

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

CÁLCULO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MOMENTO FLETOR ÚLTIMO  
FRENTE À REDUÇÃO DE ESPESSURA NAS CHAPAS DE EMBARCAÇÕES DE  
NAVEGAÇÃO INTERIOR

por

Lucas Nicolay Pizzatto

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, agosto de 2012

CÁLCULO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MOMENTO FLETOR ÚLTIMO  
FRENTE À REDUÇÃO DE ESPESSURA NAS CHAPAS DE EMBARCAÇÕES DE  
NAVEGAÇÃO INTERIOR

por

Lucas Nicolay Pizzatto  
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. Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Peter Kaleff, COPPE/UFRJ

Prof. Dr. Inácio Benvegnu Morsch, PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Alberto Tamagna, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Horácio A Vielmo  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 31 de agosto, 2012

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família pelo incondicional apoio sem o qual eu nunca teria conseguido.

Agradeço o meu orientador Prof. Ingancio Iturrioz por todo conhecimento compartilhado além do apoio e ajuda que foram fundamentais para elaboração deste trabalho.

Ao Eng. André Schaan Casagrande, pela oportunidade de trabalho no NOTAQ, incentivo pela realização do mestrado e pela amizade. Agradeço também ao companheirismo de todos os professores e alunos bolsistas do GMAP, em especial ao Eng. Luis Kostascki pelo incansável apoio a este trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a UFRGS, ao PROMEC e todos os seus professores e ao CNPq pelo apoio científico e financeiro, sem os quais este trabalho não teria existido.

## RESUMO

O desenvolvimento de técnicas que deem sobrevida a navios com mais de 20 anos de navegação interior é crucialmente importante para um país com a demanda de mobilidade como a que tem o Brasil. Nesse sentido, uma técnica que pode ser citada é a determinação da vida útil potencial (VUP), que propõe uma forma de avaliar o aumento da vida útil de embarcações de navegação interior. Na busca por índices globais que identifiquem as condições do navio, considera-se o cálculo do momento fletor último da seção mestra do navio.

O presente trabalho apresenta, de forma detalhada, a aplicação dos principais métodos de cálculo do momento fletor último em três casos de estudo: um perfil caixão, o perfil reduzido de embarcação de fundo duplo (estudada por Nishihara, 1983) e a seção mestra de uma embarcação típica utilizada para navegação na Bacia do Sudeste (NT Guarita). Os métodos empregados para o cálculo do momento fletor último são: métodos direto e iterativo propostos pela Associação Internacional de Sociedades Classificadoras (IACS 2008), Método da Resistência Direta, Método da Largura Efetiva e análises não lineares através do Método dos Elementos Finitos.

Com o intuito de obter uma resposta mais coerente, é proposta uma modificação no Método Iterativo [IACS, 2008]. O método modificado é então utilizado no estudo de sensibilidade do momento fletor último frente à redução de espessura das chapas de convés (considerando a seção mestra da embarcação NT Guarita). Os resultados obtidos, bem como as conclusões a respeito, são apresentados ao final do trabalho. Adicionalmente, é proposto um índice para uso na avaliação do nível de não linearidade da resposta dos elementos locais, quando submetidos a reduções de espessura.

Palavras-chave: Momento fletor último; navegação interior; análise de sensibilidade do momento fletor último; índice de não linearidade.

## **ABSTRACT**

The increasing of ships life extension can only be provided by new methodologies development. A new method to determine the potential ship shelf life is being proposed, being part of the new method, in this document the ultimate bending momentum of the master ship section is study. The study presents the application of the most popular methods to calculate the ultimate bending for three different cases: box section, double hull ship studied by Nishihara, 1983 and master section of a typical boat used in Bacia do Sudeste, NT Guarita.

The methods applied to calculate the ultimate bending momentum are: direct and iterative methods proposed by the International Association of Classification Societies, IACS 2008, Direct Strength Method, Method of Effective Width and also non-linear analysis using the Finite Element Method.

In order to obtain a more coherent response, a change in the Iterative Method [IACS, 2008] has been proposed. The new method is used to study the sensitivity of the ultimate momentum to the reduction of deck thickness applied the NT Guarita. The results and conclusions will be presented in this study. Additionally, will be proposed an index to evaluate the level of non-linearity of the local elements response, when exposed to thickness reduction.

**Keywords:** Ultimate Bending; inland navigation; sensitivity of the ultimate bending; non-linearity index.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos .....	4
1.2	Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>6</b>
2.1	Cálculo Estrutural de Navios .....	6
2.2	Flambagem Local .....	9
2.3	Método da Largura Efetiva .....	11
2.3.1	Método da Largura Efetiva – NBR 14762 .....	13
2.4	Método da Resistência Direta .....	15
2.5	Método Direto IACS .....	18
2.6	Método Iterativo IACS .....	21
2.7	Análise Não Linear Utilizando o Método dos Elementos Finitos ....	24
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
3.1	Cálculo Estrutural de Navios .....	29
<b>4</b>	<b>APLICAÇÕES .....</b>	<b>32</b>
4.1	Aplicação (CAIXÃO) .....	33
4.2	Aplicação Perfil Reduzido Embarcação de Fundo Duplo (BARCO_S) .....	35
4.3	Aplicação Perfil Típico Bacia do Sudeste (GUARITA) .....	37
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
5.1	CAIXÃO .....	43
5.1.1	Método dos Elementos Finitos (M_FEM) .....	43
5.1.2	Método da Resistência Direta (M_RD) .....	45
5.1.3	Método da Largura Efetiva (M_LEF1 e M_LEF2) .....	47
5.1.4	Método Direto IACS (M_CSR1 e M_CSR2) .....	49
5.2	BARCO_S .....	51
5.2.1	Método dos Elementos Finitos (M_FEM) .....	51
5.2.2	Método da Resistência Direta (M_RD) .....	52
5.2.3	Método Direto IACS (M_CSR1 e M_CSR2) .....	54
5.2.3	Método Iterativo IACS (M_ITER) .....	54
<b>6</b>	<b>MÉTODO ITERATIVO MODIFICADO .....</b>	<b>61</b>
6.1	Comparação Método M_ITER com MEF .....	61
6.2	Comparação Iterativo Modificado – Modelos Locais .....	67
<b>7</b>	<b>ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO MOMENTO FLETOR ÚLTIMO FRENTE À REDUÇÃO DE ESPESSURA DAS CHAPAS .....</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>84</b>

<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
	<b>APENDICE A .....</b>	<b>89</b>
	<b>APENDICE B .....</b>	<b>93</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Conceito de aplicação do método da Vida Útil Potencial .....	2
Figura 2.1	Representação esquemática da distribuição da força peso e empuxo em um navio tanque.....	6
Figura 2.2	Figura 2.2 – (a) Aquebramento (b) Tosamento.....	7
Figura 2.3	Esquema de uma embarcação onde se indicada a seção mestra e corpo paralelo.....	8
Figura 2.4	Exemplo dos tipos de estabilidade.....	10
Figura 2.5	Instabilidade bifurcacional ( Camotin et al. 2000).....	11
Figura 2.6	(a) Exemplo de placa submetida a flexão; (b) Distribuição de esforços na placa comprimida.Fonte (Yu et al,2000).....	13
Figura 2.7	Classificação dos elementos quanto AA ou AL (Fonte: NBR 14762).....	14
Figura 2.8	Definição do parâmetro $k$ (Fonte: NBR 14762).....	15
Figura 2.9	Classes de flambagem, perfil C.....	16
Figura 2.10	Curvas de ajuste semi-empíricas, MRD.....	17
Figura 2.11	Curva típica obtida utilizando o programa CUFSM (Schaffer 2006).....	18
Figura 2.12	Aplicação de momento seção caixão.....	21
Figura 2.13	Analogia esquemática método direto IACS.....	22
Figura 2.14	Classificação dos elementos FONTE:CSR IACS.....	23
Figura 2.15	Exemplo de equilíbrio instável.....	27
Figura 2.16	Propostas de distúrbio, equilíbrio estável.....	28
Figura 3.1	Esquema que apresenta uma embarcação submetida ate atingir seu momento fletor último.....	29
Figura 3.2	Curva estrutural característica, momento último.....	30
Figura 4.1	Esquemático aplicação perfil caixão.....	33

Figura 4.2	Resultado dos vários métodos aplicados para o momento fletor último da seção.....	34
Figura 4.3	Perfil reduzido embarcação de fundo duplo. (Fonte: adaptado de Kuo et al , 2003).....	35
Figura 4.4	(a) Foto real da embarcação NT Guarita (Fonte: Navegação Guarita S.A.) (b) Seção mestra da embarcação.....	38
Figura 4.5	Esquema simplificado da estrutura do NT Guarita.....	38
Figura 4.6	Comparação dos modelos convés simples e duplo.....	40
Figura 4.7	Comparação dos resultados para a análise não linear em elementos finitos e solução pelo método IACS Iterativo.....	41
Figura 4.8	Modelo NT Guarita em elementos finitos, carga última.....	42
Figura 5.1	Comparação entre a solução linear ( curva vermelha) e a solução não linear física e geométrica (curva em azul).....	44
Figura 5.2	(a) Resposta estrutural da análise não linear, modelo perfil caixão. (b) Deformada e tensões de Von Misses na condição de momento fletor último.....	45
Figura 5.3	Solução do primeiro modo de flambagem usando CUFSM.....	46
Figura 5.4	Modelos independentes perfil caixão.....	48
Figura 5.5	Seção efetiva em escala (OBS: para facilitar a visualização a espessura da parede foi multiplicada por dez vezes, as demais dimensões estão proporcionais).....	49
Figura 5.6	Esquema de aplicação método direto.....	50
Figura 5.7	(a) Resposta estrutural modelo convés (b) Seções efetivas.....	50
Figura 5.8	Resultado da análise de elementos finitos para o momento de alquebramento e tosamento, perfil fundo duplo. (eixos normalizados em função do momento fletor último e a respectiva rotação na condição de alquebramento $M_{u-alq}$ e $\theta_u$ ).....	52
Figura 5.9	Cargas e comprimento de meia onda para o primeiro modo de flambagem, método das faixas finitas.....	53
Figura 5.10	Descritivo modelo convés perfil fundo duplo.....	55
Figura 5.11	Resposta análise não linear, modelo convés perfil fundo duplo.....	55

Figura 5.12	Divisão dos elementos independentes, perfil fundo duplo.....	57
Figura 5.13	Comportamento estrutural elementos quina e longitudinal enrijecido.....	58
Figura 5.14	Momento resultante e posição do eixo neutro, método iterativo IACS, perfil fundo duplo.....	59
Figura 6.1	(a) Elementos de resposta linear. (b) Elemento típico de convés.....	62
Figura 6.2	Comparação da resposta das curvas estruturais método iterativo com a resposta da análise em elementos finitos.....	63
Figura 6.3	Comparação da curva de resistência método iterativo e a resposta dos elementos correspondentes na análise não linear em elementos finitos.....	63
Figura 6.4	Resultado método iterativo modificado.....	64
Figura 6.5	Diferença no campo de deformações para o método iterativo.....	65
Figura 6.6	Análise de sensibilidade método iterativo modificado.....	66
Figura 6.7	Consideração da estrutura para o método iterativo.....	68
Figura 6.8	Comportamento estrutural dos elementos para diversas condições de contorno.....	69
Figura 6.9	Comparação dos resultados dos modelos locais dos elementos 2,3 e 4.....	70
Figura 6.10	Cálculo do momento fletor último utilizando o método iterativo com modelos locais.....	71
Figura 7.1	Comportamento do primeiro modo de flambagem da seção em relação ao comprimento.....	73
Figura 7.2	Distribuição das regiões analisadas.....	74
Figura 7.3	Resposta dos elementos considerando uma redução uniforme da espessura.....	76
Figura 7.4	Comportamento do Índice de não linearidade para cada modelo local.....	77
Figura 7.5	Comportamento modelo local quina.....	78
Figura 7.6	Variação do valor do momento último em função da redução uniforme de espessura em cada um dos elementos.....	79

Figura 7.7	Índice de não linearidade aplicado ao cálculo do momento fletor último da seção mestra.....	81
Figura 7.8	Resultados para redução do momento fletor último e índice de não linearidade para cada elemento local.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Propriedade do material aplicação perfil caixão .....	33
Tabela 4.2	Propriedade do material aplicação BARCO_S.....	36
Tabela 4.3	Valores encontrados para momento fletor último por cada um dos métodos aplicados .....	36
Tabela 4.4	Valores de Momento Fletor Último para embarcação NT Guarita ...	40
Tabela 5.1	Resultados método direto IACS, perfil fundo duplo .....	56
Tabela 5.2	Resultados obtidos pelo método iterativo IACS(M_ITER), perfil fundo duplo .....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

$AA$	Elementos de borda vinculada
$AL$	Elementos de borda livre
$A_{eff}$	Área efetiva, $m^2$
$A_{total}$	Área total, $m^2$
$A_{-e}$	Área, seção com espessura reduzida, $m^2$
$A_0$	Área, seção íntegra, $m^2$
$b$	Largura da placa, m
$b_{ef}$	Largura efetiva, m
$Cu_{-e}$	Carga última, seção com espessura reduzida, N
$Cu_0$	Carga última, seção íntegra, N
$d$	Distância do eixo neutro, m
$d_{red}$	Posição do eixo neutro da seção reduzida, m
$E$	Módulo de elasticidade, Pa
$f$	Força aplicada, N
$f_{max}$	Força máxima, N
$I$	Momento de Inércia, $m^4$
$I_{red}$	Momento de inércia da seção reduzida, $m^4$
$I_{nl}$	Índice de não linearidade
$I_{-e}$	Momento de inércia, seção com espessura reduzida, $m^4$
$I_0$	Momento de inércia, seção íntegra, $m^4$ .
$k$	Coeficiente de distribuição de tensões
$M$	Momento Aplicado, N.m
$M_u$	Momento Fletor Último, N.m
$Mu_{-e}$	Momento fletor último, seção com espessura reduzida, N.m
$Mu_0$	Momento último, seção íntegra, N.m

$M_{u-alq}$	Momento fletor último de alquebramento, N.m
$M_{u-tos}$	Momento fletor último de tosamento, N.m
$t$	Espessura, m
$z_{dk-mean}$	Altura total do convés, m
$z_{NA-red}$	Altura da posição do eixo neutro, m
$Z_{red}$	Módulo resistente da seção reduzida, $m^4/m$
$z_i$	Distância do eixo neutro do elemento $i$ , m
$\varepsilon_i$	Deformação no elemento $i$ , m/m
$\theta_u$	Rotação da seção na condição de momento fletor último, rad
$\lambda_p$	Índice de esbeltez
$\sigma$	Tensão, Pa
$\sigma_{esc}$	Tensão de Escoamento de Von Mises, Pa
$\sigma_u$	Tensão equivalente a carga última, Pa

# 1 INTRODUÇÃO

Observando o sistema de transporte hidroviário interior no Rio Grande do Sul, pode-se perceber uma redução na participação desse modal ao longo do tempo. Esse fato nada tem a ver com a segurança das embarcações, com a redução na produção ou importação de insumos nas regiões interiores, ou com o tempo de transporte quando comparado a outro modal. Está relacionado com a predominância do modal rodoviário, este que é beneficiado por políticas de governo “míopes” em vários aspectos. Para reverter esta situação na região Sul, são necessários programas governamentais que incentivem aqueles que utilizam as hidrovias a aumentar sua frota com embarcações novas e estender o uso das embarcações já existentes (ampliando a capacidade de transporte e reduzindo fretes, entre outras ações que podem ser listadas como prioritárias).

