e (6.16) da estrutura original e da estrutura da proposta em questão, adotando um desconto de até 10%, baseado na diferença entre o somatório destes fatores de segurança:

$$B4 = f\left(\frac{FS_{\text{novo}} + FSpl_{\text{novo}} + Fst'_{\text{novo}}}{FS_{\text{orig}} + FSpl_{\text{orig}} + Fst'_{\text{orig}}}\right) \quad (7.9)$$

Tabela 7.4 - Resumo das Equações de Custo

Descrição	Equação
Custos Estruturais (C1)	$C1 = \text{Peso}_{\text{CLISA}} * 2600 + \text{Peso}_{\text{CCorr}} * 4600 + \text{Peso}_{\text{perfil}} * 2900 + \text{Peso}_{\text{Tub}} * 6900$
Custos de Mão de Obra e Soldagem (C2)	$C2 = \text{Peso}_{\text{TOTAL}} * 150 * 30 + \text{Msol} * 30$
Custo de acabamentos e pintura (C3)	$C3 = \text{Peso}_{\text{TOTAL}} * (73,69 + 37,77 + 415,56 + 190,38 + 292,73)$
Custo de logística (C8)	$C8 = \frac{D_{\text{peso}} * C_{\text{frete}} * N_{\text{viag}}}{N_p}$
Índice de redução de custo de aço (B1)	$B1 = f(\text{Peso}_{\text{TOTAL}}, \text{desc})$
Índice de redução de HH (B2)	$B2 = f(N_{\text{painéis}}, \text{desc})$
Índice de redução de projeto	$B3 = f(N_{\text{tipos-painéis}}, C6)$
Índice de aumento da vida útil (B4)	$B4 = f\left(\frac{FS_{\text{novo}} + FS_{\text{pl}_{\text{novo}}} + Fst'_{\text{novo}}}{FS_{\text{orig}} + FS_{\text{pl}_{\text{orig}}} + Fst'_{\text{orig}}}\right)$

No capítulo 8 apresentam-se as aplicações realizadas.

8 APLICAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas três aplicações que ilustram a metodologia proposta para a obtenção das funções de custo em projetos navais. Na primeira são analisadas cinco diferentes configurações para um painel presente em uma barcaça para transporte de líquidos que navega na Bacia do Sudeste, que representa uma parcela da região de carga da barcaça. Nesta aplicação são considerados somente os esforços relativos à pressão hidrostática na embarcação e parâmetros geométricos, não sendo considerados os benefícios da padronização.

Na segunda aplicação são incluídos os esforços devido às ondas, que distribuem-se diferentemente em cada região da viga navio, permitindo diferentes projetos em cada região. Utilizando esta nova variável diferentes níveis de padronização *intra navio* são propostos para avaliar seu efeito na função custo.

A terceira aplicação estende para uma frota inteira de embarcações os efeitos da padronização, permitindo discutir de forma mais ampla seus resultados e viabilidade econômica.

Nas duas primeiras aplicações o estudo é desenvolvido nas seguintes etapas:

Etapa 1: Verificação estrutural das configurações propostas utilizando as metodologias de cálculo apresentadas no Capítulo 6;

Etapa 2: Determinação da análise de custo empregando as equações apresentadas no Capítulo 7;

Etapa 3: Obtenção de uma função custo exponencial empregando o algoritmo de regressão SLAW[®] apresentado no capítulo 5 , ajustando os valores de custo obtidos na etapa 2;

Etapa 4: Discussão da função obtida na etapa 3 identificando os principais parâmetros na função custo.

8.1 Aplicação 1 - Função custo em uma estrutura naval considerando os esforços devido à pressão hidrostática

Nesta aplicação analisa-se parte da estrutura de uma barcaça de navegação interior para o transporte de líquidos. Considera-se um painel existente na região do fundo duplo da barcaça, a região em questão é demonstrada novamente na figura Figura 8.1.

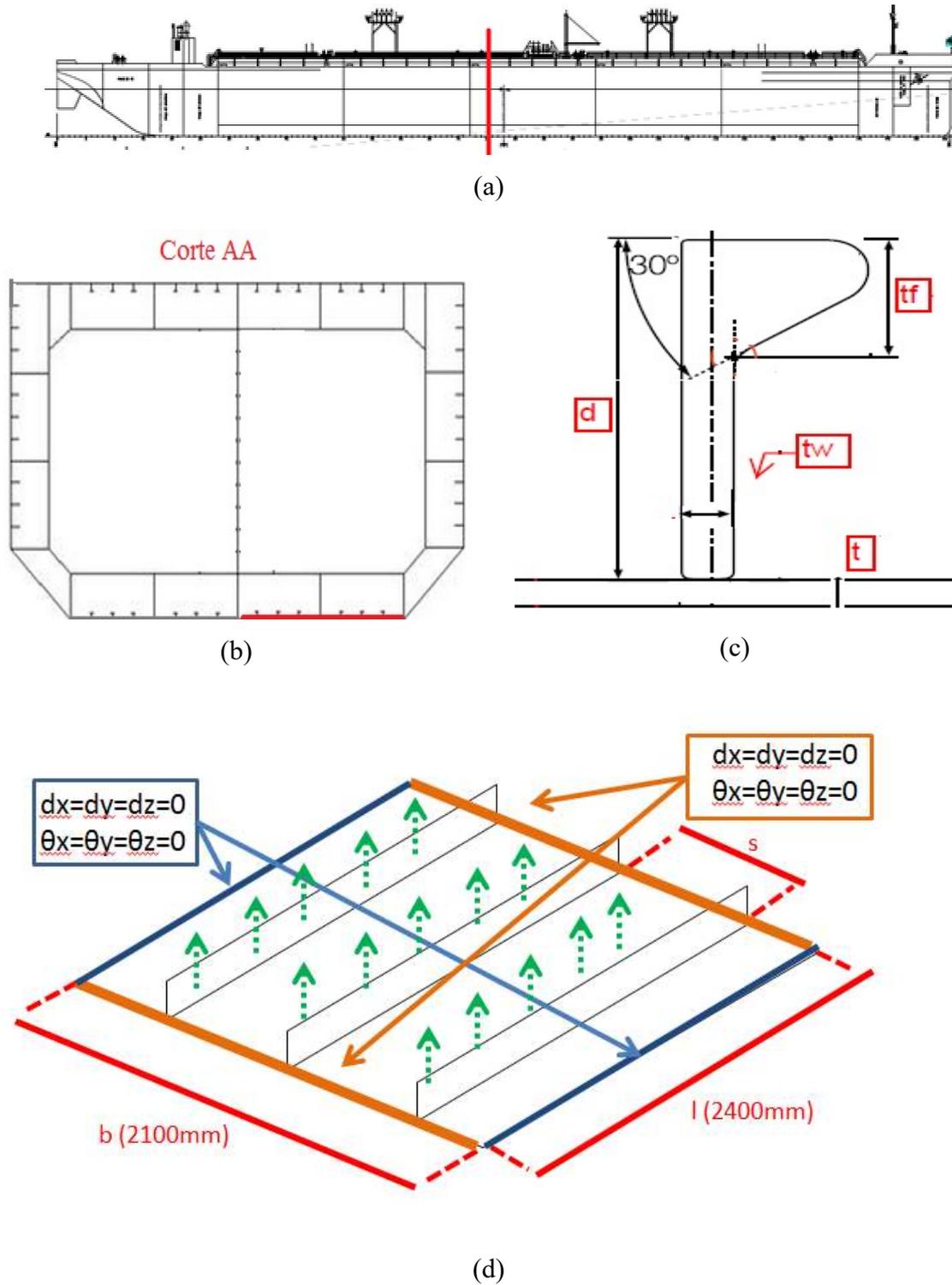


Figura 8.1 – (a) Posição da região de estudo posição na barça, (b) corte transversal, (c) dimensões do perfil e (d) dimensões e restrições do painel na simulação.

Pode-se verificar nesta estrutura algumas dimensões importantes, como o espaçamento “span” (s) que é a distância entre reforçadores longitudinais, a largura da chapa (b) e a

distância entre gigantes (l), que são as estruturas de maior rigidez aonde considera-se que as chapas e reforçadores ficam apoiados. Na mesma figura são indicadas as condições de contorno adotadas para realizar o modelo estrutural do painel a ser analisado e a direção do carregamento adotado (em verde) que será explicado posteriormente.

Algumas dimensões do painel são fixadas, de forma a garantir a mesma condição de carregamento para todas as propostas a serem avaliadas e não descaracterizar o módulo original. Estas dimensões são:

- Distância entre gigantes (l): 2400 mm;
- Largura total (distância entre a quilha e o costado): 2100 mm;

A placa é composta por perfis tipo bulbo e chapas lisas, as vinculações são consideradas como engastadas nas fronteiras anterior e posterior (em marrom), bem como nas fronteiras a bombordo e a boreste (em azul), estas são as condições comumente utilizadas conforme já citado por Kaleff (2012).

Serão avaliadas diversas alternativas possíveis para a estrutura estudada, todas submetidas ao mesmo carregamento de pressão uniformemente distribuída (P_r) na parte inferior da chapa. Esta pressão é determinada em função do calado da embarcação, ou seja, a distância vertical entre a linha d'água e o ponto extremo inferior do casco, conforme a equação abaixo:

$$P_r = \rho \times g \times h \quad (8.1)$$

Onde:

- ρ = densidade da água
- g = aceleração da gravidade
- h = calado da embarcação

As alternativas propostas trabalham com a variação das demais dimensões existentes na estrutura, estas dimensões são citadas abaixo (o espaçamento de perfis pode ser visto na figura Figura 8.1 (d) e as demais dimensões na figura Figura 8.1 (c)):

- Espessura das chapas (t);
- Espaçamento entre perfis (s);
- Altura dos perfis (d);
- Espessura da flange dos perfis (t_f);
- Espessura da alma dos perfis (t_w);

Para elaborar as alternativas a serem propostas, buscou-se primeiramente levar em conta a diversidade de componentes existentes na embarcação original, buscando reduzir ao máximo esta diversidade aplicando o mesmo tipo de perfil em toda a embarcação. Conforme as teorias de padronização das seções anteriores, reduzir a variabilidade de componentes trará grandes benefícios, para tal é necessário primeiramente fazer um levantamento de todos os diferentes tipos de perfis e chapas existentes em toda a embarcação, bem como suas quantidades, este procedimento foi realizado sobre os dados da barça em questão e são apresentados no Apêndice D.

Na Tabela 8.1 se apresentam as cinco configurações propostas para a construção do painel estudado:

Tabela 8.1 - Propostas elaboradas

Proposta	t [mm]	Perfil	s [mm]
		(d x tw x tf) [mm]	
Original	9,5	120 x 8 x 17.7	650
1	9,5	160 x 8 x 22.2	650
2	9,5	160 x 8 x 22.2	800
3	7,9	160 x 8 x 22.2	650
4	9,5	120 x 8 x 17.7	400
5	7,9	120 x 8 x 19,7	400
6	6,35	160 x 8 x 19,7	1000

Com as propostas acima, inicia-se a etapa 1, conforme indicado no início deste capítulo, verificando estruturalmente as configurações propostas.

Etapa 1: As propostas citadas na Tabela 8.1 são verificadas utilizando o método híbrido e o método naval apresentados no capítulo 6.

Na figura Figura 8.2 tem-se uma das estruturas simuladas, nela são marcadas as regiões onde ocorreram os maiores valores de tensão normal de tração (σ) pela letra A e tensão cisalhante (τ) pela letra B. Na maioria dos casos, as maiores tensões normais foram de tração na flange superior dos reforçadores, isto se dá pela existência de flexão da chapa, forçando os reforçadores a acompanhar o movimento da mesma, uma vez que estão soldados nela. Em relação às tensões de cisalhamento, seus pontos críticos ocorreram nas regiões onde tem-se a interface entre os reforçadores e as restrições impostas pelas condições de contorno, este é o comportamento esperado uma vez que nesta região tem-se a estrutura mais resistente do modelo (o reforçador) recebendo uma restrição de movimento.

Para a maioria das propostas, as regiões em questão não foram alteradas, isto é explicado pelo fato que, apesar das diferentes configurações, a disposição dos reforçadores não foi alterada, mantendo o perfil de tensões similar em todos os casos.

Em alguns casos, foram obtidas tensões de compressão na chapa, na região próxima à base dos perfis (marcado em laranja na imagem acima), isto se deve à flexão da chapa devido à pressão hidrostática.

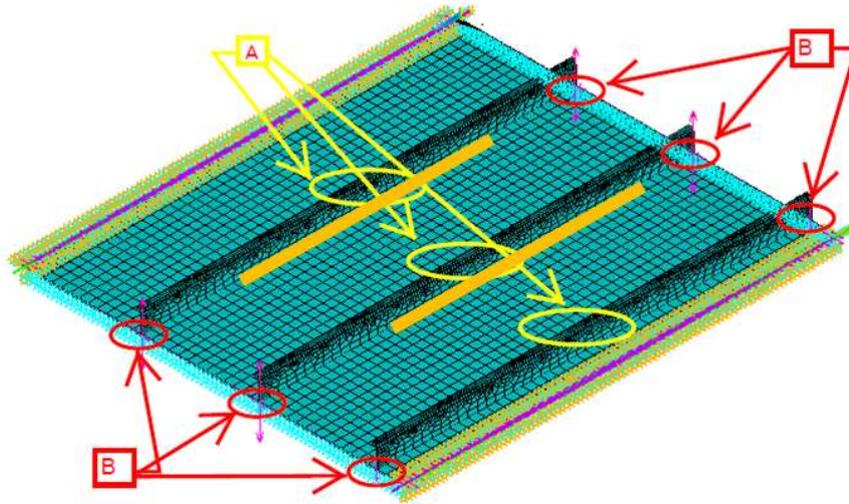


Figura 8.2 – Região das tensões críticas

Na Tabela 8.2 são mostrados os resultados das análises estruturais, todos os valores são fatores que relacionam os parâmetros calculados pelas duas metodologias: os requeridos baseados nos esforços existentes e os disponíveis baseados nas geometrias e configurações das estruturas propostas. Em relação à metodologia naval, tem-se (FSP) que representa a relação em termos do módulo resistente admissível dos perfis dividido pelo requerido, (FSPI) que representa a relação em termos da pressão admissível das chapas dividida pela pressão requerida e (FSt') que relaciona a espessura real da chapa pela requerida. Já em relação a metodologia híbrida (γ_{li}) representa a relação entre a tensão de projeto (normal, $i=\sigma$, ou de cisalhamento $i=\tau$) dividida pela resistência.