Dentro desse contexto, as restrições ao emprego de embarcações com idade avançada, recentemente empregadas por embarcadores, acarretam aumento nos fretes. Isso decorre dos altos custos de operação/manutenção e de seguro e da grande depreciação do valor comercial da embarcação – uma vez que, após determinado tempo de vida, a embarcação antiga deverá ser destinada a outra atividade, reduzindo o tamanho da frota efetiva.

Surge, assim, uma demanda pela aplicação de técnicas inovadoras no sentido de estender o potencial de vida útil das embarcações de navegação interior que tenham sido objeto de intervenções motivadas pela necessidade de alterações no porte ou na capacidade de transporte de cargas diversificadas (obras de modernização e conversões). Para supri-la, o Grupo de Mecânica Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (GMAp – UFRGS) desenvolveu um estudo, financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), que dá início a uma nova área de conhecimento e desenvolvimento para o setor na região.

Buscou-se fornecer critérios que garantam o prolongamento da utilização de embarcações com idade superior a 20 anos. Nesse sentido, é sugerida uma metodologia que introduz o conceito de Vida Útil Potencial (VUP) para embarcações de navegação interior supracitadas, com o objetivo de garantir a preservação da sua integridade estrutural, seu desempenho operacional e o atendimento aos requisitos legais. O conceito de Vida Útil Potencial (VUP) de 15 (quinze) anos para aquelas embarcações que passem por um processo metódico de

recuperação e enquadramento normativo relacionado aos requisitos legais vigentes, com possibilidade técnica de aplicação ilimitada, é apresentado em forma esquemática na Figura 1.1.

A Figura 1.1 pode ser interpretada da seguinte forma: uma embarcação construída sob todas as condições normativas e de classificação, e cuja vida útil de referência seja considerada de 20 anos (representada pelo intervalo I1), quando submetida a um processo de atualização que cumpra com os quesitos propostos, recebe um certificado de vida útil potencial de 15 anos. Independentemente do número de vezes que seja aplicado o método e de quando o seja, o limite superior de vida útil potencial (VUP) será sempre de 15 anos.

O desgaste representado de forma difusa entre a primeira e a segunda aplicação do método indica que os critérios de manutenção adotados pelo armador podem acelerar ou retardar o desgaste e obsolescência da embarcação, podendo também adiar a necessidade de uma aplicação do método proposto. Espera-se que, uma vez definido o critério e homologado nos órgãos da Autoridade Marítima com as parcerias das Sociedades Classificadoras, sua aplicação seja possível, fornecendo à frota brasileira uma possibilidade de sobrevida que mantém a segurança e conforto necessários.

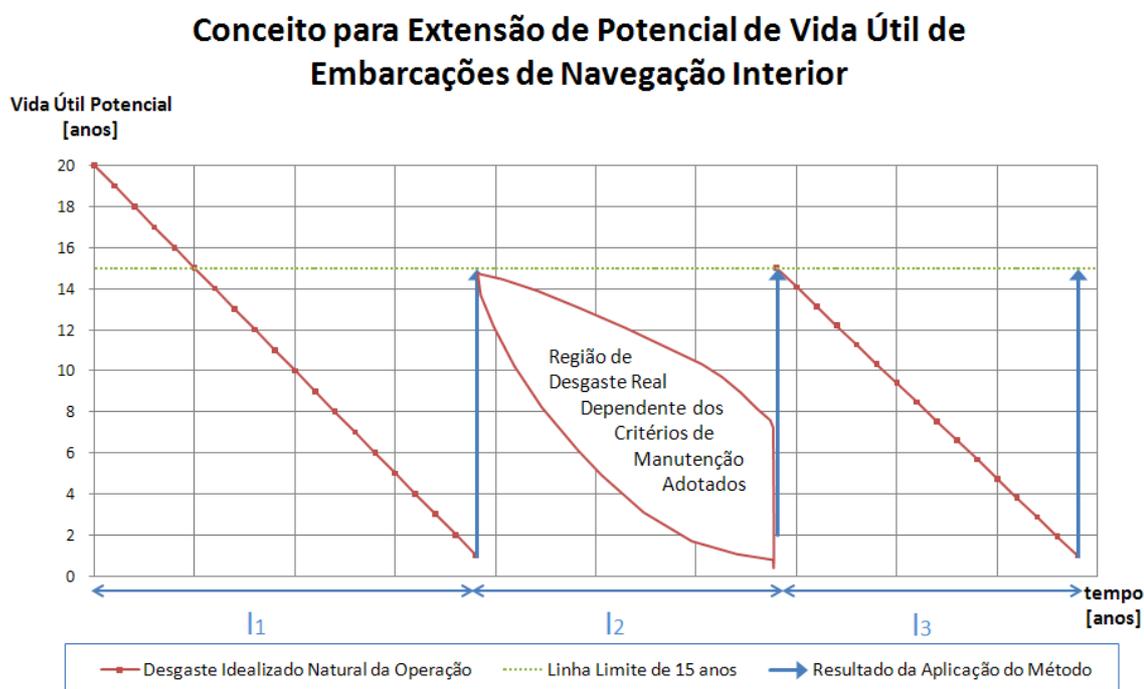


Figura 1.1 – Conceito de aplicação do método da Vida Útil Potencial

Para uma avaliação criteriosa e objetiva, as embarcações podem ser decompostas em diferentes sistemas constituintes, podendo assim, cada um deles ser avaliado separadamente e, portanto, definir-se o nível necessário de intervenção com objetividade. Em relação ao casco, na procura de índices globais que forneçam informação sob o estado do navio e que permitam, em forma quantitativa, identificar se o navio analisado cumpre os quesitos para considerá-lo com vida útil potencial (VUP) estendida, se insere o presente trabalho, no qual se explora o cálculo do momento fletor último de uma embarcação e estuda a sensibilidade desta propriedade à degradação da embarcação. Neste trabalho, entende-se por momento fletor último, a tradução do inglês “*ultimate bending*” que trata do momento limite de uma embarcação. Espera-se que com a compreensão dos métodos de cálculo e dos mecanismos envolvidos, esta informação sirva de insumo para a construção de um índice estrutural global de integridade do casco, que analisa a estrutura íntegra e, posteriormente, degradada.

No contexto da navegação interior, não existe recomendação específica – por parte das sociedades classificadoras que regulam os critérios de projeto, manutenção e operação – quanto a um valor mínimo de momento fletor último, principalmente pelo tamanho e tipo das estruturas, tão pouco é proposta uma forma de cálculo nas regras e referências internacionais. Na navegação interior, esta propriedade é controlada indiretamente por outros requisitos estruturais estabelecidos, ao passo que, em um contexto de navegação em mar aberto, principalmente em grandes navios tanques, geralmente petroleiros, com casco singelo ou duplo, existe por parte da Associação Internacional de Sociedades Classificadoras (IACS – International Association of Classify Societies) um documento que regula tal propriedade, chamado “Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers” (2008). Tal documento regula os valores mínimos indicados e expõe também dois métodos de cálculo, os quais são utilizados neste trabalho.

Além do estudo detalhado dos métodos propostos pela IACS, este trabalho aplica alguns métodos não convencionais à engenharia naval para o cálculo do momento fletor último, além de propor uma modificação em um dos métodos, todos frente a uma variação de espessura correspondente à redução pelo efeito da corrosão, como ocorre em cascos com idade avançada. Os métodos aqui apresentados para o cálculo do momento fletor último são: Os métodos direto e iterativo propostos pela Associação Internacional de Sociedades Classificadoras, IACS 2008, Método da Resistência Direta, Método da Largura Efetiva, e também análises não lineares utilizando o Método dos Elementos Finitos.

## **1.1 Objetivos**

No contexto exposto acima, definem-se como objetivos do presente trabalho a análise da variação do momento fletor último frente à redução das espessuras das chapas estruturais do casco de uma embarcação tanque típica, utilizada na navegação na Bacia do Sudeste, aplicando diversos métodos de cálculo para esse fim. Pode ser apontado como objetivo principal, portanto, o estudo de sensibilidade do momento fletor último relacionada à espessura das chapas nas diversas regiões da estrutura. Como objetivos secundários podem ser citados a compreensão e detalhamento de cada um dos métodos propostos para o cálculo do momento fletor último bem como uma comparação dos valores alcançados.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

Após a presente introdução, apresentam-se os fundamentos teóricos de forma sucinta e focada nas aplicações realizadas, citando em cada um dos tópicos os trabalhos referências nos respectivos assuntos. É também apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do cálculo do momento fletor último, onde são citados os principais trabalhos no assunto.

Na sequência, inicia-se o capítulo onde os métodos posteriormente aplicados são propostos para o cálculo do momento fletor último e, quando pertinentes, há três exemplos diferentes: um perfil caixão que será nominado CAIXÃO; um perfil de embarcação de fundo duplo que será chamado de BARCO\_S; e um perfil típico de embarcações que navegam na Bacia do Sudeste chamado aqui de GUARITA. Esse último utiliza o mesmo nome do NT Guarita, uma embarcação tanque antiga, cuja aplicação do método é o foco do projeto financiado pela FINEP que motivou esse trabalho. O presente trabalho está organizado de forma que primeiramente são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada método em cada aplicação, capítulo 4, e os detalhes de cada uma das aplicações são apresentadas posteriormente no capítulo 5.

No estudo do caso CAIXÃO, é tratada uma aplicação simples onde fica clara a mecânica do processo estudado e são expostas algumas características dos métodos utilizados. Já na aplicação BARCO\_S, o objetivo é, além de expor cada um dos métodos a uma estrutura naval, comparar os valores alcançados a valores experimentais divulgados na literatura com o intuito de validar os resultados. Por fim, os métodos são aplicados a um perfil típico de

embarcação utilizado na Bacia do Sudeste (GUARITA). É realizado um estudo de caso real, para verificar a adequação dos métodos à realidade regional, além de fornecer insumo para as investigações que se seguem no decorrer do trabalho.

Com o objetivo de detalhar a aplicação de cada método, é apresentada no capítulo 5, uma detalhada descrição da aplicação de cada método para cada um dos cenários envolvidos.

Após as aplicações, segue no capítulo 6 a proposta de um método modificado, que consiste numa abordagem híbrida entre os métodos previamente estudados.

Finalmente, no capítulo 7, é realizado um estudo de sensibilidade do efeito da redução da espessura das chapas sobre o valor do momento fletor último da embarcação, bem como são identificadas as regiões às quais o momento fletor último é mais sensível. Neste capítulo, é proposto também o índice de não linearidade, que é utilizado como base para a análise de sensibilidade.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Cálculo Estrutural de Navios

O processo de carga e descarga de embarcações, assim como sua navegação, submete a estrutura da embarcação a diferentes esforços, oriundos, por princípio, do equilíbrio das forças de empuxo e das forças resultantes do peso da carga e da própria estrutura e equipamentos da embarcação. As forças de empuxo são resultantes da ação da pressão hidrostática sobre o corpo submerso e, no momento fletor em que a embarcação se encontra flutuando, são iguais em módulo às forças peso de todo o conteúdo desta. A Figura 2.1 apresenta, de forma esquemática, uma distribuição de forças peso e de empuxo numa embarcação genérica. Obviamente, a integral das duas funções é igual.

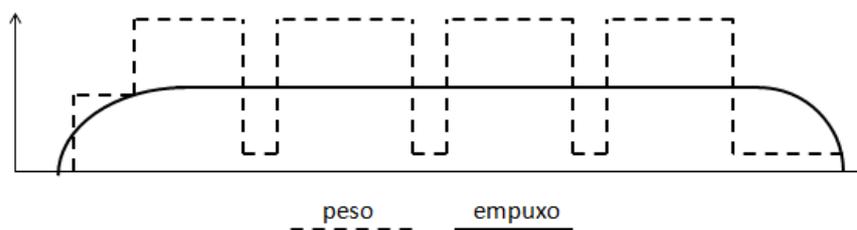


Figura 2.1 – Representação esquemática da distribuição da força peso e empuxo em um navio tanque.

A partir da condição de carga a que a embarcação é submetida (principalmente numa embarcação estruturada longitudinalmente e que, por isso, possui uma das dimensões – comprimento – significativamente maior do que as outras), haverá uma deflexão do casco – também chamado de viga navio – que poderá comprimir ou tracionar os elementos longitudinais localizados acima ou abaixo da linha neutra do mesmo. A esses efeitos são dados os nomes tosamento e alquebramento.

Quando a navegação ocorre na presença de ondas, os esforços ficam ainda maiores, pois ocorre uma discrepância significativa entre a distribuição das forças de empuxo e de peso, criando assim os cenários conhecidos como tosamento e alquebramento. Vale ressaltar que não é necessária a existência de ondas para a ocorrência destes cenários, pois tais ondas podem ocorrer apenas em função da distribuição das forças peso e empuxo. Segundo

Okumoto, Y. et al, 2009, o tosamento e alquebramento em função das ondas seriam classificados como dinâmicos e estáticos quando ocorressem em função da distribuição de forças.

A condição de tosamento é o cenário de carga onde a embarcação se encontra submetida a um momento fletor longitudinal que comprime os elementos estruturais superiores, chamados de convés, e traciona os elementos inferiores, denominados fundo. A Figura 2.2 (a) ilustra esta possibilidade. Já a situação de alquebramento ocorre à aplicação contrária do momento longitudinal, onde a parte superior da embarcação é tracionada e a parte inferior comprimida. A Figura 2.2 (b) ilustra este cenário.

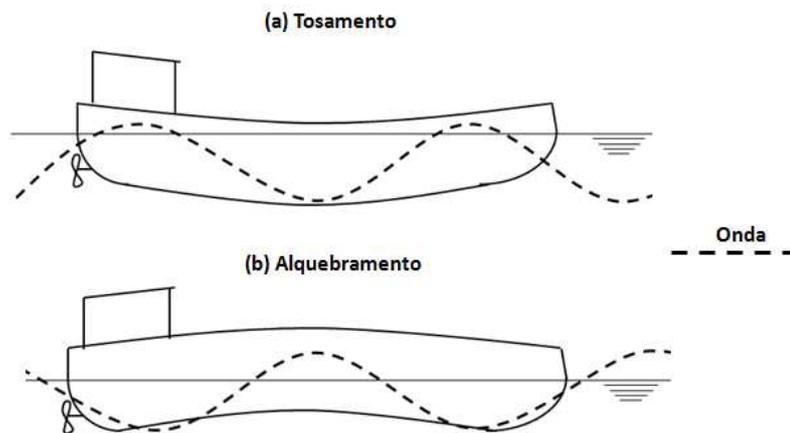


Figura 2.2 – (a) Tosamento (b) Alquebramento.

Existem ainda outros tipos de sollicitação, tais como os momentos de torção e horizontal e as forças cortantes. Há uma série de trabalhos iniciados por Fairbairn, 1865, que estudam a interação entre as sollicitações e a consequência da sobreposição dos esforços citados.

Uma das maneiras clássicas de se abordar o estudo dos esforços resultantes na estrutura é considerar a embarcação como uma viga, chamada de viga navio, e a esta viga aplicar as distribuições de carga, sejam as cargas em decorrência da força de empuxo, da força peso ou da ação dinâmica das ondas sobre a embarcação. Este método vem sendo empregado com sucesso ao longo dos anos e torna possível a sobreposição das diferentes sollicitações aplicadas à embarcação. Entretanto, ele analisa apenas a estrutura de forma global, e não

considera as não linearidades intrínsecas aos perfis comprimidos. Okumoto, Y. et al, 2009, detalha este método.

Uma das maneiras mais simples de estudo utilizando a técnica da viga navio é considerar a viga como de propriedades constantes, e estas obtidas a partir da seção mestra da embarcação. A seção mestra nada mais é que a seção “base” do corpo paralelo que por sua vez é a região de geometria constante de embarcação, na Figura 2.3 se apresentam estas definições.

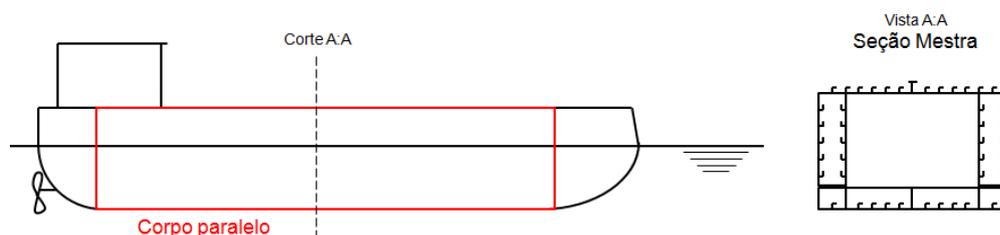


Figura 2.3 – Esquema de uma embarcação onde é indicada a seção mestra e corpo paralelo.

A navegação na Bacia do Sudeste, região geográfica de interesse deste trabalho, apresenta condições de navegação específicas, onde as dimensões e comprimento de onda são relativamente menores quando comparados à navegação em mar aberto. Um estudo a respeito das condições de vento e ondas na Bacia do Sudeste que permite caracterizar o tipo de solicitações esperadas é apresentado por Toldo, et al, 2006. Em função das condições mais brandas de navegação, as cargas dinâmicas não tem grande relevância frente às cargas estáticas. Ferreira, F., et al, 2008, apresentam a criticidade das condições estáticas frente às dinâmicas e conclui que não é esperada ocorrência de fadiga nas embarcações que navegam na bacia do Sudeste.

Nas condições de navegação na Bacia do Sudeste, a principal solicitação a qual as embarcações estão sujeitas é devida aos momentos longitudinais, que têm sua origem na distribuição das cargas na embarcação. Para determinação dos esforços dentro do limite linear, o uso da teoria da viga navio é bem adequado. Entretanto, para uma análise de momento fletor último, é necessária uma análise levando em conta não linearidades físicas e geométricas, pois em uma análise até o colapso, principalmente os elementos comprimidos estão sujeitos ao fenômeno da flambagem local e plastificação.

A Associação Internacional das Sociedades Classificadoras, IACS, 2008, sugere o uso de alguns métodos para o cálculo do momento fletor último a que uma embarcação é capaz de resistir, inclusive nos casos de ser necessária uma maior precisão, a mesma recomenda o uso de análise não linear utilizando modelos de elementos finitos.

## **2.2 Flambagem Local**

Ao contrário dos elementos unidimensionais (barras ou vigas) onde a carga crítica de flambagem está associada à carga de colapso, no caso dos elementos bidimensionais (placas e cascas em geral) a carga crítica indica uma alteração na rigidez da estrutura, mas não seu colapso, caracterizando assim, um comportamento pós flambagem nas estruturas.

Flambagem é conhecida como um fenômeno estrutural de instabilidade, onde a estrutura apresenta um grande deslocamento sem que ocorra um aumento proporcional da reação, caracterizando uma alteração na derivada na curva de resposta estrutural, ponto de bifurcação na Figura 2.5. A carga onde ocorre este fenômeno é conhecida como carga crítica de flambagem.

Em elementos complexos podem existir condições geométricas que isolem o comportamento estrutural das regiões, nestes cenários é possível que ocorra a flambagem em regiões de forma isolada, sem que ocorra um fenômeno global na estrutura, caracterizando assim a flambagem local. A flambagem local produz a perda de rigidez da estrutura sem que ocorra o colapso da mesma, porém se mantido o acréscimo de carga, é possível uma interação entre os modos de flambagem (global e local) e também plastificação, que levarão a estrutura ao colapso.

Como pode ser observado na Figura 2.3, a seção mestra típica de embarcações, inclusive aquelas utilizadas na Bacia do Sudeste, apresenta uma série de enrijecedores longitudinais que acabam isolando as regiões, tornando a flambagem das chapas um fenômeno local. Geralmente em aplicações navais, considerando um cenário onde se aplica momento, a seção mestra no ponto onde se inicia a flambagem local dos elementos da estrutura, marca o início do comportamento não linear, que em alguns casos pode agir de forma combinada com outras não linearidades, como plastificação.

No cálculo de estruturas esbeltas é indispensável a consideração da questão da estabilidade. Uma forma de descrever claramente os diversos tipos de equilíbrio que podem acontecer numa estrutura é utilizando a interação de uma esfera rígida que pode se movimentar sobre uma superfície com diferentes raios de curvatura, é possível classificar os diferentes tipos de equilíbrios encontrados como equilíbrio estável, instável e neutro os quais se ilustram na Figura 2.4. O entendimento destes fenômenos e a aplicação destes conceitos a estruturas deformáveis são a base da teoria da estabilidade estrutural.

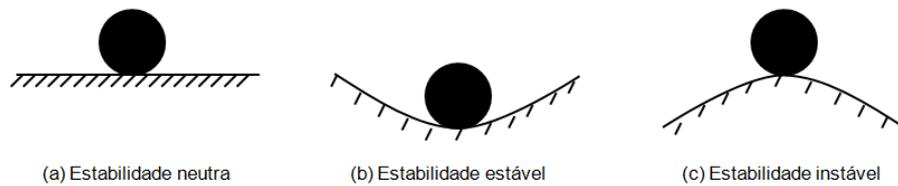


Figura 2.4 – Exemplo dos tipos de estabilidade

O colapso por flexão da estrutura de uma embarcação está relacionado, mesmo que indiretamente, à flambagem local dos elementos da sua estrutura. Assim, o entendimento da flambagem nestes elementos é fundamental para determinação do momento fletor último. Na Figura 2.5 é apresentada uma curva de resistência característica de elementos enrijecidos, principais elementos estruturais das embarcações.

Aplicando compressão a uma estrutura, inicialmente ela se comportará linearmente e para um certo nível de carga se desenvolve o primeiro modo de flambagem. Neste ponto há uma bifurcação na curva de força por deslocamento e logo após um comportamento estável. Por outro lado é possível que o modo de flambagem não se desenvolva, então a estrutura continua a responder de forma linear (linha pontilhada Figura 2.5) até ser atingida a carga de colapso por plastificação, ou até que outro modo de flambagem seja ativado. O comportamento de aumento de resistência mesmo após ser atingida a primeira carga crítica elástica é conhecido como resistência pós flambagem. A Figura 2.5 ilustra as etapas supracitadas.

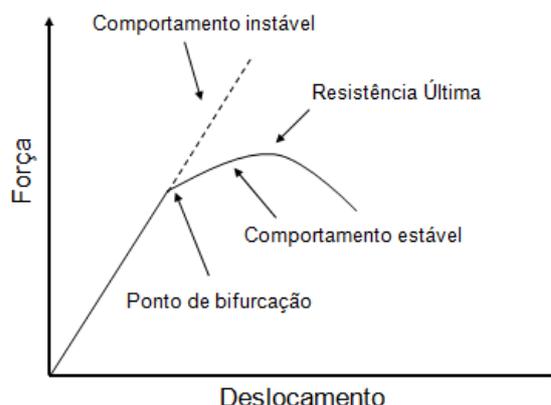


Figura 2.5 – Instabilidade bifurcacional (Camotin et al. 2000).

O cálculo da resistência última depende do ponto de bifurcação. Tal ponto é também chamado de carga crítica de flambagem, a qual está associada a uma forma de deformação chamada de modo de flambagem. Em uma estrutura complexa como a de uma embarcação o colapso estará associado a modos de flambagem locais de suas chapas reforçadas por enrijecedores. Camotin et al, 2000, apresenta uma completa discussão a respeito dos diferentes tipos de flambagem em estruturas e suas características.

O cálculo da resistência última de uma estrutura é muito complexo e passa geralmente por análises não lineares em modelos de elementos finitos. Com o objetivo de simplificar o cálculo são propostos na literatura alguns métodos, como o método da largura efetiva e o método da resistência direta, que de uma maneira simplificada aproximam o valor da resistência última da estrutura. No campo das estruturas navais, métodos para cálculo da resistência última são propostos pela IACS, 2008.

### 2.3 Método da Largura Efetiva

Ao contrário dos elementos unidimensionais como barras e placas, elementos enrijecidos quando submetidos à compressão não colapsam ao atingirem a carga de flambagem, apresentando resistência e admitindo cargas maiores que a carga crítica de flambagem, este comportamento é conhecido como resistência pós flambagem. Geralmente a análise do comportamento pós flambagem até o colapso é muito complexa. O Método da Largura Efetiva propõe uma abordagem simples, que considera o equilíbrio de forças na situação de

colapso como insumo para o cálculo da largura efetiva. A largura efetiva depois de calculada passaria a representar uma geometria equivalente da estrutura.

Em uma chapa comprimida quando aplicada uma carga inferior à carga crítica de flambagem, a distribuição de tensões na chapa é uniforme (considerando constantes as propriedades do material e geometria da seção). Caso sejam aplicadas cargas maiores que a carga crítica de flambagem as tensões deixarão de se comportar uniformemente. No caso da Figura 2.6 (a) o centro da placa passa a receber uma menor intensidade de tensões, em contrapartida o nível de tensões nas laterais aumenta. O colapso irá ocorrer, quando for atingida a tensão de escoamento nos elementos mais próximos aos apoios, ou quando a secção equivalente, estabelecida pelo método da largura efetiva, flambe globalmente.

Na distribuição não linear das tensões numa placa comprimida submetida a cargas maiores que a carga crítica de flambagem está baseado o Método da Largura Efetiva proposto por Von Karman em 1932. A largura efetiva é a largura  $b$  da Figura 2.6 (b) que atende a equação (2.1), onde  $w$  é largura total  $f$  a força aplicada. Multiplicando a largura efetiva pela espessura se obtém a área efetiva da seção, o Método da Largura Efetiva propõe o uso da área efetiva como base para aplicações de critérios de falha no elemento, não mais a área total. Maiores detalhes sobre o Método da Largura Efetiva são encontrados em Yu, 2000.

O Método da Largura Efetiva pode ser utilizado aplicando a teoria descrita acima, com base, por exemplo, em resultados de simulações em elementos finitos. Outra forma de aplicar o método é através de tabelas e correlações previstas em norma, sendo descrita no subcapítulo a seguir.

$$\int_0^w f dx = bf_{\max} \quad (2.1)$$

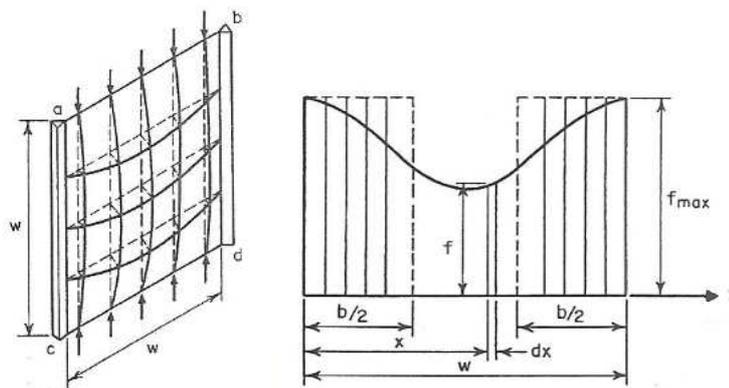


Figura 2.6 – (a) Exemplo de placa submetida a flexão; (b) Distribuição de esforços na placa comprimida. Fonte (Yu et al,2000)

### 2.3.1 Método da Largura Efetiva – NBR 14762

A norma NBR 14762 estabelece requisitos baseados no método dos estados-limites para o dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos de aço carbono baixa liga, tal norma tem aplicação principal na engenharia civil, sendo seu escopo principal estruturas de edifícios. Porém, a própria norma sugere o uso dela em outros tipos de estrutura, respeitando as particularidades de cada aplicação.

O método dos estados-limites sugere que em uma estrutura, mesmo quando submetida à combinação mais severa de carregamento, nenhum dos elementos estruturais exceda o estado limite máximo individual de cada elemento. No caso de estruturas de chapa dobrada, devido a relação usual entre a largura de seus elementos e a espessura da chapa (esbeltez), o modo de flambagem dominante é a flambagem local de seus elementos, o qual interage com a flambagem global das vigas e com sua plastificação. A influencia da flambagem local é levada em conta calculando a redução da área transversal da seção da estrutura utilizando o método da largura efetiva.

A norma recomenda que, para o cálculo da largura efetiva da seção como um todo, a seção seja dividida em elementos individuais para os quais é, então, calculada a largura efetiva, com as expressões apresentadas pela própria norma.

Na forma de abordagem do problema, o elemento deve ser subdividido em elementos independentes, sendo seu comportamento balizado pela forma de vinculação lateral na própria

estrutura, entre elementos de borda vinculada “AA” e elementos de borda livre “AL”, a divisão ocorre conforme Figura 2.7.