Tabela 8.2 - Análises estruturais

CASO	FSP = Zadm/Zreq	FSP1 = Padm/Preq	FSt' = t'/treq	$\gamma\sigma =$ σ_{sd}/x^*f_y	$\gamma_{alt} =$ $\tau_{sd}/0,6^*x^*f_y$
Original	1,40	9,30	3,05	1,04	1,25
1	1,60	9,30	3,05	1,39	1,31
2	1,30	6,10	2,48	1,15	1,04
3	1,60	6,40	3,05	1,45	1,13
4	1,60	24,50	4,95	1,10	1,51
5	2,50	17,00	4,95	2,19	1,42
6	0,99	0,87	0,93	1,16	0,97

Como pode ser visto, o caso 6 foi reprovado segundo quatro dos índices medidos, sendo assim, este caso não será incluído na análise do SLAW, uma vez que esta estrutura não suporta as solicitações previstas.

Etapa 2: As propostas geradas são então avaliadas com as equações de custo citadas na seção 7, os valores obtidos em cada uma destas equações são então somados, gerando a equação abaixo que determina o custo de cada proposta nesta aplicação, verificar na tabela 7.4 o que representa cada um dos custos aqui indicados:

$$C_I[\text{R\$}] = C1 + C2 + C3 \quad (8.2)$$

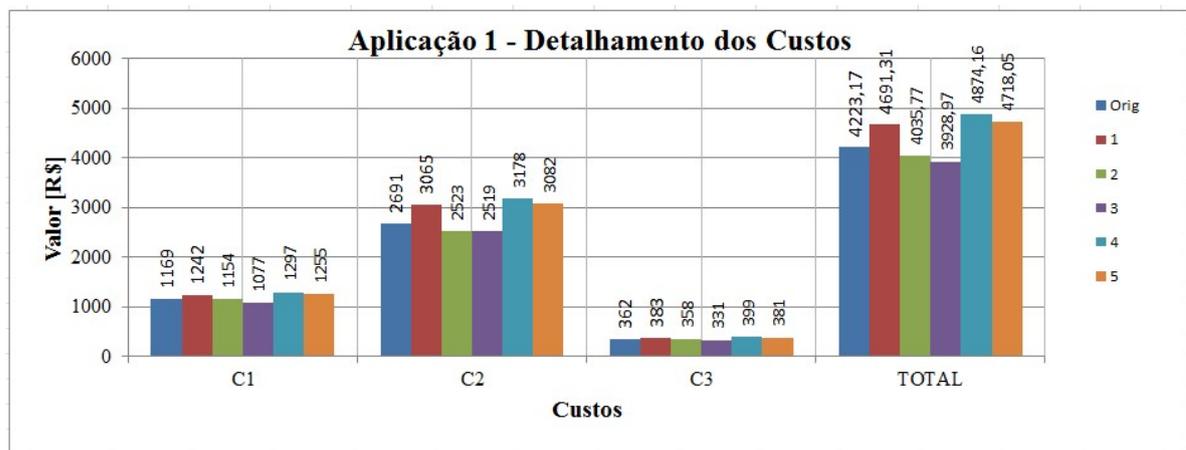


Figura 8.3 – Aplicação 1: Dados da etapa 2 (análise de custo), para identificar o significado de cada item , vide Tabela 7.4)

Etapa 3: Nesta etapa é realizada a regressão que permite determinar com o auxílio do programa SLAW® uma função de custo para esta aplicação, a qual terá a seguinte forma:

$$C = k \times a_1^{x1} \times a_2^{x2} \times a_3^{x3} \times a_4^{x4} \dots \quad (8.3)$$

Para isto é necessário definir os parâmetros que serão utilizados como dados de entrada no algoritmo de regressão, as escolhas para esta aplicação estão apresentadas na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 - Dados para entrada no SLAW®

Proposta	b [mm]	s [mm]	l [mm]	h [mm]	tw [mm]	tf [mm]	t [mm]	Custo [R\$]
Original	2100	650	2400	120	8	17,7	9,5	4223,17
1	2100	650	2400	160	8	22,2	9,5	4691,31
2	2100	800	2400	160	8	22,2	9,5	4035,77
3	2100	650	2400	160	8	22,2	7,9	3928,97
4	2100	400	2400	120	8	17,7	9,5	4874,16
5	2100	400	2400	160	8	22,2	7,9	4718,05

Com a inserção destes dados no algoritmo, é possível gerar uma função de potência capaz de estabelecer uma função custo para a configuração dada, bem como indicar quais parâmetros são mais relevantes. Deve-se inserir também a Tabela 8.4, que contém as unidades dos parâmetros a serem introduzidos:

Tabela 8.4 - Matriz unidades

C	b	s	l	h	tw	t	
R	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
1	0	0	0	0	0	0	R
0	1	1	1	1	1	1	mm

Através do algoritmo de regressão SLAW® foi possível obter a seguinte função de custo:

$$C[\text{R\$}] = 1,07 x b^{0,47} x s^{-0,36} x l^{0,48} x h^{0,21} x tw^{0,13} x tf^{0,11} x t^{0,75} \quad (8.4)$$

Na Tabela 8.5 tem-se o comparativo do resultado total em termos de custos obtido pela análise econômica e pela equação acima para as cinco configurações propostas, como é possível verificar, o erro relativo é menor que 10% em todas as propostas:

Tabela 8.5 - Comparativo dos Resultados

Proposta	Custo [R\$]	SLAW [R\$]	Erro
Original	4223,17	4 147,66	1,8%
1	4691,31	4 520,00	3,8%
2	4035,77	4 186,87	-3,6%
3	3928,97	3 935,99	-0,2%
4	4874,16	4 960,71	-1,7%
5	4718,05	4 707,55	0,2%

Etapa 4: Nesta etapa discutem-se os valores obtidos na equação de custo exponencial, buscando compreender quais parâmetros são mais relevantes.

Sem dúvida, a espessura da chapa (t), o comprimento e a largura da chapa (b e l) são os parâmetros que mais influenciam o custo, por outro lado a espessura da alma do reforçador (t_w), da alma (t_f) e a altura do reforçador (h), são de menor importância para a definição do custo.

Desta forma, o projetista já consegue ter um indicador que o auxilia na decisão sobre qual configuração propor, uma vez que pode-se esperar um custo inferior ao utilizar perfis mais robustos em detrimento de chapas mais grossas. Esta é a principal vantagem da utilização deste tipo de método, dar subsídios ao projetista sobre como tornar a sua estrutura mais barata dentro das necessidades mecânicas apresentadas.

8.2 Aplicação 2: Função custo de uma estrutura naval considerando os esforços devido a pressão hidrostática e aos efeitos de onda em diferentes pontos da viga navio:

Nesta segunda aplicação, estende-se a análise, levando em conta os carregamentos longitudinais devido às ondas por toda a extensão da embarcação, bem como um intervalo de 2 anos de operação.

Okumoto (2009) determina o cálculo dos esforços relativos às ondas que uma embarcação suporta enquanto navega. Estes esforços ocorrem devido às condições de alquebramento e tosamento, que ocorrem de forma cíclica durante a navegação. Na figura Figura 8.4 mostra-se a embarcação em alquebramento, onde é possível perceber que a parte inferior do casco apresenta uma tensão normal de compressão (demonstrada em vermelho) e a parte superior apresenta uma tensão normal de tração (representada em azul), é representada também a pressão hidrostática (através das setas em verde), já na figura Figura 8.5 tem-se a embarcação em tosamento, aonde as condições de tensão normal invertem-se, em ambas as figuras há também duas vigas que demonstram cada uma destas condições.

Como pode ser visto, o alquebramento ocorre quando a meia nau (ponto médio da embarcação) encontra-se na crista de uma onda, enquanto o tosamento ocorre quando popa e proa encontram-se nas cristas das ondas. Estes esforços alternam-se durante toda a navegação, gerando um desequilíbrio dos esforços existentes, sendo necessário avaliá-los adequadamente durante o projeto.

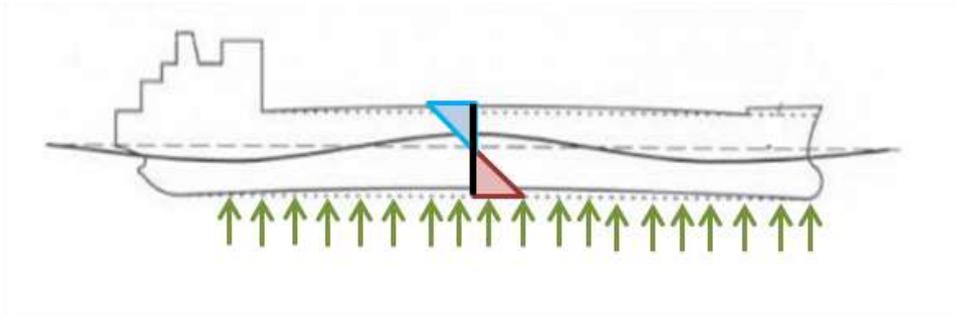


Figura 8.4 - Embarcação sob alquebramento

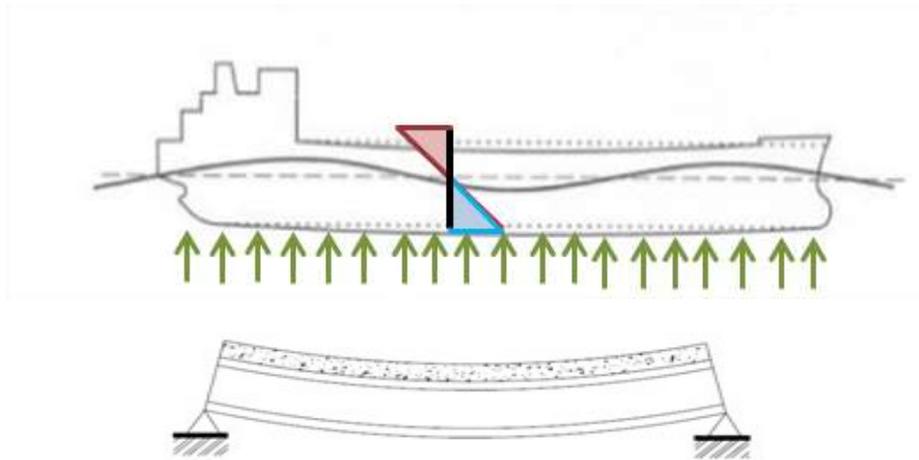


Figura 8.5 - Embarcação sob tosamento

O dimensionamento destes esforços pode ser determinado através do equacionamento proposto pela Associação Internacional de Sociedades Classificadoras [IACS 2008] como apresentado abaixo:

$$M_{w+} = 0,19 \times c_1 \times c_2 \times L_1^2 \times B_o \times C_b' \quad (8.5)$$

$$M_{w-} = 0,11 \times c_1 \times c_2 \times L_1^2 \times B_o \times (C_b' + 0,7) \quad (8.6)$$

Onde:

c_1 = Parâmetro relativo ao comprimento da embarcação, seguindo as equações abaixo:

$$c_1 = 10,75 - \left(\frac{300 - L_1}{100} \right)^{1,5}, \text{ para } L \leq 300 \text{ m} \quad (8.7)$$

$$c_1 = 10,75, \text{ para } 300\text{m} \leq L \leq 350 \text{ m} \quad (8.8)$$

$$c_1 = 10,75 - \left(\frac{L - 350}{100} \right)^{1,5}, \text{ para } L \geq 350 \text{ m} \quad (8.9)$$

c_2 = Parâmetro relativo a distribuição dos esforços ao longo da embarcação, conforme a Figura 8.6:

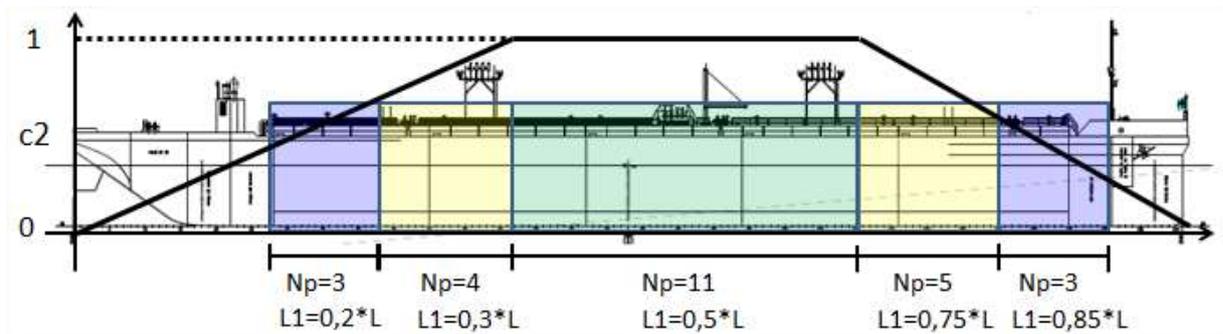


Figura 8.6 - Distribuição do fator c_2 e número de painéis por região (L_1 =ponto médio)

L_1 = Percentual de comprimento da embarcação, em metros

B_0 = Boca da embarcação, em metros

C'_b = Coeficiente de bloco, calculado conforme abaixo:

$$C'_b = \frac{V}{L_{wl} \times B_0 \times T} \quad (8.10)$$

Onde:

L_{wl} = Comprimento da embarcação na linha d'água;

T = Calado da embarcação.

V = Volume da carena, ou seja, da região do casco que fica submersa.

Como forma de simplificação, adotou-se que a região de $L_1=0,15*L$ a $L_1=0,25*L$ seria dimensionada para $L_1=0,2*L$, e assim sucessivamente, desta forma os pontos $L_1=0,2*L$ a $L_1=0,85*L$ são os pontos médios das regiões marcadas.

Após analisar o equacionamento acima descrito, é possível prever diferentes esforços em cada região da embarcação, o que permitiria diferentes dimensionamentos para cada uma destas regiões.

Nesta aplicação se fará uma análise de diferentes situações de projeto, partindo de uma solução completamente sem padronização, onde cada seção da embarcação terá seu dimensionamento conforme os esforços envolvidos, até um caso extremo, onde toda a região de carga da embarcação possuirá a mesma seção, dimensionada pela região de maior solicitação, sendo completamente padronizada.

Conforme descrito na seção 4.1.3, são adotados três níveis de padronização *intranavio*, para esta aplicação será utilizada a padronização *intranavio* total, onde tem-se o mesmo painel em todo o corpo paralelo, e a padronização *intranavio* intermediária, com três diferentes dimensionamentos de painéis, dependendo da região onde os mesmos encontram-se.

Ao final, tem-se uma discussão sobre os resultados e os custos existentes chegando-se então a diversas funções custo que levam em conta os custos de padronização, cada uma com sua faixa de erro de acordo com os dados utilizados.

O painel a ser analisado será o mesmo da aplicação 1, porém desta vez o painel será avaliado nas diferentes posições da embarcação, conforme os diferentes níveis de esforço existentes.