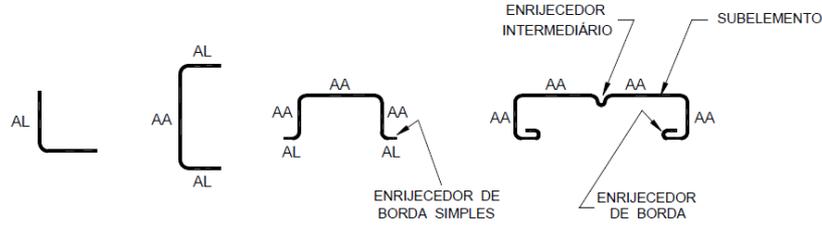


Figura 2.7 – Classificação dos elementos quanto AA ou AL (Fonte: NBR 14762)

Depois de definida a forma de vinculação lateral do elemento, considerando elementos AA (são os aplicados neste trabalho), basta então calcular a largura efetiva do elemento pelas equações 2.2 e 2.3 com o auxílio da tabela apresentada na Figura 2.8. Onde  $b$  é a largura nominal do elemento,  $t$  é a espessura,  $E$  o módulo de elasticidade do material e  $\sigma$  a tensão de escoamento a compressão.

$$b_{ef} = \frac{b \left( \frac{1 - 0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \quad (2.2)$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{0,95 \left( \frac{kE}{\sigma} \right)^{0,5}} \quad (2.3)$$

Os valores de  $k$  são obtidos na tabela da Figura 2.8 considerando a distribuição de tensões em cada elemento isolado. Para elementos sob tração e compressão a Figura 2.8 também apresenta as fórmulas correspondentes.

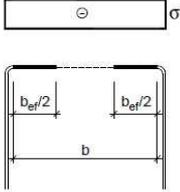
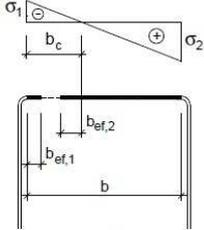
Caso a		$k = 4,0$
Caso d	 <p data-bbox="582 768 898 813">Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$ <p data-bbox="1002 723 1230 745">sendo <math>b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c</math></p> $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Nota: o sinal (-) indica compressão		

Figura 2.8 – Definição do parâmetro  $k$  (Fonte: NBR 14762).

Em elementos sujeitos a flexão, é necessário um cuidado especial para as considerações referentes ao perfil de tensões estabelecidas nos elementos que estão sujeitos a efeitos mistos de tração e compressão, almas dos perfis. Após definida uma largura efetiva e conseqüentemente uma área efetiva para a mesa, a posição do eixo neutro do elemento como um todo deve ser revisto, assim as distribuições de tensões na alma do elemento deve ser avaliada para a posição do eixo neutro após a consideração da área efetiva da alma.

Depois de calculada a área efetiva de todos os elementos isolados, basta uni-los para obter as propriedades geométricas efetivas da seção como um todo. Maiores detalhes sob o método da largura efetiva proposto pela NBR 14762 são encontrados na própria norma e alguns exemplos de aplicação são apresentados neste trabalho e também em Yu, 2000.

## 2.4 Método da Resistência Direta

O Método da Resistência Direta proposto por Hancock, et al, 2001 e Schafer, 2002, é atualmente aplicado no dimensionamento de perfis de chapas dobradas a frio, estendendo no presente trabalho seu uso na determinação do momento fletor último da seção mestra de uma

embarcação. Este método consiste basicamente em calcular a carga de colapso da estrutura tendo como dados de entrada a carga crítica de flambagem elástica e curvas de ajuste semiempíricas alimentadas com ensaios experimentais.

O método possibilita a consideração da interação entre os elementos locais de seções transversais complexas, considerando também a diferença de comportamento estrutural para as diferentes classes de flambagem: global, local e distorcional. Na flambagem global, a estrutura se deforma sem que ocorra alteração significativa do perfil transversal da seção; a carga crítica é diretamente ligada a propriedades físicas da seção transversal e ao comprimento livre da estrutura. Já na flambagem local e distorcional ocorre a instabilização de apenas um elemento da estrutura, sendo a deformação marcada pela alteração na seção transversal. Nestes casos a carga crítica é dependente não só de propriedades globais como comprimento, mas também de características geométricas que isolem os elementos locais. O que difere a flambagem distorcional da local é a característica de rotação “rígida” de um dos elementos da seção. A Figura 2.9 apresenta as classes de flambagem aplicadas a um perfil C.

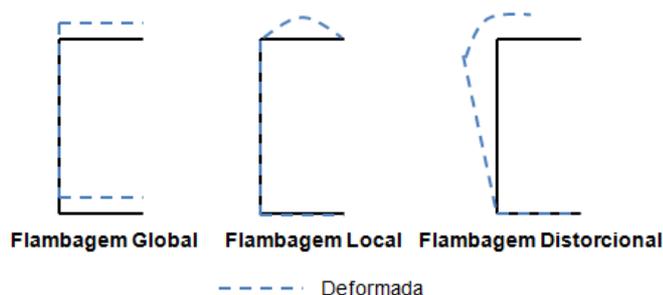


Figura 2.9 – Classes de flambagem, perfil C.

Na Figura 2.10 são apresentadas as curvas de ajuste obtidas a partir de ensaios experimentais. Maiores detalhes sobre este tópico podem ser encontrados na bibliografia supracitada ou, em português, em Grigoletti, 2005.

Inúmeros esforços de centros de pesquisa realizam trabalho de ajuste das curvas que relacionam as cargas críticas de flambagem com as cargas de colapso, calculadas para as formas de perfis e esbeltezas usualmente utilizadas. Através destes estudos correções nos expoentes das expressões do método poderão ser realizados. Obviamente, no caso da seção de uma embarcação, a verificação experimental é complexa, mas seria possível utilizar para o

ajuste das curvas modelos de elementos finitos que considerem a não linearidade física e geométrica da seção estudada.

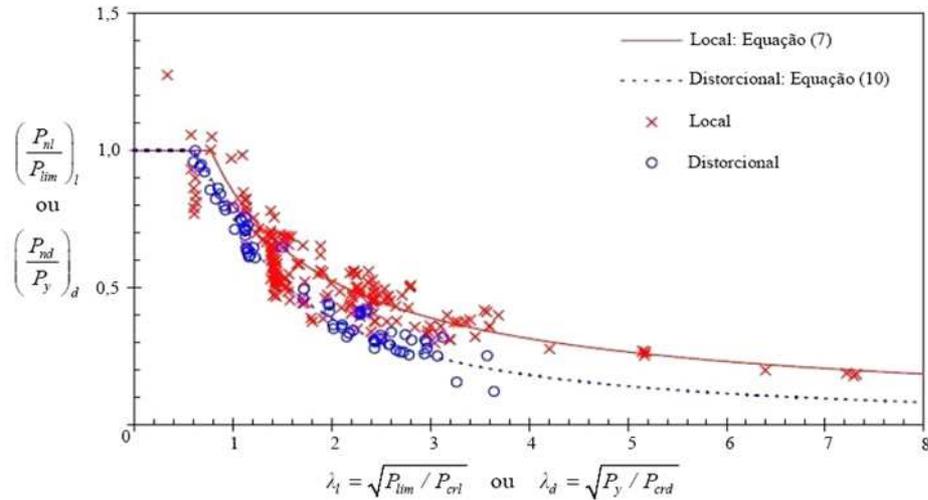


Figura 2.10 – Curvas de ajuste semi-empíricas, MRD.

Na aplicação do método, um dos dados de entrada é a carga crítica de flambagem elástica. Para os casos simples ela pode ser obtida analiticamente, nos demais, a carga de flambagem crítica pode ser obtida por uma análise de flambagem em elementos finitos, ou pela metodologia sugerida por Shaffer, 1997. Em Shaffer 1997 e Hancock et al (2001), podem ser encontradas as expressões, apresentadas na Figura 2.10 para a flambagem local e distorcional. Também no Shaffer (1997), é utilizada uma versão do método das faixas finitas, proposto originalmente por Cheung e Tham, 1988, para determinar a carga crítica de flambagem do perfil estudado para diferentes comprimentos do mesmo, em forma expedita e apresentando os resultados como se ilustra na Figura 2.11. Este programa é de domínio publico, chamado CUFMS, <<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>>. Neste endereço se encontram, além do programa, os manuais e tutoriais do mesmo [Schaffer 2011].

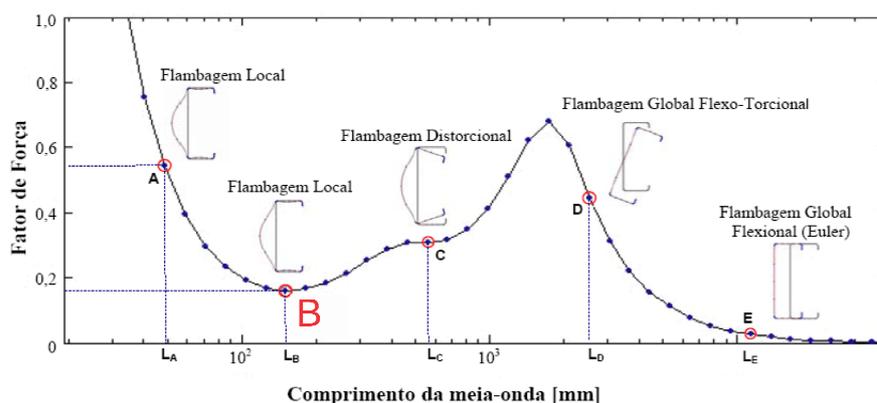


Figura 2.11 - Curva típica obtida utilizando o programa CUFSM (Schaffer 2006).

A tensão de flambagem de um perfil de comprimento  $L_c$  pode ser obtido no gráfico da Figura 2.11 considerando o menor valor do fator de força que escalará a carga aplicada desde o comprimento 0 até o valor  $L_c$ . No caso da Figura 2.11, isto ocorre no ponto B da curva. Os diferentes valores do gráfico apresentado na Figura 2.11 permitem determinar como interagem as diversas formas de flambagem, auxiliando na melhora do desenho deste tipo de estrutura.

Na prática o MRD (Método da Resistência Direta) funciona da seguinte forma (utilizando como base Figura 2.11): a depender do comprimento de flambagem da viga, um dos modos de flambagem se desenvolverá: local, distorcional ou global. Por exemplo, caso o comprimento da viga seja  $L_c$ , o fator de carga crítica de flambagem local será 0,17, já para o fator de carga crítica de flambagem distorcional será 0,56. Depois de determinadas as cargas críticas para os diferentes modos de flambagem é possível calcular, através de equações semiempíricas, as cargas de colapso da estrutura. Das três cargas de colapso calculadas aquela que será considerada como carga de colapso da viga será a mínima entre elas.

## 2.5 Método Direto IACS

O Método Direto é apresentado pela IACS através do Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR) e propõe o cálculo do momento fletor último da seção através de dois métodos chamados de Método 1 e Método 2, que calculam de forma diferente o módulo da seção resistente efetiva da seção. Esta é obtida considerando a existência de uma

área efetiva resistente dos elementos estruturais que compõem o convés da embarcação, região que será considerada comprimida quando a secção mestra é submetida a um momento fletor, considerando as demais partes da secção totalmente efetivas.

De posse da área efetiva do convés, é então possível calcular a posição do eixo neutro na secção efetiva, o momento de inércia efetivo e conseqüentemente o momento fletor último da secção pela equação clássica para cálculo do momento, equação 2.4.

Pela abordagem clássica, o cálculo da tensão  $\sigma$  no ponto distante  $d$  do eixo neutro quando aplicado um momento  $M$  a um corpo com um momento de inércia  $I$ .

$$\sigma = \frac{Md}{I} \quad (2.4)$$

Escrevendo a equação em função do momento e aplicando as propriedades efetivas a equação fica:

$$\sigma = \frac{Md_{red}}{I_{red}} \quad (2.5)$$

definindo o módulo resistente reduzido como:

$$Z_{red} = \frac{I_{red}}{z_{dk-mean} - z_{NA-red}} \quad (2.6)$$

Onde  $z_{dk-mean}$  e  $z_{NA-red}$  são respectivamente, a distância, a altura total do convés da embarcação e a altura do eixo neutro da secção efetiva. Definindo a tensão de escoamento  $\sigma_{esc}$  como critério de falha o momento fletor último pode ser escrito pela equação:

$$M_u = Z_{red} \sigma_{esc} \quad (2.7)$$

Note que a tensão de escoamento foi utilizada como critério de falha para se obter o momento fletor último. Esta consideração deve ser utilizada também para o cálculo do momento de inércia efetivo  $I_{red}$ , caso este venha a ser calculado de alguma forma alternativa como, por exemplo, com o uso do método da largura efetiva.

Segundo a norma CSR, o momento de inércia efetivo da seção deve ser calculado considerando a área efetiva do convés, que é obtida pela relação entre a carga de colapso não linear com a carga de colapso linear (carga de escoamento da seção numa análise linear).

$$A_{eff} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{esc}} A_{total} \quad (2.8)$$

Onde  $\sigma_u$  é a carga de colapso. O CSR recomenda dois métodos para o cálculo desta carga de colapso são os Métodos 1 e 2.

A diferença entre o Método 1 e 2 está na forma de calcular a seção efetiva do convés. O Método 1 considera a redistribuição dos esforços na estrutura após o início da flambagem, sendo a carga de colapso aquela com a qual algum ponto da estrutura atinge a tensão de escoamento do material. Já o Método 2 não considera a redistribuição dos esforços e tão pouco a resistência pós flambagem da estrutura, sendo neste caso a carga de colapso aquela que produz a flambagem do convés.

Depois de definida a área efetiva do convés ou do fundo da seção é então possível obter o momento de inércia efetivo da seção e a posição do eixo neutro da seção efetiva. O momento fletor último passa a ser o menor dentre o momento fletor de aquebramento e ou tosamento, levando em conta a posição do eixo neutro na seção efetiva.

O Método Direto, seja considerando o Método 1 ou 2, considera que a capacidade máxima de resistência ao momento fletor de uma embarcação, é dada pelo limite de carga máxima dos painéis enrijecidos do convés. Caso essa hipótese não seja válida, o Método Direto não apresentará bons resultados.

## 2.6 Método Iterativo IACS

O Método Iterativo é outro método apresentado pela IACS no CSR. Trata-se de uma sofisticação do Método Direto, com cálculo da resposta da estrutura a cada incremento de rotação de uma seção rígida; dessa forma, o momento fletor último passa a ser o máximo valor encontrado na curva rotação por momento. Neste método a estrutura é dividida em vários elementos e as resistências desses elementos são obtidas utilizando curvas de resposta preestabelecidas em norma, de acordo com as características geométricas e com a solicitação imposta a cada elemento. No caso de elementos sob compressão, as não linearidades esperadas para esse tipo de elemento são consideradas pelo uso destas curva, ao passo que para os elementos sob tração é considerada a resposta linear dos mesmos.

Na aplicação deste método, uma simplificação importante é considerada, pois os incrementos de rotação são aplicados considerando a seção rígida completamente plana, mesmo após o início da flambagem dos elementos. Esta consideração não é real, sendo uma simplificação intrínseca à aplicação do método, e introduz um erro aos resultados obtidos.

Um exemplo esquemático da aplicação deste método pode ser visto na Figura 2.12, onde um momento fletor é aplicado até o colapso total do componente. Para aplicar o método iterativo para o cálculo do momento fletor último desta seção é necessário que a seção seja dividida em elementos estruturais, no caso do perfil caixão temos elementos de chapa comprimidos e tracionados e também elementos de quina.