Geometria e determinação dos carregamentos: A barcaça para líquidos estudada neste trabalho possui as seguintes dimensões:

$$L_{wl} = 89,96 \text{ m}$$

$$B_o = 15,5 \text{ m}$$

$$T = 4,5 \text{ m}$$

$$L = 94,1 \text{ m}$$

Além disto, está disponível a informação de projeto dos valores máximos de alquebramento e tosamento, de forma que não será necessário determiná-los, sendo necessário somente avaliar os esforços para as regiões aonde o fator c_2 é diferente de um. Na Tabela 8.6 tem-se os valores máximos citados.

Tabela 8.6 – Esforços máximos devido às ondas.

MOMENTOS FLETORES TOTAIS EM ONDA	
TOSAMENTO À MEIA NAU (kN.m)	110 000
ALQUEBRAMENTO À MEIA NAU (kN.m)	65 000

De acordo com a figura Figura 8.6, os esforços referentes ao tosamento e alquebramento da embarcação possuem níveis de intensidade dependendo do ponto da embarcação a ser analisado. Desta forma, calcula-se o momento real, que relaciona o momento fletor com o fator c_2 , conforme a equação abaixo:

$$M_{real} = M_{m\acute{a}ximo} \times c2 \quad (8.11)$$

Com os esforços determinados, é necessário verificar como estes esforços atuam na região em questão. Lembrando que trata-se de um painel pertencente ao fundo duplo da embarcação representado na figura Figura 8.1, estes esforços traduzem-se em forças de tração no caso de tosamento ou compressão no caso de alquebramento.

Pode-se perceber pela Tabela 8.6, que os maiores esforços são sempre os de tosamento, no entanto analisando a figura Figura 8.4, é possível verificar que o efeito combinado da pressão hidrostática e do alquebramento, gerando uma compressão na chapa serão mais nocivos, sendo estes os esforços a serem avaliados.

Para o cálculo desta tensão de compressão, adota-se a equação abaixo:

$$\sigma_x = M_{real} \times \frac{I_{se\c{c}ão}}{y_{se\c{c}ão}} \quad (8.12)$$

Onde:

$I_{se\c{c}ão}$ = Momento de inércia da seção completa, ou seja, da caverna como um todo; em mm^4

$y_{se\c{c}ão}$ = Coordenada do centro de gravidade da seção em relação ao eixo y; em mm

Para o cálculo destes parâmetros, criou-se um modelo CAD no software Solidworks®, contemplando os detalhes dos perfis e chapas, conforme pode ser visto na figura Figura 8.7, é importante notar que trabalhou-se com metade da seção, dada a simetria da mesma:

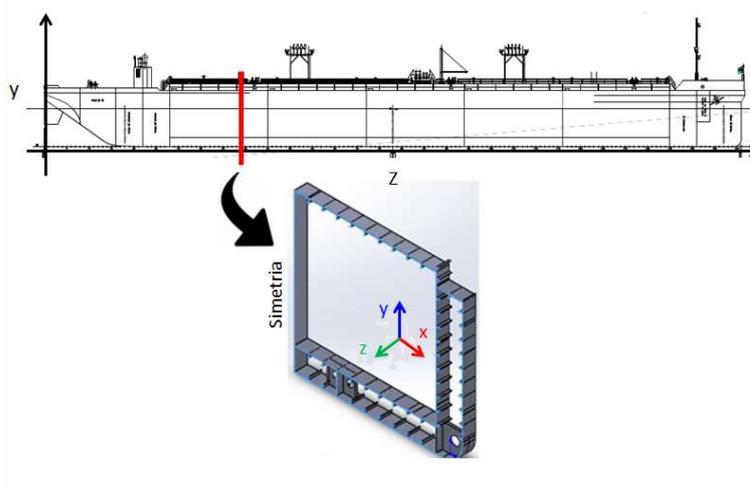


Figura 8.7 - Seção mestra completa, regiões de análise e posição na embarcação em vermelho (centro de gravidade destacado ao centro)

Os resultados para o momento de inércia da seção e seu centróide são demonstrados na Tabela 8.7:

Tabela 8.7 - Propriedades da seção

Momento de Inércia Seção ($I_{seção}$)	$3,2 \times 10^{12} mm^4$
Centróide Seção ($y_{seção}$)	3401 mm

Conforme dito anteriormente, juntamente aos esforços devido à compressão citados acima, serão considerados os esforços devido à pressão hidrostática, calculado conforme descrito na aplicação 1.

Propostas geradas: Baseado nos diferentes esforços para cada região da embarcação conforme a figura Figura 8.6, serão avaliadas as seções transversais relativas à $L1=0,2*L$; $0,3*L$ e $0,5*L$, estas são marcadas em azul, amarelo e verde respectivamente na figura Figura 8.6, onde pode-se verificar também o número de painéis em cada região. As propostas têm índices 1, indicando que são derivadas da proposta 1 na primeira aplicação, tem-se a proposta 1T, que trata da padronização *intranavio* total, ou seja, uma mesma configuração é adotada para todo o corpo paralelo, e a padronização 1I, que trata da padronização *intranavio* intermediária, ou seja, três diferentes configurações, para as diferentes regiões da embarcação. A figura Figura 8.8 apresenta o fluxograma de forma a facilitar a compreensão:

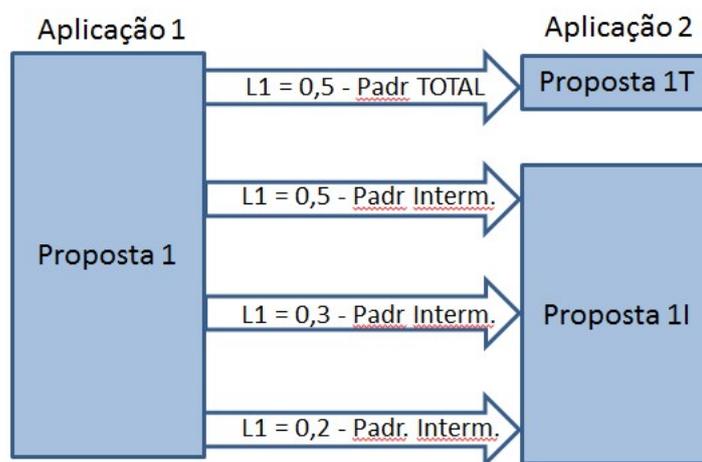


Figura 8.8 - Fluxograma das propostas - Aplicação II

Na Tabela 8.8 são apresentadas as propostas geradas, que seguem os conceitos de padronização *intra navio* total e intermediária definidos na revisão bibliográfica. Há aqui, uma primeira opção, onde somente uma configuração em todo o corpo paralelo (padronização *intra navio* total) baseada na região de maiores esforços ($L1=0,5 \times L$) será gerada, e uma segunda opção aonde três diferentes configurações, uma para a região central, uma para a

região intermediária e uma para as extremidades ($L_1=0,5 \times L$; $0,3 \times L$ e $0,2 \times L$ respectivamente) serão geradas. Na última coluna apresentam-se o número de perfis por região, conforme descrito na figura Figura 8.6. É importante citar aqui que, dada a simetria da curva referente ao fator c_2 , os esforços relativos à região $L_1=0,75$ e $L_1=0,85$ são equivalentes aos existentes em $L_1=0,3$ e $L_1=0,2$, de forma que o dimensionamento será o mesmo. Além dos parâmetros da Tabela 8.8, tem-se ainda as dimensões fixas do painel, que são mantidos os mesmos da aplicação 1: 2400mm de comprimento (l) e 2100 mm de largura (b), conforme pode ser visto na figura Figura 8.1.

Tabela 8.8 - Propostas elaboradas na aplicação II

Proposta	Região (L)	Nível Padronização	s [mm]	Perfil (d x tw) [mm x mm]	t [mm]	Npainéis
1T	0,5	T	650	160 X 8	9,5	26
1I	0,5	I	650	160 X 8	9,5	11
	0,3	I	650	140 X 9	7,9	9
	0,2	I	650	120 X 8	6,35	6
2T	0,5	T	800	160 X 8	9,5	26
2I	0,5	I	800	160 X 8	9,5	11
	0,3	I	800	160 X 8	6,35	9
	0,2	I	800	140 X 9	6,35	6
3T	0,5	T	650	160 X 8	7,9	26
3I	0,5	I	650	160 X 8	7,9	11
	0,3	I	650	160 X 8	6,35	9
	0,2	I	650	160 X 8	6,35	6
4T	0,5	T	400	120 X 8	9,5	26
4I	0,5	I	400	120 X 8	9,5	11
	0,3	I	400	120 X 8	6,35	9
	0,2	I	400	120 X 8	6,35	6
5T	0,5	T	400	160 X 8	7,9	26
5I	0,5	I	400	160 X 8	7,9	11
	0,3	I	400	160 X 8	6,35	9
	0,2	I	400	120 X 8	6,35	6

Em todas as propostas, inicia-se pela padronização *intranavio* total, e seu dimensionamento ocorre na região de maiores esforços ($L_1=0,5$) e leva em conta o que foi feito na aplicação I, verificando se com os novos esforços combinados (pressão hidrostática + tensão de compressão devido ao alquebramento) ainda teria-se uma estrutura segura através dos coeficientes adotados (FSp, FSpl e FSt). Em caso positivo, esta tornava-se a configuração com o índice “T”. Em seguida tem-se a padronização *intranavio* intermediária, que contempla três diferentes dimensionamentos, um para cada região da embarcação ($L_1=0,5$, $0,3$ e $0,2$) conforme definido anteriormente.

Etapa 1: Para a verificação estrutural das propostas na Tabela 8.8, utilizou-se a metodologia naval, por ser esta mais expedita e mostrar resultados coerentes ao ser comparada à metodologia híbrida.

Para iniciar esta etapa foi necessário determinar os esforços envolvidos, que agora contemplam a pressão hidrostática agindo na chapa e as tensões de compressão devido ao aquebramento. Estas tensões dependem dos momentos reais que ocorrem em cada região da embarcação, considerando os valores da Tabela 8.6 e a equação (8.11), chega-se aos valores apresentados abaixo.

Tabela 8.9 – Momentos fletores reais da embarcação

MOMENTOS FLETORES NA EXTENSÃO DA EMBARCAÇÃO		
L1	C2	ALQUEBRAMENTO [kN.m]
0,1	0,25	16250
0,2	0,5	32500
0,3	0,75	48750
0,4 - 0,65	1	65000
0,75	0,71	46150
0,85	0,43	27950
0,95	0,15	9750
1	0	0

Aqui cabe uma discussão sobre a mudança das propriedades geométricas da seção em virtude das variações de medidas de chapas e perfis utilizados em cada proposta. De fato espera-se uma mudança nestes parâmetros, no entanto, é importante lembrar que as dimensões globais da seção em relação ao painel analisado neste trabalho são muito maiores do que as alterações propostas: tem-se uma seção com 7,5 metros de altura e 15,5 metros de largura contra modificações da ordem de milímetros em termos de espessura de chapa e perfis, o que dá subsídios para admitirmos que as alterações provocadas pelas diferentes configurações são irrelevantes.

Com os dados da Tabela 8.9 e os parâmetros de cada proposta é possível então fazer a avaliação estrutural, gerando os resultados apresentados nas Tabela 8.10 e Tabela 8.11. Na primeira tem-se os valores de cada um dos parâmetros calculados e a equação utilizada, e na segunda, os coeficientes de segurança:

Tabela 8.10 – Resultados da análise estrutural para a aplicação 2

Prop.	Reg. (L1)	σ_x (Eq.8.11) MPa]	Zreq (Eq.6.9) [mm ³]	Zadm (Eq.6.6) [mm ³]	Mpreq (Eq.6.12) [N*mm]	Mpadm (Eq.6.11) [N*mm]	treq (Eq.6.14) [mm]	Peso Aço Total [kg]
1T	0,5	69,10	55950	69718	1164	7713	3,69	12149,75
1I	0,5	69,10	55950	69718	1164	7713	3,69	11050,82
	0,3	51,80	52279	53726	1164	5872	3,52	11050,82
	0,2	34,54	49059	51989	1164	4142	3,37	11050,82
2T	0,5	69,10	68862	69718	1764	7713	4,54	11357,26
2I	0,5	69,10	68862	69718	1764	7713	4,54	9976,91
	0,3	51,81	64343	69718	1764	3794	4,33	9976,91
	0,2	34,54	59381	60034	1764	4142	4,14	9976,91
3T	0,5	69,08	55950	69865	1164	5333	3,08	10503,00
3I	0,5	69,08	55950	69865	1164	5333	3,08	8456,44
	0,3	51,81	52279	69865	1164	3794	2,97	8456,44
	0,2	34,54	49059	69865	1164	4142	2,88	8456,44
4T	0,5	69,08	34431	44250	441	7712	2,27	12642,00
4I	0,5	69,08	34431	44250	441	7712	2,27	10102,00
	0,3	51,81	32171	44250	441	3794	1,83	10102,00
	0,2	34,54	30190	44250	441	4142	1,77	10102,00
5T	0,5	69,08	49539	67753	441	5333	2,27	12088,84
5I	0,5	69,08	49539	67753	441	5333	2,27	8456,44
	0,3	51,81	44993	52179	441	5306	1,83	8456,44
	0,2	34,54	41211	46064	441	5654	1,77	8456,44

Onde σ_x é a tensão de tração ou compressão no ponto de interesse, Z_{req} e Z_{adm} são os módulos de seção requerido e admissível, MP_{req} e MP_{adm} são os momentos plásticos requeridos e admissíveis, t_{req} é a espessura requerida e Peso Aço é o peso em aço do painel.

Tabela 8.11 – Resultados da Análise Estrutural 2 - Fatores de Segurança

P	FSP (Zadm/Zreq)	FSP1 (Padm/Preq)	FSt' (t'/treq)	P	FSP (Zadm/Zreq)	FSP1 (Padm/Preq)	FSt' (t'/treq)
1T	1,25	6,62	2,57	4T	1,29	17,50	4,18
1I	1,25	6,62	2,57	4I	1,29	17,50	4,18
	1,03	5,04	2,25		1,38	8,60	3,47
	1,10	3,56	1,89		1,47	9,39	3,58
2T	1,01	4,37	2,09	5T	1,37	12,09	3,48
2I	1,01	4,37	2,09	5I	1,37	12,09	3,48
	1,08	2,15	2,19		1,16	12,03	3,47
	1,01	2,35	2,29		1,27	12,82	3,58
3T	1,25	4,58	2,57				
3I	1,25	4,58	2,57				
	1,34	3,26	2,13				
	1,42	3,56	2,20				

Onde FSP representa a relação em termos do módulo resistente admissível dos perfis dividido pelo requerido, (FSPI) representa a relação em termos da pressão admissível das chapas dividida pela pressão requerida e (FSt') que relaciona a espessura real da chapa pela requerida. Já em relação a metodologia híbrida (γ_{ali}) representa a relação entre a tensão de projeto (normal, $i=\sigma$, ou de cisalhamento $i=\tau$) dividida pela resistência.

Pode-se perceber uma grande diferença entre os valores MP_{adm} e MP_{req} , isto se dá pelo fato de que o primeiro considera os efeitos das tensões de compressão devido ao alquebramento, já o segundo só considera os efeitos da pressão hidrostática. Como esperado, o primeiros resultados de cada configuração com padronização intermediária e o resultado da padronização total (por exemplo, 1T e 1I, 2T e 2I) são idênticos, uma vez que o dimensionamento para o nível “padronização *intranavio* total” é o mesmo que o usado no nível “padronização *intranavio* intermediária” para a região onde $L1=0,5*L$, apesar de parecer repetitivo, estas propostas apresentarão diferenças na análise econômica, como será mostrado a seguir.

Ao comparar os coeficientes de segurança da região onde $L1=0,5*L$ desta aplicação com os dados da aplicação I (Tabela 8.2), pode-se perceber que tanto os relativos aos perfis como os relativos às chapas diminuem para a aplicação II, este comportamento era o esperado, uma vez que tem-se agora os esforços referentes aos momentos fletores gerando a tensão de compressão σ_x incluídos no cálculo.

Pode-se perceber coeficientes de segurança excessivamente altos nas configurações 4 e 5, demonstrando que um espaçamento entre perfis menor que o original (de 650 para 400 mm) poderia ser uma medida interessante para a redução na espessura das chapas, no entanto, este dimensionamento esbarra em uma questão prática: não é comum a existência de chapas menores que 6,35mm em componentes estruturais importantes como o casco. Desta forma, configurações com espaçamento reduzido não mostram-se interessantes a princípio.

Conforme descrito anteriormente, não é contemplada nesta aplicação a configuração 6, uma vez que ela já foi descartada ainda na aplicação 1. Todos os demais resultados foram dimensionados para buscar a melhor configuração possível dentro das possibilidades existentes em termos de perfis e chapas.

Na seção resultados deste capítulo comenta-se sobre a escolha de cada configuração, que foi baseada em um processo iterativo de acordo com os resultados dos coeficientes de segurança e das opções disponíveis para chapas e perfis.

Etapa 2: Seguindo para a segunda etapa, inicia-se a análise econômica das propostas e para tal leva-se em conta agora os benefícios da padronização e um intervalo de 2 anos de operação, gerando a equação abaixo, que incorpora os índices de benefícios citados na seção 7.1, ficando com o formato abaixo:

$$C_{II} = C1 \times B1 \times B4 + C2_A * B2 * B4 + C2_B \times B4 + C3 \times B2 + C8 \quad (8.13)$$

Onde:

$C2_A$ = Custo de HH, desconsiderando a parcela referente à soldagem

$C2_B$ = Custo de HH referente à soldagem.

Como pôde ser visto na Equação 8.13, para o parâmetro que contempla o custo em aço da embarcação ($C1$), incluiu-se os benefícios $B1$ e $B4$, uma vez que estes são relacionados diretamente ao peso da embarcação e o aumento na vida útil, respectivamente. Para o custo de mão de obra ($C2_A$), incluiu-se os benefícios $B2$ e $B4$, uma vez que tratam da curva de aprendizagem e da vida útil. A inclusão deste segundo benefício pode não parecer tão correta, porém deve-se lembrar que a redução na necessidade de substituições de chapas quando houverem reformas acabará reduzindo os custos destas reformas, justificando assim esta inclusão. Já para a segunda parte deste custo ($C2_B$) levamos em conta somente o benefício $B4$, pela mesma razão citada acima.

Para o termo $C3$, que refere-se aos custos de acabamento, entende-se que o benefício referente à redução de HH ($B2$) se relaciona com este custo, uma vez que trata-se da qualidade do trabalho produzido, que melhora com a repetição do mesmo.

Com os resultados acima, é possível definir os benefícios de cada proposta, permitindo então o cálculo do custo. Na Tabela 7.1 apresentam-se os valores de benefícios calculados e o resultado da aplicação da equação 8.13. Esta tabela demonstra os níveis de padronização e os valores adotados para cada um dos benefícios, precedidos pelos parâmetros relevantes para cada um destes benefícios. Complementarmente tem-se também no Apêndice C um gráfico com a evolução de cada custo e dos benefícios.

No caso de $B1$, considera-se a relação entre o peso total de cada configuração com o desconto adotado conforme a figura Figura 2.4, que demonstrou a diferença no custo unitário ao maximizar-se a quantidade em aço comprada.

Para $B2$ tem-se a quantidade de painéis idênticos para cada proposta, ou seja, verifica-se a extensão de cada uma das regiões (como $L=0,5$ ou $L=0,75$) e atribui-se a quantidade de painéis referentes a esta extensão, relaciona-se então este número com a figura Figura 2.3 determinando assim o fator multiplicador na quantidade de horas necessárias, este fator, que é

sempre menor que 1, reduz a quantidade de horas necessárias e, por sua vez, reduz o custo total.

Para B3 consideram-se os diferentes projetos necessários para cada proposta: 2 níveis de padronização são utilizados, a padronização total que possui somente um tipo de painel e por extensão somente um projeto e a padronização intermediária, que possui 3 tipos de painéis e projetos. A atribuição deste termo B3 se dá pela multiplicação do número de projetos pelo custo de projeto, ou seja, para um caso onde tem-se 3 tipos de painéis, tem-se consequentemente 3 projetos, logo o custo de projeto será multiplicado por 3.

Em B4 consideram-se os benefícios inerentes ao superdimensionamento de chapas e perfis que por ventura possa ocorrer em configurações mais padronizadas. Como dito na seção 4.1.1, estes excessos trazem um benefício no momento das reformas, diminuindo os componentes estruturais que precisarão ser substituídos.

Na Tabela 8.12 pode-se perceber um maior custo nas propostas que levavam em conta a região onde $L=0,5$ e padronização total se comparadas ao custo da padronização intermediária nestas mesmas regiões, isto indica que para uma única embarcação, em um intervalo de operação de 2 anos somente, os benefícios da padronização considerados aqui não mostram-se suficientemente interessantes para que se sugira esta abordagem. Na aplicação 3 será feita uma abordagem mais abrangente destes parâmetros, de forma a buscar elucidar melhor esta questão.

Tabela 8.12 - Resultados da análise econômica para a aplicação II

PROPOSTA	Reg. (L1)	Peso Total [kg]	B1	N Painéis	B2	N tipos de painéis	B3	Eq 7.13	B4	C [R\$]
1T	0,5	12149,75	3,5%	26	0,63	1	1	1,01	1%	3639,80
1I	0,5	11050,82	3,5%	11	0,68	3	3	1,01	1%	3554,91
	0,3	11050,82	3,5%	9	0,70	3	3	0,85	0%	3144,83
	0,2	11050,82	3,5%	6	0,74	3	3	0,65	0%	2725,97
2T	0,5	11494,59	3,5%	26	0,63	1	1	0,76	0%	3110,25
2I	0,5	11357,26	3,5%	11	0,69	3	3	0,76	0%	2994,84
	0,3	9976,91	3,5%	9	0,71	3	3	0,57	0%	2257,91
	0,2	9976,91	3,5%	6	0,71	3	3	0,59	0%	2267,37
3T	0,5	9976,91	3,5%	26	0,63	1	1	0,86	0%	4304,85
3I	0,5	10503	2,0%	11	0,69	3	3	0,86	0%	2680,3
	0,3	8456,45	2,0%	9	0,71	3	3	0,7	0%	2335,4
	0,2	8456,45	2,0%	6	0,71	3	3	0,74	0%	2335,4
4T	0,5	8456,45	3,5%	26	0,63	1	1	2,3	10%	3721,56
4I	0,5	12642	2,0%	11	0,69	3	3	2,3	10%	3789,28
	0,3	10102	2,0%	9	0,71	3	3	1,4	10%	3052,75
	0,2	10102	2,0%	6	0,71	3	3	1,3	10%	3052,75
5T	0,5	12088,84	3,5%	26	0,63	1	1	1,22	10%	3516,79
5I	0,5	8456,44	2,0%	11	0,69	3	3	1,22	10%	2998,99
	0,3	8456,44	2,0%	9	0,71	3	3	1,61	10%	2713,27
	0,2	8456,44	2,0%	6	0,71	3	3	1,71	10%	2691,62

Etapa 3: Nesta terceira etapa procura-se obter uma função custo através de uma lei de potência, utilizando o algoritmo de regressão SLAW[®].

Com estes dados tem-se condições de gerar uma função de potência que permita prever este custo e auxiliar o projetista na escolha da melhor configuração.

Dada a grande variedade de informações geradas nas análises estrutural e econômica, é necessário avaliar quais são os parâmetros necessários, bem como o nível de erro de cada função proposta.

Inicialmente buscou-se trabalhar sempre com parâmetros dimensionais, ou seja, parâmetros que possuam unidades, desta forma, excluem-se da análise do SLAW os dados referentes aos coeficientes de segurança e aos benefícios.

Ainda assim, tem-se uma grande quantidade de dados disponíveis, de forma que várias tentativas poderiam ser elaboradas. Além disto, tem-se os diferentes resultados da análise econômica para cada dimensionamento dos casos de padronização intermediária, de forma a

contornar este problema, foram calculadas as médias ponderadas (y^*) destes resultados em função do número de painéis, conforme a equação abaixo:

$$y^* = \frac{y_1}{Np_1} + \frac{y_2}{Np_2} + \frac{y_3}{Np_3} \quad (8.14)$$

Onde * indica tratar-se da média ponderada, y_1 a y_3 são os valores de cada resultado das análises estrutural e econômica, e Np_1 a Np_3 são o número de painéis, conforme a Tabela 8.8.

Desta forma, os resultados disponíveis para implementação no SLAW são apresentados abaixo, onde os mesmos foram divididos em dois grupos por questões de espaço.

Tabela 8.13 - Dados Slaw Aplicação II (“*” indica tratar-se da média ponderada)

	C* [R\$]	b* [mm]	l* [mm]	Mreal* [N*mm]	s* [mm]	d* [mm]	tw* [mm]
1T	3639,80	2100	2400	6,50E+10	650,00	160,00	8,00
1I	3221,67	2100	2400	5,19E+10	650,00	143,85	8,35
2T	3110,25	2100	2400	6,50E+10	800,00	160,00	8,00
2I	2571,87	2100	2400	5,19E+10	800,00	155,38	8,23
3T	4304,85	2100	2400	6,50E+10	650,00	160,00	8,00
3I	2481,32	2100	2400	5,19E+10	650,00	160,00	8,00
4T	3721,56	2100	2400	6,50E+10	400,00	120,00	8,00
4I	3364,36	2100	2400	5,19E+10	400,00	120,00	8,00
5T	3516,79	2100	2400	6,50E+10	400,00	160,00	8,00
5I	2829,16	2100	2400	5,19E+10	400,00	150,77	8,00
	t* [mm]	σ_x^* [MPa]	Zreq* [mm ³]	Zadm* [mm ³]	Mpadm* [N*mm]	Treq* [mm]	Peso Aço* [kg]
1T	9,50	69,10	55950,00	69718,00	7712,60	3,69	12149,75
1I	8,22	55,14	53089,04	60091,00	6251,69	3,56	11050,82
2T	9,50	69,10	68862,00	69718,00	7712,64	4,54	11494,59
2I	7,68	55,14	65109,81	67483,23	5532,22	4,38	10560,90
3T	7,90	69,08	55950,00	69865,00	5333,00	3,08	9976,91
3I	7,01	55,13	53089,04	69865,00	4525,42	3,00	9322,30
4T	9,50	69,08	34431,00	44250,00	7712,00	2,27	8456,45
4I	7,68	55,13	32670,00	44250,00	5531,92	2,00	11176,62
5T	7,90	69,08	49539,00	67753,00	5333,00	2,27	12088,84
5I	7,01	55,13	46043,54	57356,85	5397,73	2,00	8456,44

Diferentes tentativas de utilização destes dados foram feitas, buscando encontrar uma equação capaz de apresentar resultados com grande proximidade e com uma quantidade reduzida de parâmetros.

Abaixo tem-se a primeira equação gerada, que contempla a utilização de todos os parâmetros:

$$C_{II} = 0,9 \times b^{-1,99} \times l^{-2,03} \times M_{real}^{-0,71} \times s^{1,81} \times h^{0,23} \times tw^{11,9} \times t^5 \times \sigma_x^{4,57} \times Z_{req}^{-1,02} \times Z_a^{-0,14} \times Mp_{adm}^{-2,34} \times t_{req}^{-1,37} \times kg_{aço}^{0,64} \quad (8.15)$$

Conforme a Tabela 8.14, esta equação apresentou erro relativo na ordem de 0,05%, sendo um excelente ajuste para os dados, no entanto, pode-se perceber que trata-se de uma equação com muitos parâmetros, o que a torna de difícil aplicação e principalmente, de difícil compreensão.

Como forma de simplificá-la, fez-se um estudo dos expoentes, removendo os de valor mais baixo, uma vez que estes de acordo com o algoritmo são os de menor relevância. Abaixo tem-se a equação final, as demais encontram-se no apêndice C:

$$C_{II} = 0,01 \times s^{0,9} \times h^{5,07} \times tw^{10,68} \times t^{-0,82} \times \sigma_x^{2,63} \times Z_{req}^{-1,65} \times Z_a^{-2,77} \quad (8.16)$$

Como esperado, esta equação apresenta erro relativo superior a equação (8.15), (vide Tabela 8.14 abaixo), no entanto trata-se de uma equação mais compacta, e de fácil interpretação.

Tabela 8.14 - Resultados Slaw para a Aplicação 2

Proposta	C	SLAW 8.15	Erro	SLAW 8.16	Erro
1T	3639,80	3642,86	0,08%	3594,82	-1,25%
1I	3221,67	3224,37	0,08%	3181,38	-1,27%
2T	3110,25	3112,87	0,08%	3074,19	-1,17%
2I	2571,87	2574,03	0,08%	2740,95	6,17%
3T	4304,85	4308,46	0,08%	4157,83	-3,54%
3I	2481,32	2483,39	0,08%	2767,42	10,34%
4T	3721,56	3724,67	0,08%	4247,19	12,38%
4I	3364,36	3367,17	0,08%	3075,52	-9,39%
5T	3516,79	3519,74	0,08%	3576,95	1,68%
5I	2829,16	2831,52	0,08%	2885,19	1,94%

Para facilitar a compreensão, elaborou-se a Figura 8.9, que demonstra graficamente a evolução do erro relativo para a equação escolhida.