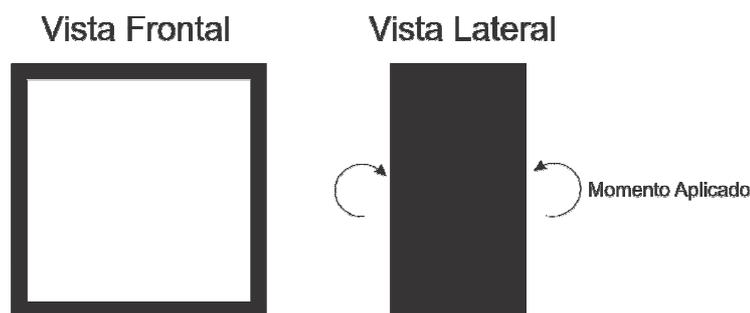


Figura 2.12 – Aplicação de momento fletor seção caixão

A Figura 2.13 mostra uma analogia, considerando os elementos estruturais como molas, onde cada mola assumiria um comportamento específico dependendo da solicitação e da

geometria. Outra característica importante do Método Iterativo é o fato de que as iterações são realizadas aplicando incrementos de rotação da seção, considerando-a totalmente rígida, e a partir destes incrementos e da posição relativa de cada elemento em relação ao eixo neutro é calculada a deformação em cada elemento estrutural. Com base nestas deformações, é calculada a força com que cada elemento contribuirá, e então, é realizado o somatório de forças para definir o momento correspondente àquela rotação.

É possível observar na Figura 2.13 que os elementos comprimidos em geral apresentam um comportamento linear quando submetidos a pequenas deformações, porém, a partir de um ponto esse comportamento deixa de ser linear. Assim, é possível que para um determinado ângulo de inclinação o somatório de forças sobre o eixo neutro seja inferior ao somatório sob o eixo neutro. Nesse caso é necessária a alteração da posição do eixo neutro a fim de garantir o equilíbrio de forças. Essa alteração da posição do eixo neutro quando são aplicadas grandes rotações é verificada também em ensaios não lineares em modelos de elementos finitos e demonstra a resposta da estrutura na tentativa de manter o equilíbrio após a perda de capacidade de absorver força dos elementos comprimidos.

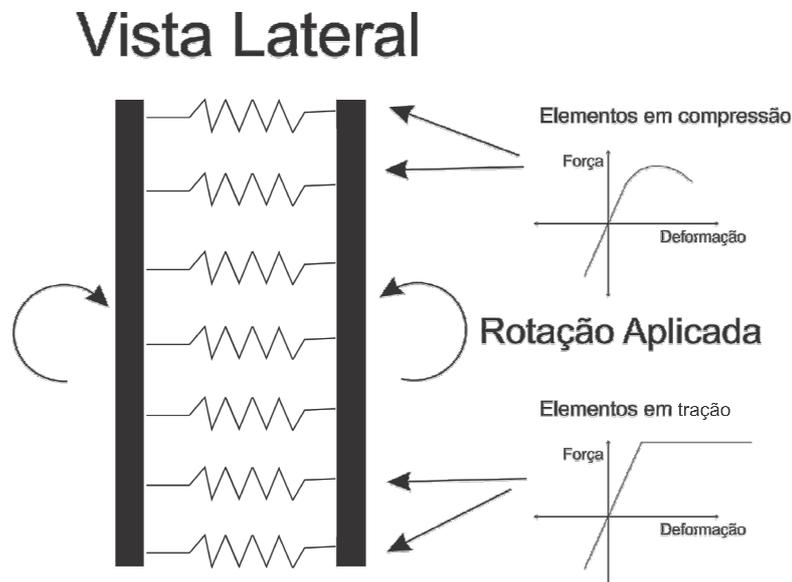


Figura 2.13 – Analogia esquemática método direto IACS

É apresentada no CSR uma forma de classificação dos elementos, em chapa, viga reforçada ou quina. A Figura 2.14 retirada do CSR mostra um exemplo de classificação dos

elementos. São também apontados pela norma uma série de equações para cada um dos tipos de elementos para se obter as curvas estruturais com base na geometria e nas propriedades do material empregado.

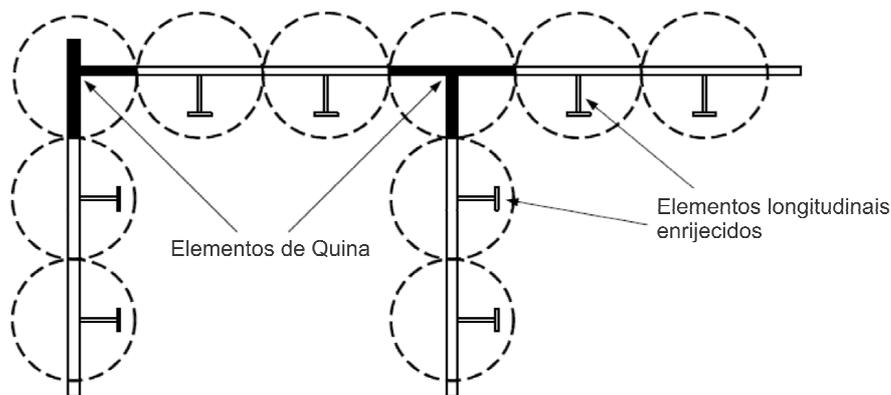


Figura 2.14 – Classificação dos elementos. FONTE: CSR IACS

A aplicação do Método Iterativo pode ser dividida nos passos mostrados a seguir:

Passo 1: Dividir os elementos nas classes estruturais previstas pela norma: longitudinal enrijecido com placa acoplada, elementos de placa enrijecidos ou elementos de quina.

Passo 2: Determinar as curvas tensão deformação para cada um dos elementos com base nas equações previstas no capítulo 2.2.2 do apêndice A do CSR. Os dados de entrada necessários são o módulo de elasticidade do material e a tensão de escoamento, além dos dados geométricos do elemento.

Passo 3: Determinar a posição inicial do eixo neutro, levando em conta as propriedades elásticas lineares da seção. Determinar o valor do incremento de rotação, sendo recomendado no mínimo 300 passos, considerando a rotação máxima como três vezes a rotação capaz de escoar a estrutura em uma análise elástica.

Passo 4: Para cada passo de rotação, determinar qual é o deslocamento de cada elemento, considerando sempre a posição do eixo neutro. Isso é feito da seguinte forma:

$$\varepsilon_i = z_i \cdot k \quad (2.9)$$

Onde  $\varepsilon_i$  é a deformação no elemento  $i$ ,  $z_i$  é a distancia do eixo neutro do elemento e  $k$  o ângulo de inclinação da seção rígida.

Com base na deformação é possível entrar nas curvas obtidas no passo 2 e determinar a tensão de cada elemento, então é possível multiplicar a tensão encontrada pela área do elemento e obter a força que cada elemento está aplicando.

Passo 5: Com base na força calculada para cada elemento, é possível realizar um equilíbrio de forças, procurando a igualdade sob e sobre o eixo neutro. Se a igualdade não acontecer, é necessário alterar a posição do eixo neutro na direção de maior força e reiniciar do passo 3 até que a igualdade seja satisfeita. A norma recomenda 0,1 milímetros como erro aceitável para a posição do eixo neutro.

Passo 6: Calcular o momento correspondente à rotação aplicada. Para tal basta fazer o somatório de forças de cada elemento, multiplicando pela distância em relação ao eixo neutro como mostrado na equação 2.10.

$$M = \sum_{i=1}^n F_i d_i \quad (2.10)$$

Passo 7: Incrementar a curvatura e repetir a partir do passo 2 até que se atinja o momento fletor último. É interessante usar a posição do passo anterior como configuração inicial para a posição do eixo neutro.

## 2.7 Análise Não Linear Utilizando o Método dos Elementos Finitos

Teoricamente seria possível, atendendo os fundamentos da mecânica dos sólidos, solucionar qualquer problema mecânico utilizando soluções analíticas tendo como base as

equações de equilíbrio, equações constitutivas (propriedades do material), equações cinemáticas, equações de compatibilidade e a determinação das condições de contorno.

Do ponto de vista prático, muito dos problemas não possuem solução, ou seria muito complexo determiná-la analiticamente. O Método dos Elementos Finitos (MEF), assim como outros métodos numéricos, visam solucionar este problema discretizando o corpo em estudo em pequenas regiões chamadas elementos, os quais são formados por nós em seu contorno, cujos deslocamentos passam a ser a incógnita do problema. O método propõe o uso de funções de interpolação de ordem pré-definida, a depender do tipo de elemento, para relacionar os deslocamentos no interior do elemento com o deslocamento dos respectivos nós. Conhecidos os deslocamentos podem ser obtidas as deformações (primeira derivada dos deslocamentos) e com base nas equações constitutivas, definir também as tensões envolvidas. Maiores detalhes a respeito do MEF podem ser encontrados em Zienkiewicz, 1977.

Devido às simplificações necessárias à transformação de um problema físico real em um modelo matemático, são introduzidos erros à resposta, e dependendo da natureza do problema e também do tipo de elemento utilizado na solução, pode não ser possível, utilizando o Método dos Elementos Finitos, encontrar uma boa aproximação da solução analítica do problema. E ainda que seja possível, a qualidade da resposta depende, além do tipo de elemento, do refino da discretização realizada. Em consequência da melhora de qualidade da resposta conseguida com um maior número de elementos ou pelo aumento na complexidade das equações de interpolação, aumenta-se também o custo computacional da solução. Cabe ao usuário do método entender as limitações de aplicação, bem como definir para cada problema em particular uma boa relação entre o custo computacional e a qualidade da resposta.

Em estudos onde se pretende aplicar carga até o ponto de resistência última das estruturas, como no caso do estudo do momento fletor último, será necessário realizar uma análise considerando grandes deslocamentos e não linearidade do material.

Na consideração da não linearidade física, será considerada como superfície de escoamento aquela definida pela teoria de resistência de Von Mises, sem levar em conta o encruamento do material.

Para que seja possível analisar problemas de instabilidade, as simplificações geralmente realizadas no tensor de deformações infinitesimal, utilizado em análises lineares, não são satisfatórias. É possível, resolvendo um problema de autovalores, simular o comportamento de estruturas suscetíveis à flambagem, determinando as cargas críticas de flambagem elástica

e também os modos de flambagem associados. Este modelo de análise é limitado ao caso em que a estrutura se instabiliza a partir da estrutura indeformada. Esta premissa nem sempre pode ser aplicada. Nos casos onde ocorrem grandes deformações, os termos de alta ordem não podem ser simplificados. Sendo assim, a hipótese da não linearidade geométrica considera o tensor de Green completo e permite atribuir à estrutura grandes deformações. Este modelo permite capturar problemas de instabilidade sem a restrição de que a mesma aconteça a partir de uma configuração muito afastada da indeformada. Caso seja necessário capturar também a possibilidade da estrutura plastificar, deve-se considerar também as equações constitutivas não lineares.

Existe no mercado uma série de softwares que possibilitam a análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos, a exemplo, Ansys 2007. A estratégia de solução dos problemas não lineares passa pela discretização também da aplicação da carga à estrutura. É como se uma análise não linear fosse composta por uma série de análises lineares, considerando não linearidades físicas e geométricas, que seriam como passos de aplicação de carga e a cada passo são aplicadas regras de convergência que avaliam a resposta obtida por análise de equilíbrio do elemento.

De forma simplificada, a análise não linear divide o problema em vários problemas (passos) lineares. No início de cada passo é necessário determinar a configuração deformada aproximada que iria se desenvolver dentro do passo, para eliminar as soluções que não seriam possíveis fisicamente. A seguir, é aplicada à solução uma análise de equilíbrio baseada no Princípio dos Trabalhos Virtuais PVT, Cook et al, 1974, onde todos os elementos são analisados. Para se estimar no início de cada passo a deformada a ser estudada, é necessária a linearização das equações não lineares do problema. Existe uma série de métodos que possibilitam a solução das equações não lineares de forma incremental, sendo o mais popular o método de Newton-Raphson. Maiores detalhes sobre o mesmo podem ser obtidos em Bathe, 1996. Existem ainda outros métodos, como o do comprimento do arco, que pode ser útil em análises onde se pretende identificar o comportamento pós pico de uma estrutura. Ver mais detalhes sobre este último método em [CRISFIELD, M.A., 1981 e 1983].

Por fim, principalmente na determinação da carga crítica, quando é utilizado análise não linear geométrica, pode ser necessária a introdução de perturbações ao sistema para evitar que se desenvolvam situações de equilíbrio instável. A Figura 2.5 apresenta esta problemática.

Considerando uma placa apoiada nas bordas sendo comprimida, Figura 2.15, caso não seja atribuída nenhuma perturbação no sistema, mesmo após o ponto de bifurcação, a estrutura continuará respondendo de forma linear (linha pontilhada Figura 2.5) caracterizando uma situação de equilíbrio instável.

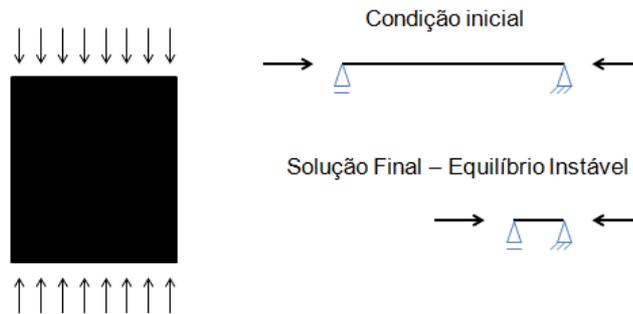


Figura 2.15 – Exemplo de equilíbrio instável.

Para que seja possível o desenvolvimento do primeiro modo de flambagem e por consequência uma situação de equilíbrio estável, é necessário introduzir ao sistema algum tipo de perturbação. Existem vários métodos possíveis, sendo um deles baseado na inserção de uma força infinitesimal atuando na direção normal ao centro da placa. Outra possibilidade seria introduzir aos nós da estrutura um pequeno distúrbio da posição, deixando-os não completamente alinhados. Uma sugestão para este distúrbio de posição pode ser seguir o esquema indicado na Figura 2.16, onde o primeiro modo de flambagem é multiplicado por um fator de redução capaz de tornar tal distúrbio imperceptível do ponto de vista da resposta final. Maiores detalhes podem ser encontrados em Søreide et al, 1976, onde se discute também a questão da influência destas perturbações à resposta final.