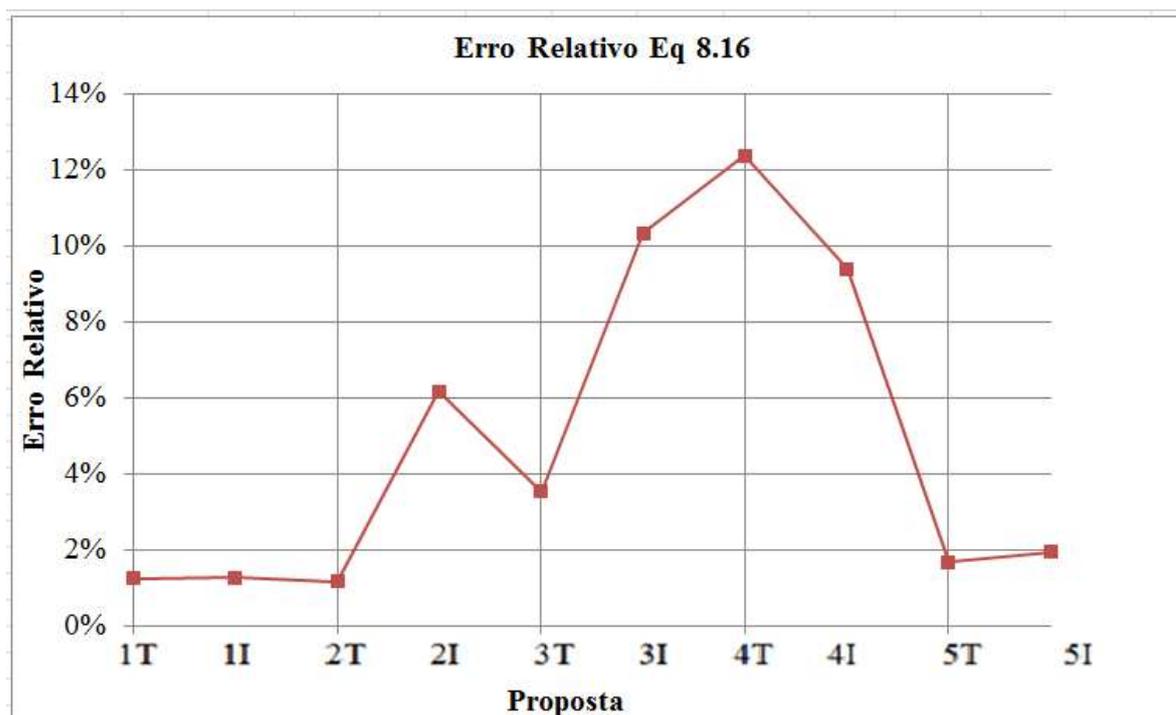


Figura 8.9 - Erro Relativo para a Aplicação 2

Etapa 4: Nesta etapa analisam-se os resultados obtidos na utilização do algoritmo SLAW[®] em relação ao custo.

A equação 8.15 apresenta grande influência dos parâmetros relativos ao perfil (d e tw), por outro lado, o parâmetro relativo à chapa (t) é o de menor influência, isto contraria os resultados da aplicação 1, demonstrando que o efeito das tensões de compressão provenientes da flexão da viga navio exigiram uma mudança nas abordagens do dimensionamento, obrigando a utilização de perfis mais robustos e permitindo a utilização de chapas mais finas. Pode-se perceber isto comparando os fatores de segurança referentes aos perfis (FSp) e chapas (FSPI) na Tabela 8.11: enquanto os referentes aos perfis foram reduzidos em todas as propostas (jamais passando de 2), os referentes as chapas atingiram grandes valores. Desta forma, a necessidade de perfis mais robustos acaba impactando de forma mais contundente no custo, enquanto as chapas, que são dimensionadas em muitos casos com a menor bitola disponível (6,35mm), acabam apresentando uma influência tímida no custo.

8.3 Aplicação 3: Função custo de uma estrutura naval com padronização de frota.

Para a aplicação 3, consideram-se os mesmos esforços, de forma que os valores obtidos na análise estrutural da aplicação anterior continuam válidos.

Nesta terceira aplicação estende-se a análise econômica em dois parâmetros, o intervalo de operação da embarcação, que passa de 2 para 10 anos e a influência da

padronização em uma maior quantidade de embarcações, leia-se 2, 10 e 30 unidades, desta forma, contemplam-se agora todos os custos existentes na embarcação e inclui-se a parcela inerente à cada painel em seu valor final.

Inicialmente calcula-se o custo unitário do painel, utilizando a equação (8.13), com este valor em mãos (C_{II}), calcula-se o custo total do navio, dependendo do nível de padronização adotado:

$$C_{Navio\ padrão} = C_{II} \times N_{painéis} + C4 \quad (8.17)$$

$$C_{Navio\ Nulo} = C_{II} \times N_{painéis} + C4 + C5 + C6 + C7 \quad (8.18)$$

A equação (8.17) é utilizada para o cálculo dos custos totais de um navio com padronização total ou intermediária, enquanto a equação 8.18 é utilizada para o cálculo do custo total em um navio com padronização nula.

Com estes dados em mãos, calcula-se o custo total da frota:

$$C_{Frota\ padrão} = C_{Navio\ padrão} \times N_{navios} + (C5 + C6 + C7) \quad (8.19)$$

$$C_{Frota\ Nulo} = C_{Navio\ Nulo} \times N_{navios} \quad (8.20)$$

Como pode ser visto, para o caso de padronização total ou intermediária, os custos de classificação, projeto e outras despesas são compartilhados por todas as embarcações, enquanto que no caso de padronização nula, cada embarcação arca com um novo custo destes tipos.

Com os valores totais de custo dos painéis gerados acima, é possível agora verificar o custo de cada painel, simplesmente dividindo os valores pelo número de painéis existentes na frota toda, como mostram as equações a seguir:

$$C_{III\ Painel\ Padrão} = \frac{C_{Frota\ Padrão}}{N_{blocos}} \quad (8.21)$$

$$C_{III\ Painel} = \frac{C_{Frota\ Nulo}}{N_{blocos}} \quad (8.22)$$

Propostas Geradas: Para esta aplicação, trabalhou-se na proposta original e na proposta 1, estendendo-a para os três níveis de padronização citados acima e para frotas de 2, 10 e 30 embarcações. Na figura abaixo tem-se um fluxograma para auxiliar no entendimento da elaboração das propostas, e na sequência tem-se uma tabela com os parâmetros das propostas geradas.

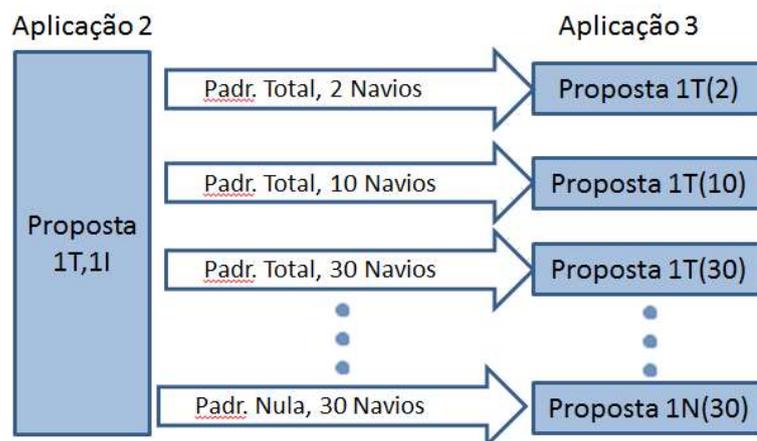


Figura 8.10 - Fluxograma propostas para a aplicação 3

Tabela 8.15 –Propostas Geradas

#	Padronização	N navios [un]	N painéis [un]	Peso Aço [kg]	L1
0	-	2	52	22989	-
1T(2)	T	2	52	24299	0,5
1T(10)	T	10	260	121497	0,5
1T(30)	T	30	780	364492	0,5
1I(2)	I	2	22	10208	0,5
	I	2	18	7310	0,3
	I	2	12	4488	0,2
1I(10)	I	10	110	51042	0,5
	I	10	90	36550	0,3
	I	10	60	22441	0,2
1I(30)	I	30	330	153128	0,5
	I	30	270	109650	0,3
	I	30	180	67324	0,2
1N(2)	N	2	22	10208	0,5
	N	2	18	7310	0,3
	N	2	12	4488	0,2
1N(10)	N	10	110	51042	0,5
	N	10	90	36550	0,3
	N	10	60	22441	0,2
1N(30)	N	30	330	153128	0,5
	N	30	270	109650	0,3
	N	30	180	67324	0,2

Como dito anteriormente, os esforços considerados nesta aplicação são os mesmos da aplicação 2, desta forma, a etapa 1 para esta aplicação não será necessária.

Parte-se então diretamente para a etapa 2. Aonde avaliam-se economicamente as propostas geradas através da aplicação das equações (8.17 à (8.22, os resultados desta avaliação são mostrados abaixo.

Tabela 8.16 - Resultados da Análise Econômica

#	L	N Navios	N painéis	Peso Aço [kg]	B1	B2	B3	B4	C [R\$]
0	-	2	52	22989	-	-	-	-	R\$ 6 022,62
1T(2)	0,5	2	52	24299	0,07	0,63	1	0,06	R\$ 5 977,92
1T(10)	0,5	10	260	121497	0,07	0,63	1	0,06	R\$ 5 025,50
1T(30)	0,5	30	780	364492	0,07	0,63	1	0,06	R\$ 4 742,75
1I(2)	0,5	2	22	10208	0,07	0,63	3	0,06	R\$ 5 890,99
	0,3	2	18	65790	0,07	0,64	3	0	R\$ 5 882,47
	0,2	2	12	4488	0,07	0,68	3	0	R\$ 5 868,89
1I(10)	0,5	10	110	51042	0,07	0,63	3	0,06	R\$ 4 938,58
	0,3	10	90	328950	0,07	0,64	3	0	R\$ 4 930,05
	0,2	10	60	22441	0,07	0,68	3	0	R\$ 4 916,41
1I(30)	0,5	30	330	153128	0,07	0,63	3	0,06	R\$ 4 779,86
	0,3	30	270	986850	0,06	0,64	3	0	R\$ 4 771,30
	0,2	30	180	67324	0,07	0,68	3	0	R\$ 4 757,66
1N(2)	0,5	2	22	10208	0	1	11	0,06	R\$ 7 095,71
	0,3	2	18	7310	0	1	9	0	R\$ 7 082,14
	0,2	2	12	4488	0	1	6	0	R\$ 7 063,63
1N(10)	0,5	10	110	51042	0	1	11	0,06	R\$ 7 095,71
	0,3	10	90	36550	0	1	9	0	R\$ 7 082,14
	0,2	10	60	22441	0	1	6	0	R\$ 7 063,63
1N(30)	0,5	30	330	153128	0	1	11	0,06	R\$ 7 095,71
	0,3	30	270	109650	0	1	9	0	R\$ 7 082,14
	0,2	30	180	67324	0	1	6	0	R\$ 7 063,63

Como esperado, o valor unitário de cada painel nas propostas sem padronização não altera-se com o aumento da frota (vide valores em amarelo como exemplo), uma vez que nesta abordagem cada embarcação é considerada única.

Ao analisar cada uma das propostas, pode-se perceber uma importante redução no custo do painel com o aumento no número de embarcações da frota. Isto não ocorre devido aos benefícios em si, pois estes se mantêm iguais ao alterar-se a frota somente, o que causa a redução é a divisão dos custos de projeto e classificação, que apesar de não serem os custos de maior peso acabam trazendo economia quando são divididos.

Conforme pode-se ver no gráfico abaixo, a variação no intervalo de operação, de 2 para 10 anos, maximizou seu efeito no custo de logística (C8). Este comportamento era esperado, uma vez que o excesso ou redução de material é contabilizado durante um intervalo maior de tempo. Pode-se dizer inclusive que este termo é o principal responsável pelo custo total superior das propostas com padronização total quando comparadas a padronização intermediária.

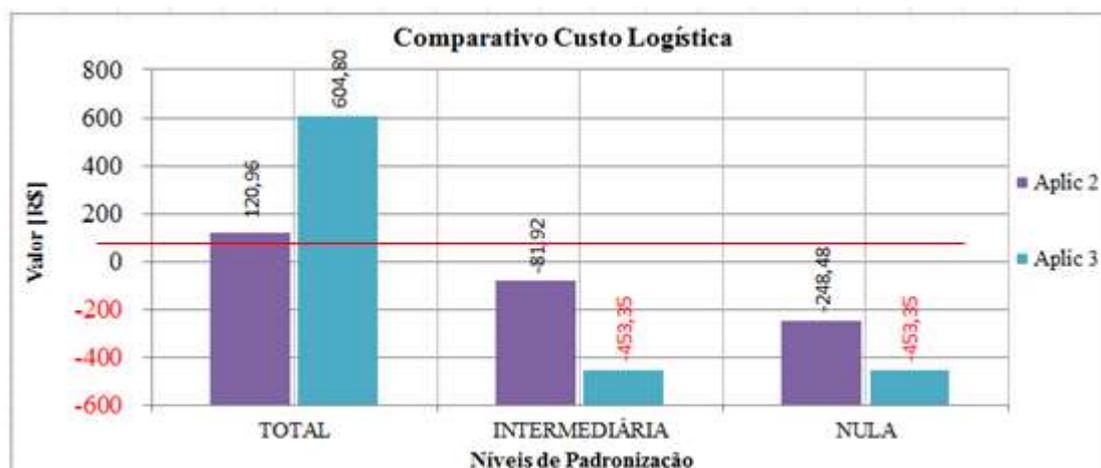


Figura 8.11 - Comparativo Custo Logística

Outro ponto que deve ser ressaltado é o aumento no custo quando são comparadas as padronizações de frota intermediárias com as nulas dentro da mesma região de “L1” neste caso, a abordagem padronizada causa melhorias nos benefícios, que associados à divisão de custos de projeto e classificação citadas acima torna estas opções mais interessantes economicamente. Já no caso da padronização total, pode-se perceber que o seu custo mesmo com diversas embarcações ainda não é o mais atrativo: ao comparar-se a estrutura gerada por esta padronização com a gerada pela padronização intermediária, pode-se perceber que esta segunda é mais econômica.

9 CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se um estudo exploratório sobre os benefícios da padronização na indústria naval, buscando compreender como os procedimentos e as técnicas de padronização podem influir nos custos de projeto, construção, operação e manutenção de embarcações.

Foram desenvolvidas ferramentas que permitiram cumprir os objetivos específicos propostos e no transcorrer deste trabalho diversas conclusões foram obtidas, estas descritas a seguir:

No capítulo 4 realizou-se uma extensa pesquisa e discussão em relação à padronização na indústria, onde foi possível perceber a necessidade de sua utilização quando há a preocupação com a redução de custos, com o aumento da produtividade e da qualidade dos processos e produtos gerados. Ao final deste capítulo, foram definidas as diferentes formas de padronização no setor naval a serem utilizadas posteriormente nas aplicações e, por fim, considerou-se como um produto valioso deste trabalho o testemunho de profissionais experientes do setor naval em relação ao assunto padronização.

Em relação à metodologia para avaliação estrutural denominada híbrida, baseada em uma norma de estruturas metálicas, esta mostrou-se como uma ferramenta útil e confiável, uma vez que seus resultados foram validados através de uma análise contemplando não linearidades físicas e geométricas, com resultados consistentes em todos os casos avaliados. É importante citar que esta metodologia não é usual na área naval: no entanto, a utilização de procedimentos deste tipo, que permitem relacionar disposições normativas com análises simples de elementos finitos para a determinação de cargas de colapso são opções interessantes.

Sobre a metodologia naval para a avaliação estrutural, esta mostrou-se ainda mais simples, permitindo uma avaliação rápida de um projeto com a necessidade de poucas informações, permitindo a análise de uma maior quantidade de propostas.

Comparando as duas metodologias, pode-se dizer que a híbrida é mais trabalhosa, e gera resultados menos conservativos, já a metodologia naval é de fácil implementação porém com resultados mais conservadores. Apesar disto, os resultados de ambas são coerentes entre si, uma vez que ambas aprovaram ou reprovaram as estruturas propostas em consonância.

Em relação à metodologia para a avaliação econômica, foi possível abordar os custos de produção apresentados em orçamentos reais bem como custos operacionais (estes de forma mais superficial) garantindo certo grau de realismo aos resultados. A evolução no equacionamento proposto para cada aplicação permitiu avaliar mais claramente os efeitos da padronização em cada proposta, de forma a produzir resultados suficientes para subsidiar um parecer final sobre a viabilidade econômica da padronização no setor naval.

A aplicação do algoritmo SLAW[®] para a obtenção de leis de potência capazes de modelar o custo de projetos navais demonstrou-se adequada e foi possível gerar diferentes equações, cada qual válida em um determinado intervalo de dados. A identificação das variáveis relevantes exigiu diversas iterações, porém ao final foi possível obter equações com erros relativos menores que 10%. Estas equações também permitiram avaliar tendências para

redução de custo, baseadas nos expoentes dos seus parâmetros, e assim foi possível perceber em que direção o projetista deveria seguir para obter uma configuração mais econômica.

Como parecer final, entende-se que a padronização é uma alternativa economicamente viável ao setor naval, porém seus benefícios são maximizados de forma importante somente quando fala-se em mais de uma embarcação. Outros benefícios da padronização, que foram citados porém não avaliados, como os ligados à operação e treinamento, só serão interessantes quando a bacia for pensada como um sistema, e não como entidades autônomas, leia-se aqui operadores, terminais e hidrovia.

10 REFERÊNCIAS

- ABNT, 2008. “NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto em Edifícios” 254p.
- ANSYS, INC., 2007 Disponível em: <http://www.ansys.com>.
- ANSYS, INC. User’s Manual.
- ANDREW, J. 2009. “Naval Shipbuilding: Australia’s \$250 billion Nation Building Opportunity,” Sidney: Defence SA Advisory Board, 92p.
- ANTAq, 2013. “**Relatório Técnico Bacia do Sul**”, Universidade Federal de Santa Catarina, 88p.
- BARAN, N.M., “**Finite Element Analysis on Microcomputers**” New York: McGraw-Hill, 1988, 257p.
- BJORVIDE, R., 1972, “Deterministic and probabilistic approaches to the strength of steel columns” Bethlehem: Leigh University, 282p.
- CAMPOS, V.F., 2004. “Qualidade Total: Padronização de Empresas” INDG: 142p
- CARPINTERI, A., LACIDOGNA, G. 2008 “**Acoustic Emission and Critical Phenomena**” Taylor & Francis Group, London, 271p.
- CHEN, W. F., CHAN D. J. 1988. “**Plasticity for Structural Engineers**”, 1. ed. New York: Springer-Verlag, 606p.
- CHODRAUI, G. M. B. 2006 “**Análise Teórica e Experimental de Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Compressão**”. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos.. 294p.
- CHODRAUI, G. M. B. 2003 “Flambagem Por Distorção da Seção Transversal em Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Compressão Centrada e à Flexão”. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 2003. 173p.
- DUMAINE, B. 1989. “**How Managers Can Succeed Through Speed**”. Fortune Magazine, Feb. 2p.
- EMILIO, J. 2010 “**Regulamento e Direito Marítimo, Classificação de Navios**”. Escola Superior de Náutica Infante Don Henrique, Lisboa, 13p.
- GALLAGHER, N. 1993. “Comercial Substitution as a Means to Build the Industrial Shipbuilding Base” Dissertação de Mestrado, Massachussets Institute of Technology, Massachussets.

GRIGOLETTI, G. C. “Otimização via Algoritmos Genéticos de Perfis U Formados a Frio Submetidos à Compressão Utilizando o Metodo da Resistencia Direta”. Tese de Doutorado. PROMEC/UFRGS, Porto Alegre. 2008. 184p.

IACS, International Association of Classification Societies 2008, “**Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers**”, 252p.

ISHIKAWA. K., LU. D. J. 1985, “**What is Total Quality Control?**”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ 220p.

KALEFF, P. 2012. “Integridade Estrutural de Estruturas Oceânicas Flutuantes” Apresentação em slides, COPPE UFRJ. 39p.

MANZO, J.M.G., GONZALEZ, J.M.M., 2008.“**Leis de potência ou escala: sua aplicação ao fenômeno esportivo**”. Fit Perf Journal Mai-Jun, 195-202p.

MENDEZ, P.F., FURRER, R., FORD, R., ORDOÑEZ, F., 2008, “**Scaling Laws as a Tool of Material Informatics**” Material Informatics Journal March, 60-66p.

MENDEZ, P.F., ORDOÑEZ, F., 2005, “**Scaling Laws from Statistical Data and Dimensional Analysis**” Journal of Applied Mechanics, Vol 72 Sep, 648-657p.

NASCIMENTO, G.R., 2013 N “CoMParção Crítica entre Diferentes Métodos para Calcular a Carga de Colapso em Estruturas de Aço”, Dissertação de Mestrado, UFRGS, 155p.

OKUMOTO, Y. TAKEDA, Y, MANO, M., OKADA, T. (2009) “**Design of Ship Hull Structures**, Springer, 404p.

PFEIL, W., PFEIL, M. 2010 “Estruturas de Aço Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR8800:2008”. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC , 357p.

PING, W., 2011 “A Brief History of Standards and Standardization Organizations: A Chinese Perspective”. East West Center Working Papers, Washington, 28p.

SALLES, M.Z. 2009 “Sistema de Navegação Fluvial nos Estados Unidos”, Palestra Fórum Hidrovias, 39p.

TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M. 1961 “**Theory of Elastic Stability**”. International Student Edition, 2.ed. Tokyo: McGraw-Hill, 541p.

TEDESCO, M.P., 1994, “**Na approach to standardization of naval equipment and components**” Dissertação de Mestrado. Massachussets Institute of Technology, Massachussets, 202p.

VOLANTE, C. 2012. “**Automotive Engineerign**”, Apresentação em Slides integrante da disciplina de Project Management. POLITO Turin, 48p.

Apêndice A – A padronização na Indústria moderna

Na busca por melhores resultados, a indústria passou a adotar o termo “qualidade total”, este termo proveniente da administração visa garantir que sejam atendidos alguns princípios como satisfação do cliente, aprimoramento dos recursos humanos, aperfeiçoamento contínuo, delegação de funções e garantia de qualidade.

Campos (2004) entende que a melhor forma de atender-se os princípios da qualidade total é através da padronização, definida pelo autor como “*o processo de obter e melhorar padrões, buscando determinar a melhor forma de executar determinada atividade*”, seja ela a produção de um componente simples como um palito de dentes, seja ela a construção de uma embarcação de centenas de toneladas. Como padrão, o autor define “*um método ou objeto usado como referência*”.

Padronizar envolve muito mais que determinar a melhor maneira para proceder, não que esta seja uma tarefa simples, porém, simplesmente a determinação da melhor maneira para determinada atividade não garante a eficiência do processo, é necessário garantir que o estabelecido seja transmitido de forma clara a aqueles que irão fazer a implementação e também, obviamente, deve-se verificar se, de fato, ela está sendo implementada de forma adequada.

Assim, entende-se a padronização como o processo de encontrar/melhorar os padrões, ela serve para determinar a “melhor forma” de executar determinada tarefa e, mesmo após ser estabelecida, não deve ser tratada como perfeita, sendo continuamente questionada e melhorada. Deve-se também assegurar que ela está sendo seguida por todos os envolvidos, e não somente por aqueles que a desenvolveram.

A.1 PDCA – Plan, Do, Check, Act

Ishikawa (1985) propõe um método importante na Qualidade total, e que pode ser implementada via padronização é o PDCA, que consiste nas 4 etapas citadas abaixo:

Plan (Planejar): Como uma primeira etapa, é necessário entender quais são as metas, em se tratando de padronização, as metas finais costumam envolver redução de custos e/ou aumento da qualidade, os métodos para atingir estas metas são diversos, assim, pode-se utilizar as teorias de padronização para determinar os métodos a serem adotados para atingir as metas. Aqui deve-se ainda determinar quais padrões serão desenvolvidos e quais os objetivos destes padrões, como também é necessário elaborar toda documentação destes padrões.

Do (Fazer): Uma vez determinados os métodos e padrões, é necessário elaborar um treinamento claro e consistente, que permita aos usuários destes padrões a compreensão do padrão, e de como atingir o mesmo. Obviamente, após garantir que a equipe já compreendeu os padrões, é necessário executá-los.

Check (Checar): Uma vez implementados, os padrões precisam ser verificados e conferidos, neste ponto a padronização torna-se de grande utilidade, uma vez que padrões são facilmente verificáveis, além disto, pode-se incorporar no processo padrão etapas de verificação, garantindo a inexistência de atrasos causados por intervenções de verificação fora de hora.

Act (Agir): Um processo padronizado torna-se de fácil verificação, assim, ao deparar-se com uma inconformidade, deve-se verificar as razões desta ocorrência e tomar as devidas providências para corrigi-la. Outra ação desta etapa é a busca contínua pela melhoria dos padrões adotados.

A.2 Domínio tecnológico

Domínio tecnológico é o completo conhecimento dos procedimentos e processos existentes na empresa. Ao padronizar os processos existentes, a empresa faz a formalização destes padrões, quando isto ocorre, ela permite que o “domínio tecnológico” passe dos funcionários para a empresa.

Muitas vezes em empresas tradicionais, existem excelentes funcionários que trabalham há muitos anos em suas funções, e acabam desenvolvendo formas mais eficientes de executar tais funções, o problema é que este conhecimento “vai embora” junto com estes funcionários, perde-se assim o domínio tecnológico, as organizações devem evitar isso, e uma forma de fazê-lo é através da padronização.

Assim, para garantir o domínio tecnológico, precisa-se garantir que a empresa possa:

Estabelecer sistemas: neste contexto, sistema refere-se à cadeia de processos de um produto ou serviço, uma empresa com domínio tecnológico de seus produtos é capaz de elaborar os sistemas inerentes ao seu processo produtivo, isto é necessário para elaborar a padronização.

Equalizar o executado com o registrado: apesar da compreensão de que ocorrem desvios nos processos, deve-se garantir que nada importante fique sem registro, a padronização trabalha no sentido de formalizar todos os procedimentos, contribuindo para este quesito.

Assegurar qualidade total: Conforme dito acima, a qualidade total depende de diversos tópicos, padronização é uma ferramenta útil para atingi-los.

Controle das metas estabelecidas: um sistema de controle e verificação adequado deve ser implementado para que se possa fazer esta análise, e esta implementação é facilitada em um processo padrão.

A.3 Método de padronização

O processo de padronização de um produto, independente de sua complexidade, exige metodologia, Campos, 2004 dá as diretrizes à padronização de um processo em 5 etapas:

Especialização: escolher o sistema a ser padronizado, conforme sua repetitividade. Consiste em verificar o que é repetitivo e focar a padronização neste local, para tal é necessário um levantamento das atividades e componentes pertencentes ao processo.

Simplificação: redução do número de itens, componentes, etc., visando à redução de custos. Aqui é necessária uma investigação das reais necessidades de cada aplicação, tentando equalizar estas aplicações e assim, diminuir a variabilidade de itens. Um exemplo disto seria a utilização de uma chapa 5/16 polegadas em um processo e uma chapa de 8 mm em outro, dado que a diferença de espessura é de meros 0,07 mm, pode-se entender, ao menos em uma primeira análise, que as duas aplicações poderiam compartilhar da mesma espessura de chapa.

Redação: redigir o padrão de forma clara e objetiva. Uma vez identificado os itens a serem padronizados, é preciso montar um informativo deste padrão, contendo todos os aspectos relativos a ele e o que precisa ser verificado para garantir sua aplicação adequada.

Educação e treinamento: garantir que os usuários dos padrões façam suas tarefas conforme o estabelecido. Através da documentação do passo anterior, elabora-se um material simples e direto, com a função de orientar os usuários acerca de como proceder para atingir o padrão, quais os itens a verificar, e o que fazer caso o padrão não seja atendido.

Verificação: garantir o cumprimento das metas. Após certificar-se de que os usuários compreenderam todos os aspectos dos padrões, deve-se montar um esquema de verificação destes padrões, obviamente espera-se que ocorra um primeiro momento de adaptação, onde haverá uma ocorrência maior de irregularidades. Superada esta etapa, deve-se implementar o esquema de verificação para garantir que os padrões e, por extensão, os objetivos estão sendo cumpridos.

A.4 Características dos padrões

Além de falar do processo de padronização, Campos, 2004 determina também algumas características básicas presentes em padrões ideais, a presença destas características indicam um padrão bem estabelecido:

Enfoque no Usuário: o padrão deve ser voltado ao usuário, entende-se aqui como usuário a pessoa que será responsável por efetuar determinada tarefa padronizada ou utilizar determinado item/processo. Assim, o usuário poderá ser um trabalhador que irá executar a próxima tarefa do processo ou ainda o consumidor final de um produto.

Simplicidade: o padrão deve ser simples, assim, sua implementação, treinamento e execução serão facilitados. Padrões muito complexos estão fadados ao fracasso devido à sua difícil implementação.

Realidade: o padrão deve ser algo a ser atingido e mantido, porém deve-se verificar sempre se, de fato, é possível atingi-lo, um exemplo disso é não incluir tolerâncias dimensionais em um padrão de uma peça produzida por usinagem ou fundição.