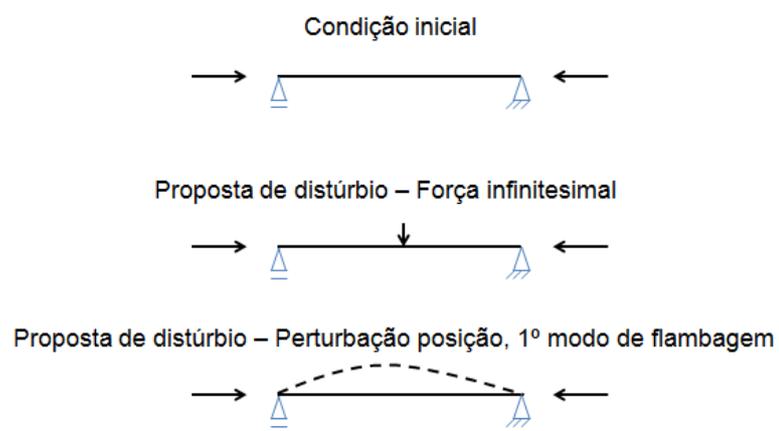


Figura 2.16 – Propostas de distúrbio, equilíbrio estável.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cálculo do Momento Fletor Último

Entende-se por momento fletor último o máximo momento fletor que uma seção é capaz de resistir. Na aplicação naval se trata do máximo momento resistente da seção mestra da embarcação. O estudo do momento fletor último deve considerar todas as não linearidades associadas até o colapso. Na aplicação naval o momento fletor último de uma embarcação é determinado pela carga de colapso. A Figura 3.1 apresenta um desenho esquemático de uma embarcação submetida ao momento fletor último, considerando a aplicação do momento fletor longitudinal de tosamento.

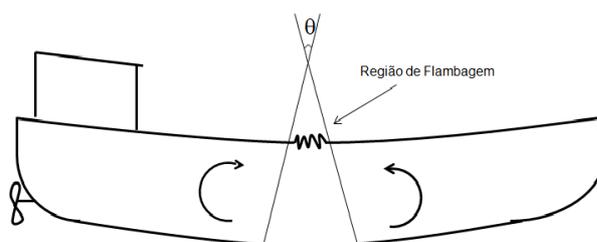


Figura 3.1 – Esquema que apresenta uma embarcação submetida ao esforço de momento fletor até atingir o momento fletor último.

Com base na situação proposta pela Figura 3.1, onde existem duas seções da embarcação representadas por duas retas, estas seções se encontram com um ângulo relativo  $\theta$  entre elas. Imaginando que seja possível aumentar gradativamente este ângulo, partindo de uma situação inicial onde as seções seriam paralelas, durante a aplicação deste ângulo seria possível medir a resposta em termos de momento longitudinal da estrutura. Espera-se, inicialmente, que a estrutura responda de forma linear, aumentando a resposta estrutural, momento, proporcionalmente ao aumento do ângulo relativo entre as seções. A partir de um determinado nível de sollicitação, inicia-se o comportamento não linear local de alguns elementos da seção mestra; deste ponto em diante, a relação entre a rotação relativa imposta às seções e o momento resultante deixa de ser linear. Aumentando ainda mais o ângulo entre as seções se espera que em um dado ponto ocorra um decréscimo da resposta estrutural da estrutura, ponto

da primeira derivada nula; este ponto marca a máxima resposta da estrutura, denominado momento fletor último da embarcação. A Figura 3.2 apresenta uma relação entre o momento e o ângulo típico de uma embarcação.

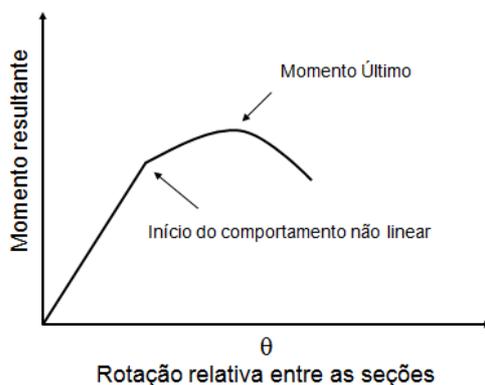


Figura 3.2 – Curva estrutural característica, momento fletor último.

Os primeiros estudos para a consideração da flambagem das placas que constituem a estrutura da embarcação foram desenvolvidos por Caldwell, 1965, e Faulkner, 1975. Este último desenvolveu uma abordagem para o cálculo estrutural baseado em um fator de redução. Na tentativa de desenvolver um método que calculasse o momento fletor último de uma embarcação, Smith, et al., 1986 e Dow, et al, 1981, desenvolveram um procedimento incremental híbrido que considera curvas empíricas e análises em elementos finitos.

Billingsley, 1980, aplica um método que divide a embarcação em elementos estruturais simples. Neste método, a resistência de toda a seção mestra passa a ser o somatório das contribuições individuais de cada elemento.

Rutherford e Caldwell, 1990, apresentam a comparação entre os valores experimentais apresentados por um navio petroleiro com os métodos de abordagem simplificada, porém sem considerar o efeito de pós flambagem. Já Kutt, et al, 1985, desenvolve uma análise não linear completa em elementos finitos da embarcação, que se mostrou demasiadamente custosa computacionalmente.

Gordo, et al, 1996, apresentam um método alternativo, menos custoso em termos de volume de cálculo, no qual se realiza uma análise não linear completa que tem como base o

método proposto por Billingsley, 1980, e possibilita o estudo do efeito de tensões residuais, corrosão e o efeito de momentos em outras direções.

Também é importante mencionar o trabalho de Kuo et al, 2003, no qual são apresentadas uma série de expressões semiempíricas para avaliar o momento fletor último da seção mestra de embarcações e compara os resultados obtidos com aqueles obtidos de forma experimental.

Com o intuito de balizar o cálculo do momento último em embarcações petroleiras de fundo duplo, a entidade Internacional que agrupa as Sociedades Classificadoras através do documento Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2008, apresenta os métodos descritos no capítulo 2, denominados Método Direto, baseado na redução de resistência do convés, e Método Iterativo que considera o efeito isolado de cada elemento.

Também são destacados os trabalhos de Kitarovic et al, 2010, e Andric et al, 2010, e Paik et al, 2007, onde é apresentada uma comparação dos métodos propostos pela norma existente para a determinação do momento fletor último e sua comparação, empregando análises não lineares físicas e geométricas em elementos finitos, além de uma avaliação dos efeitos de esforços, geralmente não considerados nas normas vigentes, como a interação entre os momentos fletor e torsor e o efeito do cisalhamento.

## 4 APLICAÇÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados para o momento fletor último utilizando cada um dos métodos previamente apresentados na fundamentação teórica deste trabalho. Serão estudados três tipos de seções, um perfil caixão (CAIXAO), perfil simplificado em escala reduzida de embarcação com fundo duplo (BARCO\_S), e um perfil típico utilizado na navegação na Bacia do Sudeste (GUARITA).

Na aplicação CAIXÃO, o objetivo é exemplificar o uso de alguns métodos simples que podem ser usados para cálculo de momento fletor último em seções submetidas a momento fletor, apresentando pequenos erros quando comparados com modelagens complexas em ensaios não lineares de modelos de Elementos Finitos. Devido à simplicidade geométrica da seção fica mais fácil o entendimento dos fenômenos de redução da rigidez e redistribuições de esforços na seção submetida a uma carga de compressão acima da carga crítica de flambagem. Outro fenômeno interessante que se observa nesta aplicação é a alteração da posição do eixo neutro que ocorre também devido à perda de rigidez dos elementos comprimidos, a qual é considerada nos diferentes métodos.

Já a aplicação BARCO\_S tem como objetivo, além de apresentar os métodos de cálculo, também realizar uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os valores apresentados por outros autores [Nishihara, 1983] que apresentam inclusive resultados experimentais para o valor do momento fletor último da seção.

Finalmente, os métodos serão empregados no perfil GUARITA. Este caso trata da seção mestra de uma embarcação típica, utilizada na navegação na Bacia do Sudeste. A este mesmo cenário é desenvolvido no capítulo 7 um estudo da sensibilidade do momento fletor último à redução de espessura nas chapas.

Serão consideradas nas três aplicações a não linearidade física (material elastoplástico perfeito e superfície de escoamento definida pela lei de resistência de Von Mises) e geométrica nos modelos estudados.

Vale ressaltar que os detalhes do emprego de cada um dos métodos utilizados são apresentados no capítulo 5, seguinte ao atual, onde se apresentam apenas os resultados e discussões.

## 4.1 Aplicação CAIXÃO

Nesta aplicação, o modelo estudado será um perfil caixão que possui momento de inércia de seção semelhante ao encontrado em embarcações típicas de navegação na Bacia do Sudeste. A semelhança entre o perfil caixão e embarcações é restrita ao valor do momento de inércia, já que a seção do perfil caixão apresenta características completamente diferentes de seções mestras de embarcações, principalmente em relação a não existência de enrijecedores longitudinais e de tanques de lastro. Um desenho esquemático da aplicação em questão é apresentado na Figura 4.1, onde o comprimento  $L$  é 36 metros, a altura do perfil  $A$  é 7 metros e a espessura da parede “ $e$ ” é de 0.014522 metros. As propriedades do material aplicadas são apresentadas na Tabela 4.1. Não é considerado encruamento do material.

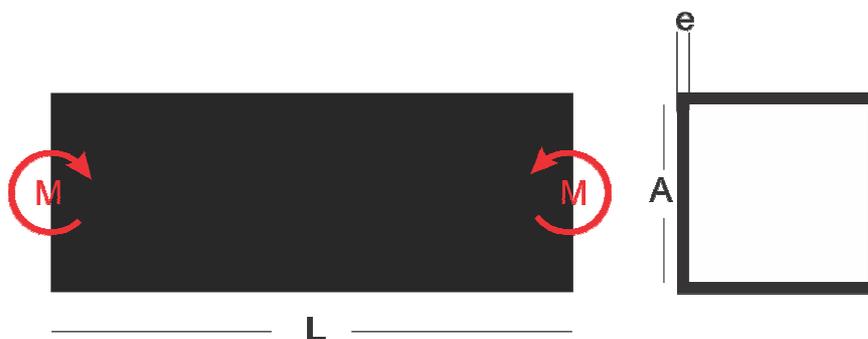


Figura 4.1 – Esquema da aplicação perfil caixão

Tabela 4.1 – Propriedades do material na aplicação perfil caixão

Espessura (mm)	Tensão de escoamento (Pa)	Módulo de Elasticidade (Pa)	Coefficiente de Poisson
14,522	$250 \times 10^6$	$2,07 \times 10^{11}$	0,33

A este perfil serão aplicados vários métodos para obtenção do momento fletor último; são eles: Modelo em elementos finitos, considerando não linearidade física e geométrica (M\_FEM); Método da Resistência Direta (M\_RD); Método da Largura Efetiva, calculando as larguras efetivas e empregando modelos de elementos finitos, considerando não linearidade física e geométrica (M\_LEF1); Método da Largura Efetiva, empregando expressões analíticas propostas pela NBR 14762 (M\_LEF2) e o Método Direto proposto no *Common Structural*

*Rules*, IACS, 2008, em suas duas versões: a primeira, que considera a carga crítica do convés como a carga do primeiro modo de flambagem (M\_CSR1), e a segunda, que considera como carga crítica a carga de início de escoamento (M\_CSR2). A Figura 4.2 compara os resultados obtidos para cada um dos métodos. A descrição detalhada da aplicação dos métodos mencionados na análise da aplicação CAIXÃO é apresentada em detalhes na secção 5.1.

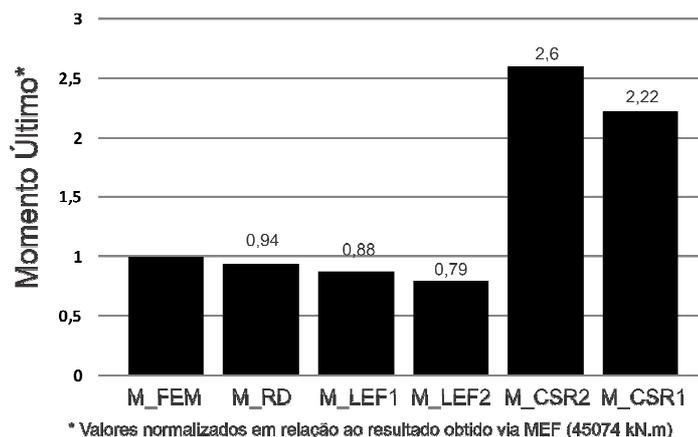


Figura 4.2 – Resultado dos vários métodos aplicados para cálculo do momento fletor último da seção

É possível observar na Figura 4.2 que:

(1) Os métodos M\_RD, M\_LEF1 e M\_LEF2 apresentam erros relativamente pequenos em relação ao resultado obtido com o método M\_FEM, o qual é considerado como padrão para medir o desempenho dos outros métodos. É importante observar que estas três alternativas são muito mais simples e rápidas de aplicar que o modelo M\_FEM.

(2) A divergência entre a Solução M\_FEM e os resultados obtidos com as metodologias apresentadas pelas versões do método direto da IACS, aqui chamadas M\_CSR1 e M\_CSR2, está fortemente relacionada com o tipo de seção estudada, já que tal método é elaborado para estruturas navais que diferem, e muito, da seção caixão estudada.

Seria possível ainda, dentre os métodos apresentados neste trabalho, o uso do método iterativo apresentado pela IACS no CSR, porém como a seção possui características diferentes das estruturas para qual o método iterativo foi elaborado, estruturas navais, a aplicação fica limitada. A principal dificuldade nesse caso seria a divisão da seção em elementos estruturais

independentes, levando em conta a posição dos enrijecedores (que, neste caso, não existem). Assim, não será aplicado o método iterativo da IACS para a aplicação do perfil caixão.

#### 4.2 Aplicação Perfil Reduzido Embarcação de Fundo Duplo (BARCO\_S)

Nishihara, 1983, realiza experimentos em algumas seções mestras de embarcações confeccionadas em escala reduzida para conhecer o comportamento das mesmas quando submetidas a cargas de colapso, dentre as quais se encontra um perfil de fundo duplo com enrijecedores longitudinais distribuídos equidistantemente, a qual é analisada nesta aplicação. A partir dos dados experimentais publicados, tais seções passaram a ser utilizadas como referência para comparar resultados e testar diferentes metodologias de análise.

Por exemplo, em Kuo, et al., 2003, são apresentados diferentes métodos para cálculo do momento fletor último desta seção, comparando os resultados com os experimentais publicados por Nishihara, 1983.

A Figura 4.3 apresenta a seção a ser estudada. Nela é aplicada uma condição de carregamento semelhante à aplicada na aplicação CAIXÃO, momentos em ambas as seções externas do modelo da Figura 4.3. Na Tabela 4.2 são apresentadas as propriedades do material utilizado, considerando o material sem encruamento.

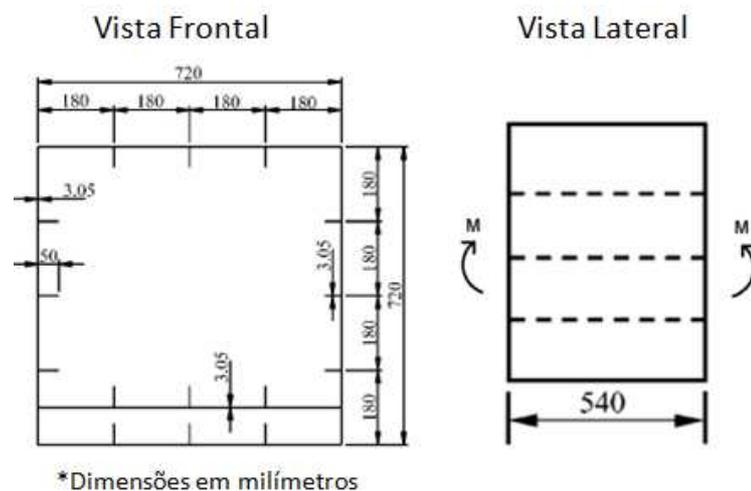


Figura 4.3 – Perfil reduzido embarcação de fundo duplo.