Objetividade: os parâmetros do padrão devem ser claros, contendo números, indicadores, imagens, e demais informações objetivas e diretas, deve-se evitar parâmetros subjetivos como “suave”, “preciso”, “bom”. Enfim, deve-se facilitar o julgamento do usuário na decisão sobre a conformidade ou não de um item.

Vanguarda: como um processo de melhoria contínua, os padrões devem sempre incorporar o que há de mais moderno na empresa, para “nivelar por cima” e procurar tornar a empresa mais competitiva. Não há razão para estabelecer um padrão que não seja a melhor forma conhecida (e possível) de executar uma tarefa. É importante perceber que não falasse aqui da forma mais moderna, pois esta pode não ser a melhor forma para a empresa em questão, seja por razões financeiras, seja por razões técnicas.

Revisão: por tratar-se de um padrão, não significa que o mesmo não possa ser alterado, pelo contrário, um padrão precisa ser constantemente revisto para garantir a “vanguarda” citada acima.

Praticidade: os padrões precisam ser práticos, fugindo ao máximo da teoria, isto complementa a questão da objetividade citada acima.

Rastreabilidade: Para garantir a formalização adequada e a facilidade na recuperação destes documentos, os padrões devem ter data, número de revisão, autor, etc.

A.5 Estrutura de padrões técnicos

Padrões técnicos são os diferentes tipos de padrões implementados no sistema fabril, estes são definidos através da compreensão das demandas do mercado consumidor, então, avaliam-se as capacidades da empresa em atender estes padrões, para então implementá-los em seus processos, são eles:

Padrões de qualidade: especificações do produto, dos componentes e dos materiais.

Padrões de inspeção: padrão para a inspeção dos processos fabris e das matérias primas.

Padrões de operação: especificações técnicas dos processos e dos procedimentos operacionais existentes.

A.6 Tipos de padronização

Apesar de ter-se apresentada uma única metodologia para padronização nas seções anteriores, ela pode ser aplicada para diferentes elementos:

Especificação de produto: neste caso, a padronização deve garantir a informação básica e os padrões a serem avaliados na inspeção.

Especificação de matéria prima: trabalha na direção de reduzir variedade de itens e número de fornecedores.

Especificação de processo (padrão técnico de processo): assim como a especificação de produto, existe a de processo, esta especificação deve incluir todo o processo, determinando os requisitos dos parâmetros de controle. Para tal, esta especificação pode possuir fluxogramas com os equipamentos do processo e situação de matéria prima, os pontos de medições e verificações e uma descrição detalhada dos produtos.

Apêndice B – Rotina para simulação linear elástica – Determinação da carga de colapso

Este apêndice demonstra a rotina utilizando o método de elementos finitos desenvolvida para a metodologia híbrida proposta na seção 6.4.2, ela inicia pela análise linear elástica, segue para a análise dos modos de flambagem e finaliza com a análise não linear físico-geométrica.

Análise linear

Inicia-se o procedimento através da análise linear elástica da estrutura, conforme descrito na rotina abaixo:

Início do programa:

/prep7

Definição da geometria:

k,1,0,0,0

k,2,0,0,2400

k,3,6580,0,2400

k,4,6580,0,0

k,5,3290,0,2400

k,6,3290,0,0

k,7,3290,100,0

k,8,3290,100,2400

Determinação das áreas

a,1,2,5,6

a,6,5,3,4

a,8,5,6,7

Determinação dos parâmetros fixos

t= 25.4!(espessura da chapa em mm)

t2=7.9 !(espessura do reforçador em mm)

esize1=50 !(tamanho de elemento na chapa em mm)

esize2=12.5 !(tamanho de elemento no reforçador em mm)

p1=-1 !(carregamento em MPa)

Propriedades do material

E1= 2e5 !(Módulo de Young em MPa)

Dens1 = 0.00000785 !(Densidade em kg/mm³)

Poi1 = 0.26 !(Poisson)

LE=250 !(Escoamento em MPa)

Aplicação das propriedades no material

Chapa:

MP,EX,1,E1

MP,PRXY,1,Poi1

MP,DENS,1,Dens1

Reforçador:

MP,EX,2,E1

MP,PRXY,2,Poi1

MP,DENS,2,Dens1

Atribuindo elementos à geometria:

Chapa:

ET,1, SHELL281 !(Atribuição do elemento tipo SHELL281 a chapa)

sectype,1,shell

secdata,t,1

secoffset,top

ET,2, SHELL281

sectype,2,shell

secdata,t2,2

Aplicação da malha à estrutura:

Chapa:

Asel,s,,1,2

Esize,esize1

Mat,1

type,1

Aatt,1,,1,,1

Amesh,1,2

Reforçador:

Asel,s,,3

Esize,esize2

Mat,2

type,2

Aatt,2,,2,,2

Amesh,3

Determinação das vinculações:

Condição de engaste nas laterais, na parte frontal e posterior:

Lsel, s, , , 1

Lsel, a, , , 6

Lsel, s, , , 2

Lsel, a, , , 4

Lsel, a, , , 5

Lsel, a, , , 7

nsll,s,1

D,all,ux,,,,,uz,uy,rotx,roty,rotz

Aplicação do carregamento: pressão sob toda a placa, orientada para baixo, com valor de 1 MPa

Asel,s,,1,2,

Sfa, all,1,pres, p1,

Aplicação do solver:

/solu

solve

Como resultado desta análise, verificam-se os valores de tensão normal e de cisalhamento, em busca do maior valor de compressão (no caso das tensões normais) ou o maior valor absoluto, no caso de tensões de cisalhamento.

Procura-se a maior tensão normal negativa, ou seja, de compressão, para verificar a possibilidade de encontrarmos uma falha por flambagem.

O maior resultado encontrado para este caso foi a tensão normal de compressão na direção “Z”, com o valor de 27192 MPa, indicando uma possível falha por flambagem.:

Uma vez determinada a tensão presente de maior relevância, parte-se à análise linear de flambagem (buckling).

Determinação dos modos de flambagem

Com o valor de tensão da análise linear em mãos, é necessário agora determinar os modos de flambagem da estrutura, para tal, efetua-se a simulação conforme descrita abaixo:

!Aplicação do solver:

```
/solu
```

```
antype,buckle ! (altera o tipo de análise para flambagem)
```

```
pstres,on ! (ativa pré-tensão na estrutura)
```

```
bucopt,subsp,5 ! (calcula os 5 primeiros modos de flambagem)
```

```
save
```

```
solve
```

```
finish
```

Expansão dos modos de flambagem:

```
/solu
```

```
expass,on ! (Expande os modos)
```

```
mxpand,5
```

```
solve
```

```
finish
```

Visualização dos modos

```
/post1
```

```
set,list ! (plota uma lista com os modos de flambagem calculados)
```

O resultado desta etapa é a listagem dos 5 primeiros modos de flambagem e, a visualização de sua forma, conforme o comando `set,1,n`, onde “n” é o modo a ser visualizado. O valor selecionado deve ser sempre o menor dentre os listados, neste caso o valor foi de 0,06932:

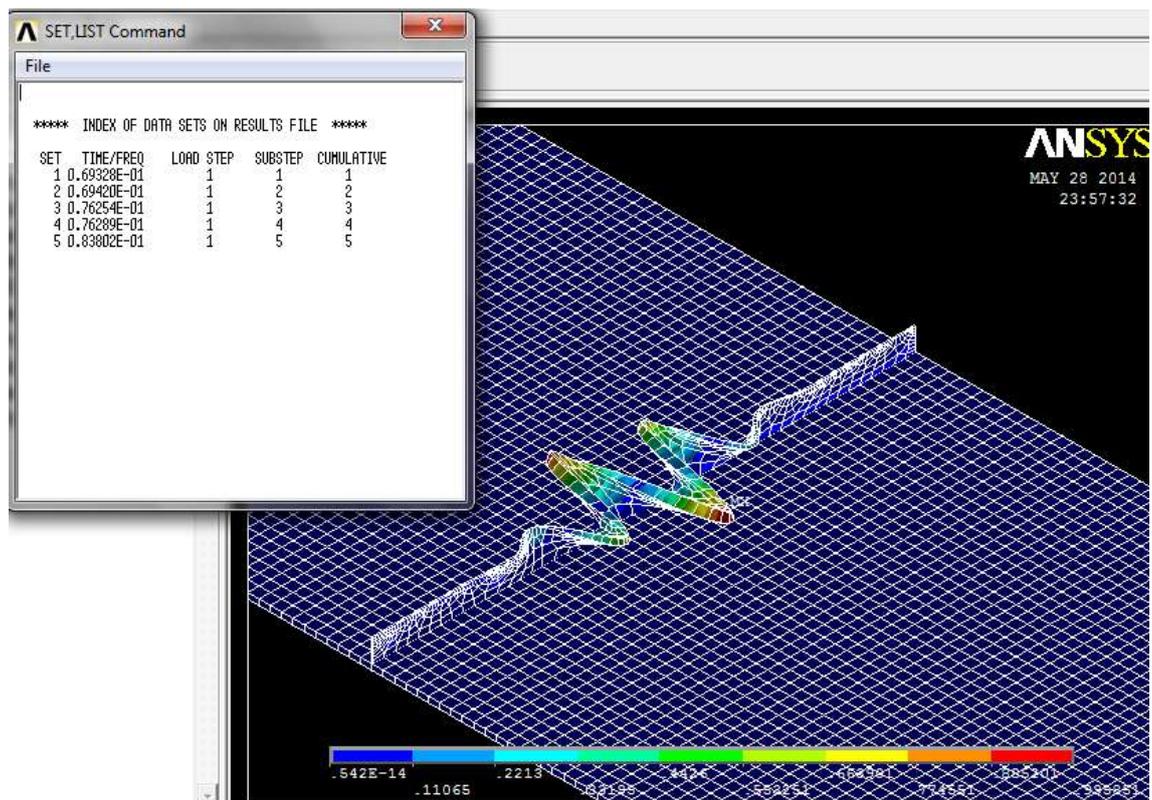


Figura B1 - Lista dos modos de flambagem e visualização do primeiro modo

Implementação com a NBR 8800

Com estas informações, já é possível fazer a verificação utilizando a NBR 8800, esta verificação será demonstrada abaixo:

- Determinação da tensão crítica (σ_e):

Aplica-se a equação abaixo

$$\sigma_e = \sigma_z * F_n \quad (B1)$$

Onde $\sigma_z = 27192$ e $F_n = 0,06392$

Assim, o valor de $\sigma_e = 1884,4$ MPa

- Determinação do índice de esbeltez (λ_0)

Por tratar-se de uma tensão normal, a equação abaixo é a utilizada:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_e}} \quad (B2)$$

Onde f_y é a tensão de escoamento do material, neste caso, 315 MPa. Assim, o valor de λ_0 é 0,41

- Determinação do fator de redução χ

No gráfico abaixo, é possível obter o valor de χ baseado no índice de esbeltez:

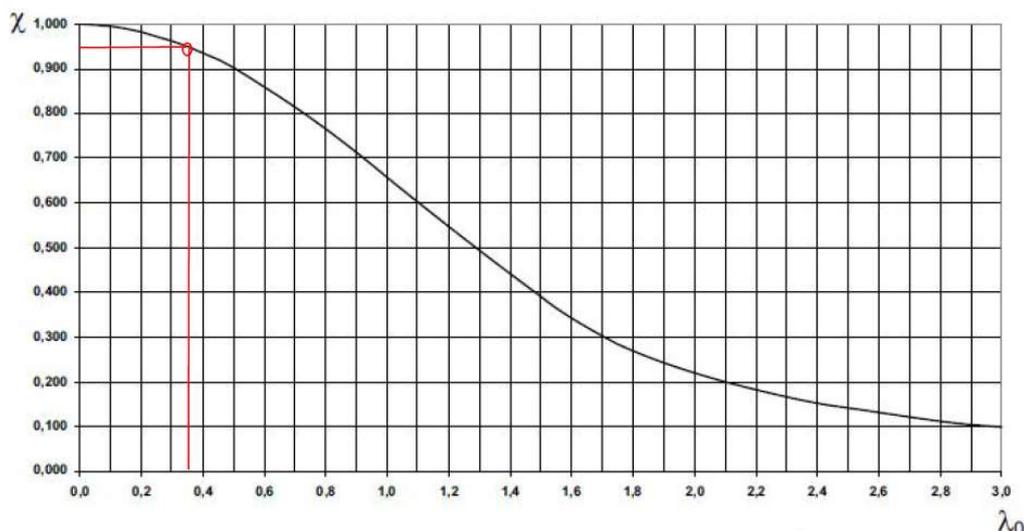


Figura B2 - Gráfico χ versus λ_0

Como é possível perceber, o valor de χ é em torno de 0,93, isto denotar uma região do gráfico onde o mecanismo de falha predominante é a plastificação.

- Determinação das tensões de cálculo (σ_{sd})

A tensão de cálculo é encontrada levando em conta a equação abaixo:

$$\sigma_{sd} = \sigma_z * p_r \quad (\text{B3})$$

Onde p_r é a carga real, ou seja, a pressão hidrostática calculada anteriormente, com o valor de 0,0441 MPa.

Assim, o valor da tensão de cálculo é de 1196 MPa.

- Verificação do estado limite:

A condição imposta pela NBR 8800 é a de que o valor da tensão de cálculo seja menor que o valor da resistência de projeto ($\chi * f_y$):

$$\sigma_{sd} \leq \chi * f_y \quad (\text{B4})$$

Neste caso, σ_{sd} vale 1196 MPa, enquanto o produto $\chi * f_y$ dá o valor de 302,4 MPa, portanto, esta estrutura falha por plasticidade segundo a NBR 8800.

Validação do modelo

Para validar o modelo utilizado, optou-se por realizar uma análise não linear físico-geométrica, esta análise utiliza um modelo de plasticidade bilinear com encruamento cinemático, ou seja, tem-se duas retas com inclinações diferentes.

Para a parte anterior ao escoamento da estrutura, a reta tem inclinação “E”, após este evento, o modelo trabalha com uma segunda reta, de inclinação “E/10000”.

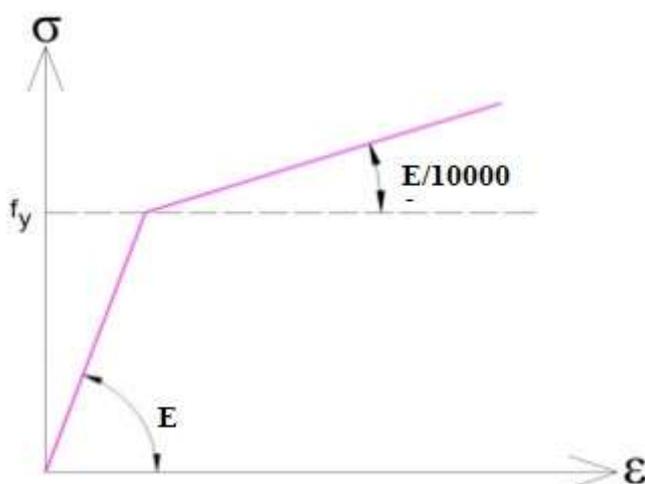


Figura B3 - Modelo bilinear

Por encruamento cinemático, entende-se que a região que determina o encruamento do material, composta pela resultante dos valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 , é alterada assim que uma das fronteiras é atingida. Neste momento, a região deforma-se na direção desta componente.

O valor de carregamento selecionado para P foi de -0.5, utilizou-se este valor em detrimento ao valor -1 pois o novo valor está mais próximo da carga real, facilitando assim a convergência do problema.

Ao final, compara-se o valor de tensão obtido na estrutura com o valor obtido da análise linear.

Abaixo segue a aplicação da simulação:

!Início do programa

/Prep7

!Implementação do modelo de plasticidade bilinear com encruamento cinemático

Tb,bkin,1, ! (ativa as propriedades não lineares do material)

Tbmodif,2,1,LE ! (altera a tensão de escoamento para o valor de LE)

Tbmodif,3,1,E1/10000 ! (altera o valor de inclinação da reta após atingir o escoamento)

Finish ! (Finaliza o pré-processador)

Aplicação do solver

/solu

Antype,static ! (define o tipo de solução como estática)

/gst,on

solcontrol,on ! (ativa a otimização padrão para soluções não lineares)

nlgeom,on ! (inclui efeitos de grandes deflexões)

nsubst,400,2000,5 ! (especifica o número de substeps)

!Condições de convergência e finalização da simulação

cnvtol,f,,.005,2,.01 ! (determinar os limites de convergência)

cutcontrol,plslimit,.005 ! (determina o maior valor de deformação plástica permitido)

sstif,on

arctrm,1 ! (Finaliza a análise se a carga crítica for atingida)

nenv,2 ! (Finaliza a análise, mas não a execução do programa em caso de falha na convergência)

!Controle da base de dados

outres,all,1 !

!Ativação do método de comprimento do arco

maxarc = 25 ! (Determina o maior múltiplo do raio do comprimento do arco padrão)

minarc = 1/1000! (Determina o menor múltiplo do raio do comprimento do arco padrão)

arclen,on,maxarc,minarc! (Ativa o método do comprimento do arco)

outres,all,all ! (grava todos os valores)

solve ! (inicia a solução)

Após a finalização do programa, o procedimento segue conforme abaixo.

Utilizando a equação 6.25, verifica-se a carga crítica conforme abaixoos valores da implementação da NBR 8800, verifica-se o número de vezes em que o valor de σ_{sd} é maior que o produto $\chi * f_y$:

$$\gamma = \frac{\sigma_{sd}}{\chi * f_y} \quad (B5)$$

Para este caso, o valor é de 5,13. Divide-se então o valor da carga real (0,044 MPa) pelo valor obtido, verificando assim, a carga de colapso da NBR 8800, ou seja, qual o valor dentro dos steps da análise não linear aonde teremos o mesmo estado de tensões da análise linear .

$$CC_{nbr} = \frac{P_r}{\gamma} \quad (B6)$$

O valor obtido foi de 0,00858. Compara-se este valor com os valores dos steps de carregamento gerados na análise não linear, determinando qual step possui o valor mais próximo à carga de colapso, para isto procede-se da seguinte forma:

Multiplica-se o valor dos steps pelo valor absoluto do carregamento (0,5) até chegarmos próximo ao valor da carga de colapso.

Determinados os steps relevantes, verificam-se as curvas de deslocamento de um ponto pertencente à região aonde apresentou-se a maior tensão quando da análise linear.

Abaixo tem-se as imagens do deslocamento de um ponto de interesse:

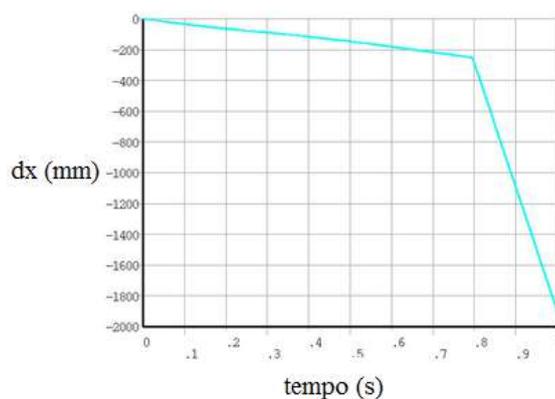


Figura B4 - Deslocamento para $CC_{nbr} = 0,011$

Analisando os resultados da tabela abaixo, pode-se perceber que o valor que busca-se está entre estes dois passos, assim, avalia-se as tensões para ambos os casos e após, faz-se uma interpolação linear, para chegar ao valor de tensão correspondente ao mesmo cenário da análise linear:

Tabela B1 - Resultados análise não linear físico geométrica

Step	CCnbr	σ_z (MPa)
0,01437	0,007	195,5
0,02281	0,011	310

Apêndice C – Obtenção detalhada função de custo para a aplicação 2

Neste apêndice apresenta-se o desenvolvimento integral da etapa 3 da seção 8.2, ela descreve as tentativas de obtenção de uma equação adequada para o ajuste da função custo.

Os dados obtidos pelas análises estrutural e econômica estão presentes na Tabela 8.13, a partir destas informações foram geradas as equações de ajuste para a função custo:

Tabela C1 - Dados Slaw Aplicação II (“*” indica tratar-se da média ponderada)

	C* [R\$]	b* [mm]	l* [mm]	Mreal* [N*mm]	s* [mm]	d* [mm]	tw* [mm]
1T	5638,72	2100	2400	6,50E+10	650,00	160,00	8,00
1I	5931,83	2100	2400	5,19E+10	650,00	143,85	8,35
2T	4824,84	2100	2400	6,50E+10	800,00	160,00	8,00
2I	4060,22	2100	2400	5,19E+10	800,00	155,38	8,23
3T	5925,28	2100	2400	6,50E+10	650,00	160,00	8,00
3I	3991,24	2100	2400	5,19E+10	650,00	160,00	8,00
4T	6229,25	2100	2400	6,50E+10	400,00	120,00	8,00
4I	5251,00	2100	2400	5,19E+10	400,00	120,00	8,00
5T	5745,20	2100	2400	6,50E+10	400,00	160,00	8,00
5I	4934,92	2100	2400	5,19E+10	400,00	150,77	8,00
	t* [mm]	σ_x^* [MPa]	Zreq* [mm^3]	Zadm* [mm^3]	Mpadm* [N*mm]	Treq* [mm]	Peso Aço* [kg]
1T	9,50	69,10	55950,00	69718,00	7712,60	3,69	12149,75
1I	8,22	55,14	53089,04	60091,00	6251,69	3,56	11050,82
2T	9,50	69,10	68862,00	69718,00	7712,64	4,54	11494,59
2I	7,68	55,14	65109,81	67483,23	5532,22	4,38	10560,90
3T	7,90	69,08	55950,00	69865,00	5333,00	3,08	9976,91
3I	7,01	55,13	53089,04	69865,00	4525,42	3,00	9322,30
4T	9,50	69,08	34431,00	44250,00	7712,00	2,27	8456,45
4I	7,68	55,13	32670,00	44250,00	5531,92	2,00	11176,62
5T	7,90	69,08	49539,00	67753,00	5333,00	2,27	12088,84
5I	7,01	55,13	46043,54	57356,85	5397,73	2,00	8456,44

Diferentes tentativas de utilização destes dados foram feitas, buscando encontrar uma equação capaz de apresentar resultados com grande proximidade e com uma quantidade reduzida de parâmetros. Na primeira, conforme descrito no texto principal desta dissertação, buscou-se utilizar todos os parâmetros existentes, gerando a equação C1.

$$C_{II} = 0,9 * b^{-0,8} * l^{-0,82} * M_{real}^{-0,22} * s^{1,31} * d^{3,76} * tw^{10,25} * t^{0,53} * \sigma_x^1 * Z_{req}^{-0,77} * Z_a^{-2,26} * Mp_{adm}^{-0,06} * t_{req}^{-1,18} * kg_{aço}^{0,42} \quad (C1)$$

Esta equação apresentou um excelente ajuste, com erro relativo de 0,05% (vide tabela C2), no entanto, trata-se de uma equação com muitos termos, de forma que não é prática para o uso.

Buscou-se então a redução nos parâmetros através da análise dos expoentes presentes na equação C1, primeiramente eliminou-se o termo “Mreal”, uma vez que seu expoente era baixo, outro ponto que reforçou esta escolha foi a ordem dos valores deste parâmetro que giram na casa de $6,5e+10$, destoando dos demais termos em ordem de grandeza, os parâmetros “b” e “l” também foram removidos, uma vez que não alteram-se em nenhuma das configurações. O resultado desta alteração gerou a equação C2:

$$C_{II} = 0,47 * s^{1,12} * d^{6,16} * tW^{9,19} * t^{1,12} * \sigma_x^{1,89} * Z_{req}^{-1,23} * Z_a^{-3,81} * Mp_{adm}^{-0,71} * t_{req}^{-0,51} * kg_{aço}^{0,46} \quad (C2)$$

Estas alterações tornaram a equação mais compacta, porém não suficientemente, já o erro relativo apresentou leve acréscimo, chegando a 0,24% (vide tabela C2).

Uma nova iteração no processo de eliminação foi realizada, excluindo os termos de menor expoente “MPadm”, “treq” e “kg aço”, gerando a equação C3:

$$C_{II} = 0,01 * s^{0,51} * d^{4,01} * tW^{9,52} * t^{-0,15} * \sigma_x^{1,85} * Z_{req}^{-1,42} * Z_a^{-1,95} \quad (C3)$$

Como pode-se perceber, esta equação já é mais compacta, sendo de fácil aplicação. O erro relativo aumentou para um máximo de 8% (vide tabela C2), porém ainda é considerado baixo.

Uma nova tentativa de redução foi feita, eliminando os termos referentes ao espaçamento “s” e a espessura da chapa “t” gerando a equação C4:

$$C_{II} = 0,001 * d^{1,80} * tW^{8,29} * \sigma_x^{1,44} * Z_{req}^{-0,69} * Z_a^{-0,83} \quad (C4)$$

Esta equação apresentou erros na ordem de 10%, sendo descartada como válida. Ao final, adotou-se a equação C3 como a de melhor ajuste dado o número reduzido de termos que a mesma possui.

Na tabela C2 tem-se os valores de cada uma das equações de custo, bem como o valor correto para comparação:

Tabela C2 – Erros relativos

	C	C1	Erro	C2	Erro	C3	Erro	C4	Erro
1T	5638,72	5641,32	-0,05%	5652,24	-0,24%	5722,65	1,47%	5599,46	1%
1I	5931,83	5934,55	-0,05%	5946,06	-0,24%	5835,09	1,66%	5745,63	3%
2T	4824,84	4827,06	-0,05%	4836,41	-0,24%	4735,82	1,88%	4854,13	-1%
2I	4060,22	4062,08	-0,05%	4069,97	-0,24%	4325,31	6,13%	4493,71	-10%
3T	5925,28	5927,99	-0,05%	5939,49	-0,24%	5852,64	1,24%	5587,31	6%
3I	3991,24	3993,06	-0,05%	4000,82	-0,24%	4225,39	5,54%	4182,93	-5%
4T	6229,25	6232,12	-0,05%	6244,17	-0,24%	6806,32	8,48%	6792,77	-8%
4I	5251,00	5253,41	-0,05%	5263,59	-0,24%	4981,01	5,42%	5085,44	3%
5T	5745,20	5747,84	-0,05%	5758,98	-0,24%	5776,58	0,54%	6232,46	-8%
5I	4934,92	4937,18	-0,05%	4946,75	-0,24%	5068,89	2,64%	5054,18	-2%

Apêndice D – Lista de aços de uma barça para transporte de líquidos.

Este anexo apresenta uma tabela que contempla a lista de aços da embarcação, esta lista contém todos os diferentes tipos de perfis e chapas utilizados, bem como suas quantidades. Nela é possível perceber a grande variedade de dimensões, como também a presença de uma grande gama de itens com poucas aplicações. Estas duas observações dão a entender que pode ser possível promover algumas mudanças no projeto com vistas à padronização e trazer benefícios econômicos e operacionais. Em termos de perfis, tem-se diferentes tipos e bitolas, como os perfis chatos (F 7.9 e F 9.5), as abas (ABA 90, ABA 100 e ABA 150) e os perfis bulbo (B 120 x 8, B 140 x 9 e B 160 x 8). Em termos de chapas, tem-se três diferentes espessuras, 7.9, 9.5 e 12.5, porém uma infinidade de dimensões. Em relação às chapas, muitas das dimensões planas, ou seja, sem considerar as espessuras, acabam obrigando-se a serem específicas por questões de acabamento. Já quando estamos falando de um percentual das espessuras das chapas e de grande parte dos perfis, pode ser possível fazer sua substituição procurando a padronização.

Tabela D1 - Lista de aços

Tipo	Dimensões [mm]	População
Chapa Transversal	9.5 x 650 x 1050	275
	9.5 x 260 x 1210	38
	9.5 x 100 x 100	164
	9.5 x 260 x 5390	36
	9.5 x 300 x 5390	38
	7.9 x 1980 x 1050	8
	7.9 x 4580 x 1050	8
	7.9 x 100 x 100	8
	7.9 x 1210 x 5600	8
	9.5 x 6650 x 5600	4
	9.5 x 1950 x 1050	38
	9.5 x 4580 x 1050	38
	9.5 x 270 x 5390	2
	9.5 x 350 x 350	72
Perfil Vertical	F 7.9 x 80	40
	F 7.9 x 100	828
	ABA 90	166
	ABA 100	192
Perfil Horizontal	F 9.5 x 100	228
	ABA 150	14
	7.9 x 150 x 250	1
	B 140 x 9	108
	B 120 x 8	302
Chapa Longitudinal	B 160 x 8	284
	9.5 x 1050 x 13200	5
	16 x 10800 x 964	10
	9.5 x 10800 x 1220	16
	9.5 x 10800 x 2440	12
	7.9 x 4800 x 760	24
	7.9 x 4800 x 1150	24
	9.5 x 10800 x 2910	12
	7.9 x 10800 x 2420	16
	12.5 x 10800 x 5933	10
	12.5 x 10800 x 1220	5
	9.5 x 1080 x 4800	20
	9.5 x 1080 x 2400	50
9.5 x 10800 x 5980	12	