(Fonte: adaptado de Kuo et al , 2003)

Tabela 4.2 – Propriedades do material na aplicação BARCO\_S

Espessura (mm)	Tensão de escoamento (Pa)	Módulo de Elasticidade (Pa)	Coefficiente de Poisson
3,05	$287 \times 10^6$	$2,08 \times 10^{11}$	0,277

Para o cálculo do momento fletor último da seção serão apresentados os seguintes métodos: Método de Elementos Finitos não linear, M\_FEM; Método da Resistência Direta, M\_RD; duas versões do método direto proposto pela IACS-CSR, chamados aqui de M\_CSR1 e M\_CSR2, já descritos para a aplicação CAIXÃO; e, finalmente, o Método Iterativo proposto pela IACS-CSR, aqui chamado de M\_ITER.

Os resultados obtidos com cada um dos métodos são apresentados na Tabela 4.3, onde são comparados com o valor experimental obtido por Nishihara, 1983, sendo os detalhes da aplicação de cada método apresentados na seção 5.2.

Tabela 4.3 – Valores encontrados para o momento fletor último por cada um dos métodos aplicados.

Método	Experimental – Nishihara (1983)	M_FEM	M_RD	M_CSR1	M_CSR2	M_ITER
Momento Fletor Último	593,5	713,9	570	626	611	682
Valor/Experimental	1	1,20	0,96	1,06	1,03	1,15

É possível observar na tabela 4.3 que os resultados teóricos obtidos não se afastam em mais de um 20 % dos resultados experimentais. Outra observação importante é em relação ao custo computacional e de modelagem, já que os métodos que apresentaram melhores resultados, comparando com o resultado experimental, são justamente os que demandam menor esforço computacional.

Nota-se que o resultado pelo M\_FEM é o que mais se distancia do valor experimental, isso, provavelmente, se deve às propriedades do material impostas no modelo (elastoplástico perfeito), o que na prática não existe. Provavelmente, a qualidade da resposta dos métodos mais simples M\_RD, M\_CSR1 e M\_CSR2, e M\_ITER, está relacionada a não consideração, por parte destes métodos, das propriedades do material após a plastificação ( não está sendo considerado o encruamento do material). De qualquer maneira, nota-se também, pelos resultados expostos na Tabela 4.3, a coerência entre os valores obtidos por todos os métodos teóricos empregados.

Dentre os métodos estudados neste trabalho não serão aplicados neste caso os Métodos M\_LEF1 e M\_LEF2, utilizados na aplicação CAIXÃO, pois ambos os métodos, como foram apresentados, são estruturados para cálculo em perfis simples, geralmente existentes em estruturas civis, e a aplicação numa estrutura com vários enrijecedores, como é o caso, fica inviável.

### **4.3 Aplicação Perfil Típico da Bacia do Sudeste (GUARITA)**

Nesta aplicação, o objeto de estudo é uma embarcação típica encontrada na Bacia do Sudeste, o Navio Tanque Guarita, pois no que diz respeito ao projeto estrutural, a embarcação em questão segue um padrão encontrado nas seções das demais embarcações projetadas especificamente para navegação interior na Bacia do Sudeste. A semelhança entre os projetos torna plausível também a extensão dos resultados aqui demonstrados para as demais embarcações. A Figura 4.4 (a) mostra uma foto real do Navio Tanque Guarita e a Figura 4.4 (b) a seção mestra da embarcação. As características do material assumidas no modelo são apresentadas na Tabela 4.1.

Com o intuito de reduzir o custo computacional das análises, foi considerada simetria transversal para construção do modelo, mesmo que tal procedimento não seja recomendado no *Common Structural Rules*, (IACS, 2008). No entanto, em virtude da existência de uma antepara central muito rígida que divide os tanques da embarcação em dois, acredita-se que os resultados obtidos considerando a simetria são relativamente satisfatórios. Sendo assim, os modelos e os resultados aqui apresentados consideram a simetria transversal. Na Figura 4.4 é considerada a simetria, sendo apresentado somente um dos lados da embarcação.



Figura 4.4 – (a) Foto real da embarcação NT Guarita (Fonte: Navegação Guarita S.A.)  
 (b) Seção mestra da embarcação (Vista em corte).

Tipicamente, os navios tanques são projetados de forma modular, sendo o corpo paralelo formado basicamente pela repetição sequencial de seções modulares. No caso do NT Guarita, estas seções são do tipo caverna simples, caverna gigante e antepara. O corpo paralelo é então formado seguindo a sequência: a cada quatro seções caverna simples há uma seção caverna gigante e a cada quatro cavernas gigantes há uma antepara. É importante ressaltar que as seções caverna simples e gigante não são estanques nem para os tanques de lastro nem para os tanques de carga. Já as seções antepara são estanques, limitando os tanques de carga e lastro. A Figura 4.5 apresenta um desenho simplificado do esquema de montagem.

Um pequeno glossário tratando da nomenclatura naval utilizada acima é apresentado no Apêndice B.

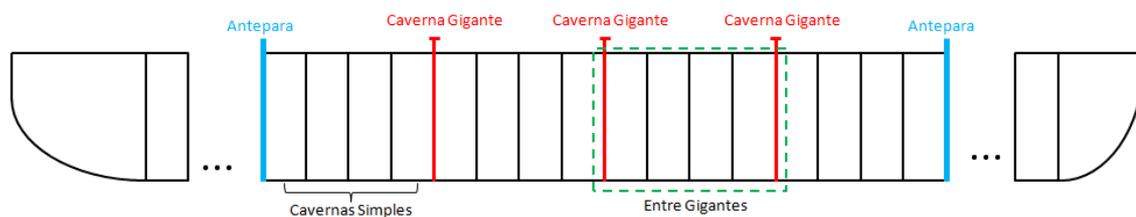


Figura 4.5 – Esquema simplificado da estrutura do NT Guarita

Por se tratar de uma embarcação de fundo duplo, é esperado um comportamento em relação ao momento fletor último similar ao apresentado para aplicação BARCO\_S que é detalhado neste trabalho, onde o momento fletor último de tosamento é mais crítico do ponto de vista estrutural, vide resultados apresentados na Figura 5.8. Assim, neste capítulo é

considerado apenas o momento fletor de tosamento. Uma discussão a respeito é levantada no capítulo 5.2.

Quanto ao comprimento do modelo, acredita-se que a resposta estrutural à solicitação de momento longitudinal da embarcação completa, seja muito similar a resposta de um modelo menor que considere somente o comprimento “entre gigantes” apresentado na Figura 4.5. Tal simplificação está baseada na hipótese de que os enrijecedores transversais, existentes nas cavernas gigantes, limitam o comprimento de flambagem da estrutura. Esta teoria é baseada nos resultados apresentados na Figura 4.6 e que são detalhados a seguir.

A Figura 4.6 apresenta o resultado estrutural de uma análise não linear até a carga última para os dois modelos do convés da embarcação submetidos à compressão. Um dos modelos simula um convés com um comprimento entre gigantes, já o segundo modelo corresponde a um comprimento de dois entre gigantes (o comprimento “entre gigantes” é demarcado por um retângulo pontilhado na cor verde na Figura 4.5; dois entre gigantes seria o dobro do comprimento) e a presença do enrijecedor transversal.

Em uma situação de momento fletor de tosamento, o convés é a região mais exposta à compressão e conseqüentemente à flambagem. Justamente em função disto é a região onde se esperaria uma eventual alteração na resposta estrutural quando fosse alterado o comprimento das seções, pois se sabe que em situações onde ocorre flambagem o comprimento do modelo na direção da aplicação de carga é diretamente proporcional à resposta final, tanto para os modos de flambagem como para carga última. É possível notar pelos resultados apresentados na Figura 4.6 que a carga de colapso é muito próxima para ambos os modelos, desta forma, acredita-se que é possível obter uma boa aproximação para o momento fletor último da embarcação como um todo, considerando apenas uma seção entre gigantes.

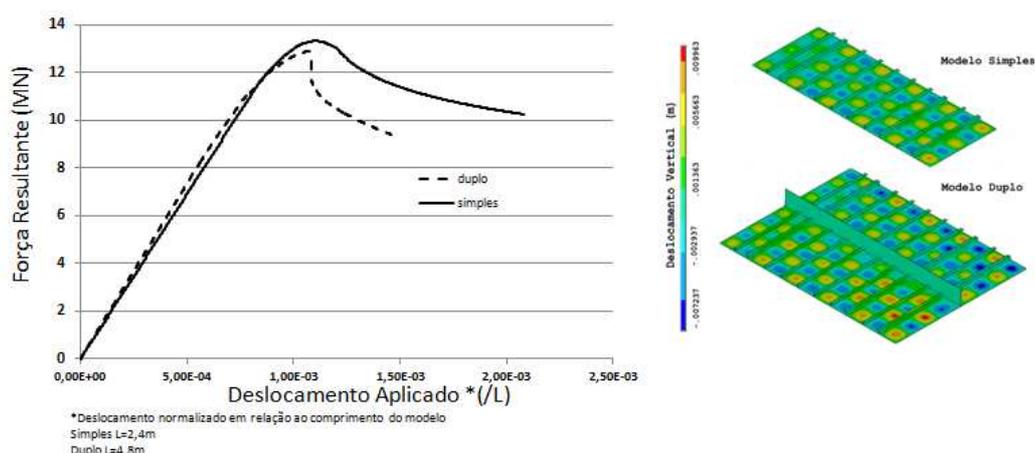


Figura 4.6 – Comparação dos modelos convés simples e duplo.

Considerando as simplificações expostas acima, a Tabela 4.4 apresenta os resultados do momento fletor último para a metade da seção, considerando os seguintes métodos: Método dos Elementos Finitos (M\_MEF), Método da Resistência Direta (M\_RD), os dois métodos propostos no CSR, IACS, 2008, M\_CSR1 e M\_CSR2, e também o Método Iterativo M\_ITER. A Tabela 4.4 também compara os resultados obtidos em cada método com o valor encontrado pela pelo M\_FEM.

Tabela 4.4 – Valores de Momento Fletor Último para embarcação NT Guarita.

Método	M_FEM	M_RD	M_CSR1	M_CSR2	M_ITER
Momento Fletor Último (MN.m)	114	91,1	92,7	85,2	121,5
Valor/M_MEF	1	0,85	0,87	0,80	1,087

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4.4 nota-se que todos os métodos empregados obtiveram resultados satisfatórios quando comparados aos resultados da análise não linear em elementos finitos. Fica claro também o bom desempenho do M\_ITER, a Figura 4.7 apresenta as relações entre rotação e momento resultante obtido tanto para o M\_ITER quanto para o M\_FEM, onde é possível observar a coerência de resultados.

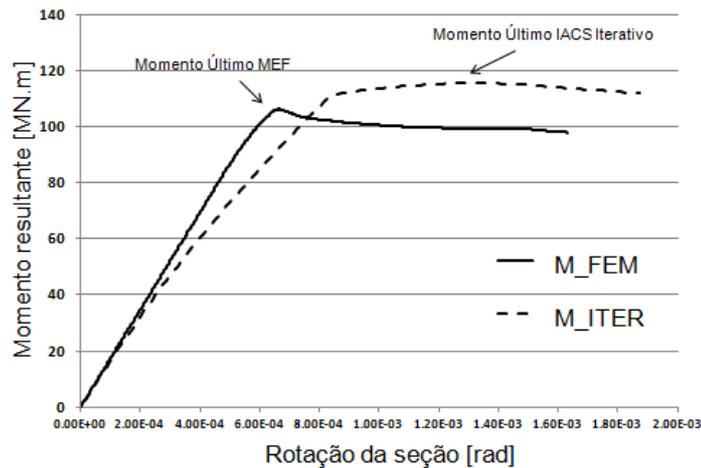


Figura 4.7 – Comparação dos resultados para a análise não linear em elementos finitos e solução pelo método IACS Iterativo.

É possível notar pelos resultados apresentados na Figura 4.7 que, embora os valores para momento fletor último sejam coerentes, as rotações associadas a este momento não são. Isso se deve em parte às curvas de resistência aplicadas no M\_ITER. Uma discussão detalhada sobre a aplicação deste método será apresentada no Capítulo 6.

A Figura 4.8 apresenta o modelo em elementos finitos na situação de carga máxima, sendo apresentadas as tensões de Von Mises em cores. Para tal foi elaborada uma malha com 13910 elementos de casca *SHELL 181* e da mesma forma utilizada para os modelos das aplicações anteriores CAIXÃO e BARCO\_S. A aplicação de carga se deu pelo uso do método MPC, descrito no capítulo 5.1.1.

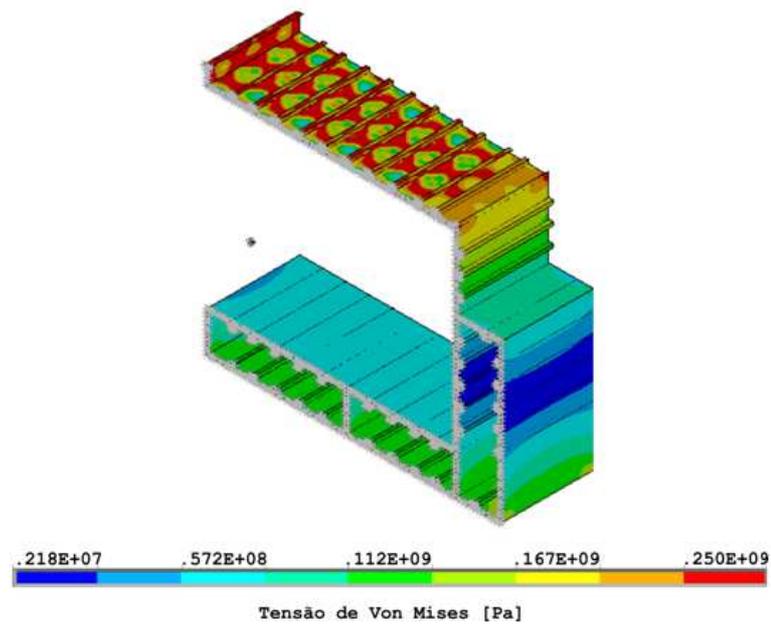


Figura 4.8 – Modelo NT Guarita em elementos finitos, carga última.

Os demais métodos: M\_RD, M\_CSR1 e M\_CSR2, seguiram analogamente as mesmas metodologias apresentadas na aplicação BARCO\_S, detalhadas na Seção 5.2. Assim, a aplicação destes métodos não será detalhada neste caso.

## 5 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas com detalhes as aplicações dos diferentes métodos para as aplicações CAIXÃO e BARCO\_S. Na aplicação GUARITA, os métodos foram os mesmos que os apresentados na aplicação BARCO\_S.

São apresentadas as particularidades e eventuais adaptações que foram necessárias para aplicação de cada método.

### 5.1 CAIXÃO

Neste capítulo são detalhados os métodos utilizados no cálculo do momento fletor último na aplicação CAIXÃO.

#### 5.1.1 Modelo dos Elementos Finitos (M\_FEM)

Foi elaborado um modelo em elementos finitos, o qual foi submetido a uma análise não linear física e geométrica estática, considerando grandes deslocamentos e utilizando o software comercial ANSYS (2007). Após uma análise preliminar onde foi considerado o custo computacional e a curva de convergência de cada elemento, optou-se pelo elemento de placa de quatro nós com seis graus de liberdade cada nó *SHELL 181*, que suporta análises não lineares bem como a introdução de características específicas para o material, onde é possível considerar o efeito de plasticidade.

O momento foi aplicado à seção utilizando a técnica conhecida como MPC “multipoint constraint” onde os deslocamentos dos nós chamados de “escravos” são diretamente relacionados pela sua posição com a rotação de um nó “mestre” no centro de cada face do perfil. Assim quando atribuída uma rotação ou um momento no nó “mestre”, a força resultante será distribuída entre os nós “escravos” que compõem o perfil, gerando uma espécie de superfície rígida na qual é aplicado o momento. Outra característica importante do modelo é o fato das rotações dos nós escravos serem nulas em relação à superfície rígida de rotação. Numa analogia a um modelo físico real é como se existisse uma placa muito rígida soldada a cada face da seção e nessa placa fosse aplicada uma rotação prescrita.

Devido ao comportamento não linear em análises até o colapso da estrutura, torna-se necessária uma análise não linear física e geométrica. Assim, o estudo de independência de malha deve ser realizado também numa análise não linear, já que não há garantia que o número de elementos necessários para se obter uma resposta aceitável para uma análise linear simples seja o mesmo que o necessário para uma análise não linear. Isto se deve ao fato de que a análise não linear é capaz de considerar o crescimento de bolhas de flambagem, que são geometricamente complexas e exigem um maior número de elementos, além das considerações referentes às propriedades do material. A Figura 5.1 apresenta a maior complexidade geométrica da solução pela análise não linear e também o gráfico da curva de convergência da solução para análises linear e não linear.

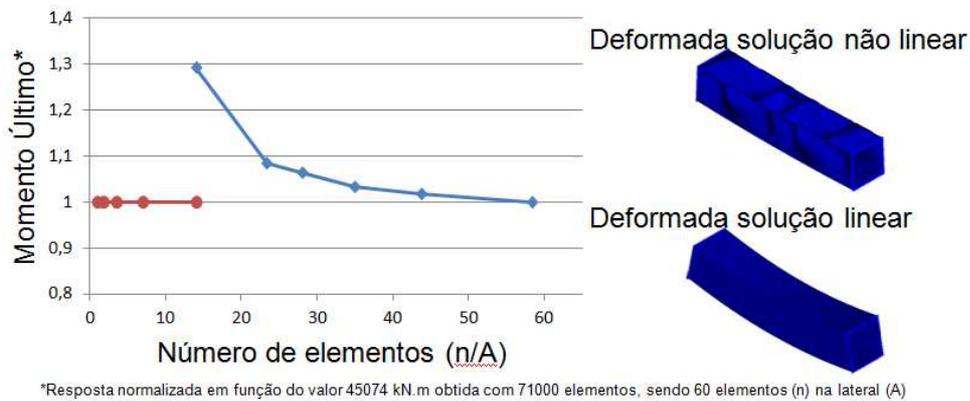


Figura 5.1 – Comparação entre a solução linear (curva vermelha) e a solução não linear física e geométrica (curva em azul).

Como resposta da análise não linear, o gráfico típico obtido é apresentado na Figura 5.2 (a). O valor de momento fletor último é considerado como o ponto de máximo momento resultante no gráfico da Figura 5.2 (a), pois a partir de tal ponto para rotações maiores o momento resultante é inferior ao obtido, considerando assim o ponto máximo como o de maior resistência da seção. O valor obtido foi de 45074 kN.m com 71000 elementos. A Figura 5.2 (b) apresenta a deformada e as tensões de Von Misses para a carga de colapso.

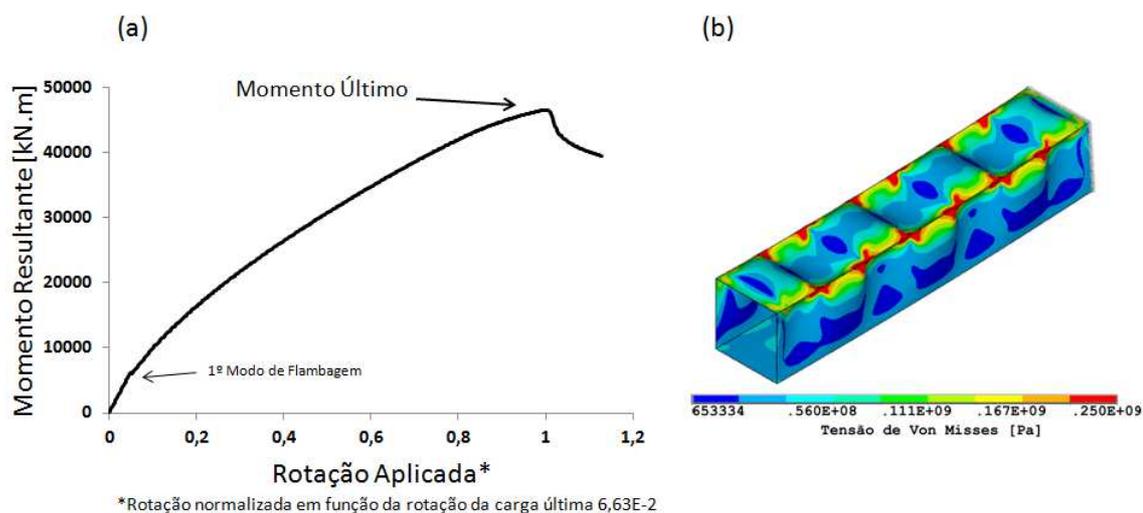


Figura 5.2 – (a) Resposta estrutural da análise não linear no modelo perfil caixão. (b) Deformada e tensões de Von Mises na condição de momento fletor último.

### 5.1.2 Método da Resistência Direta (M\_RD)

O Método da Resistência Direta é capaz de calcular a resistência última do perfil utilizando as cargas críticas de flambagem, considerando o momento fletor último como o mínimo dos momento fletores últimos calculados com base na carga crítica de flambagem elástica local, distorcional ou colapso global. Neste caso, a carga crítica global será a menor entre o modo de flambagem global e o momento mínimo de início de escoamento. Serão apresentados a seguir os cálculos do momento fletor último levando em conta cada um dos fatores acima citados e os resultados comparados para se definir qual será o momento fletor último da seção.

Torna-se necessário, então, o cálculo dos modos críticos de flambagem da estrutura, e uma posterior classificação quanto à característica de cada modo (local, global ou distorcional). Neste trabalho, os modos de flambagem são calculados utilizando os modelos em elementos finitos através do software comercial ANSYS e também em um modelo de faixas finitas utilizando o software livre CUFSM. O erro encontrado entre os modelos para a aplicação em questão foi inferior a 4%.

A Figura 5.3 apresenta a solução para o primeiro modo de flambagem utilizando o método das faixas finitas. É possível obter por este método a curva característica do modelo

considerando o comportamento das cargas de flambagem em relação ao comprimento de meia onda da bolha de flambagem, sendo a carga crítica a menor carga que inicia uma bolha de flambagem de comprimento de meia onda menor que o comprimento total da peça.

Analisando a deformada da seção flambada é possível classificar o primeiro modo como local, já que predominantemente ocorre a flambagem de um dos componentes do perfil, no caso a chapa superior. Fica então determinado o momento crítico de flambagem local do perfil como 4089 kN.m.

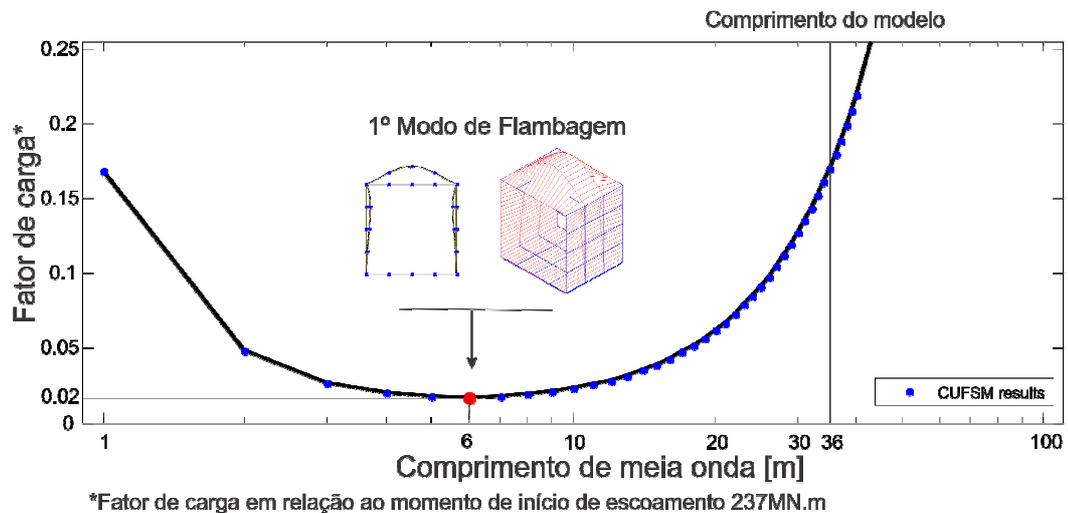


Figura 5.3 – Solução do primeiro modo de flambagem usando CUFSM

Com base no momento crítico de flambagem local, é possível através das equações semiempíricas apresentadas pelo Método da Resistência Direta calcular o momento fletor último com relação ao modo de flambagem local. Considerando para o momento de início de escoamento o valor  $M_{lim} = 237000 \text{ kN.m}$  e para o momento crítico de flambagem local  $M_{crit} = 4089 \text{ kN.m}$  e aplicando estes valores nas equações semiempíricas do MRD é possível obter o momento fletor último de flambagem local igual a 45360 kN.m (resultado obtido com 60 elementos transversais).

O momento fletor último global é adotado como o mínimo entre o momento de início de escoamento e o momento de flambagem global da estrutura. Neste caso, o momento de flambagem global pode ser calculado considerando a estrutura como uma viga. O momento de início de escoamento é muito menor que o momento de flambagem global, sendo assim, fica determinado o momento crítico de flambagem global como 237.000 kN.m.

O momento crítico de flambagem distorcional pode ser desconsiderado neste caso, pois tal classe de flambagem é característica principalmente de perfis abertos. Em estruturas fechadas como a estudada nesta aplicação, os modos de flambagem de natureza distorcional, se existirem, apresentarão fatores de carga muito superiores aos modos críticos de flambagem local e global.

Como para esta aplicação o momento fletor último com base no momento crítico de flambagem local é menor que o momento de colapso global e o momento fletor último de natureza distorcional pode ser desconsiderado, o momento fletor último da seção é o momento fletor último com base na flambagem local, 45360kN.m.

### **5.1.3 Método da Largura Efetiva (M\_LEF1 e M\_LEF2)**

Neste capítulo serão apresentados os cálculos do momento fletor último pelo Método da Largura Efetiva em duas versões. Na primeira delas, M\_LEF1, a largura efetiva é calculada tendo como base resultados obtidos com modelos locais submetidos a análises não lineares. Já na segunda versão, M\_LEF2, a largura efetiva é calculada tendo como base expressões analíticas presentes na norma NBR 14762.

Para a aplicação do Método da Largura Efetiva no cálculo do momento fletor último da seção perfil caixão, é sugerida a divisão da seção em dois elementos independentes, sendo estes o modelo local da mesa e o modelo local da alma, que representam respectivamente o comportamento da mesa comprimida e da alma do perfil caixão que serão modelados em elementos finitos e submetidos a análises não lineares. O comportamento da mesa sujeita a tração é considerado totalmente efetivo.

A Figura 5.4 apresenta a distribuição da seção perfil caixão em dois modelos independentes. Com base nos resultados das análises não lineares dos modelos em elementos finitos locais, são calculadas as áreas efetivas e suas respectivas posições na seção efetiva resistente, e assim, torna-se possível o cálculo do momento de inércia efetivo e da posição do eixo neutro  $d$  da seção efetiva completa (Figura 5.5). Através da equação 5.1 se obtém o momento fletor último da seção.

$$M_u = \frac{\sigma_{esc} I_{eff}}{d} \quad (5.1)$$

Os modelos independentes são estudados em análises não lineares físicas e geométricas até o colapso da estrutura, e sob a condição de colapso são então avaliadas as distribuições de esforços. A essas distribuições é aplicada a Teoria da Largura Efetiva adaptada para cada caso. Como uma forma de comparação dos resultados obtidos, é aplicada a este caso a metodologia para cálculo da largura efetiva apresentada na NBR 14762. Detalhes e considerações aplicadas a cada um dos modelos locais, alma e mesa, estão detalhados no Apêndice A.

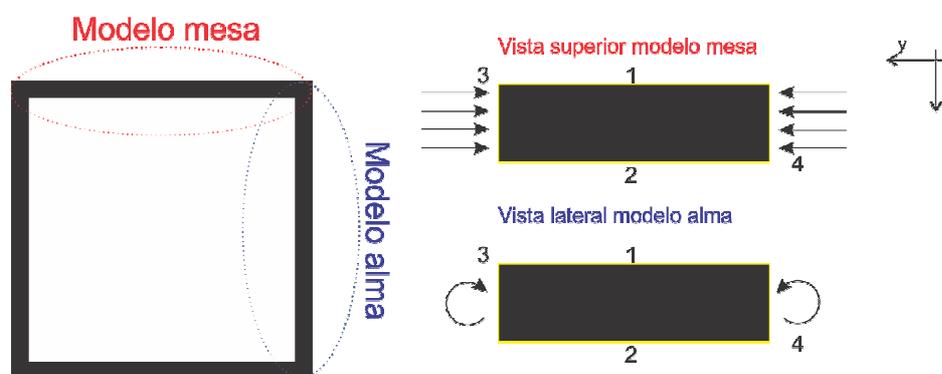


Figura 5.4 – Modelos independentes perfil caixão.

Devido à extrema esbelteza do perfil estudado, a seção efetiva calculada tanto pelo método tradicional da largura efetiva quanto pela abordagem prevista na NBR 14762 apresentam momento de inércia da ordem de 6% e 4,8%, respectivamente, quando comparados com o momento de inércia da seção original. A Figura 5.5 apresenta desenhos em escala das seções efetivas resultantes das aplicações de ambos os métodos e os respectivos valores de momento de inércia efetivo. O valor do momento fletor último pode ser obtido pela equação 5.1, aplicando o momento de inércia efetivo e a posição do eixo neutro. Os resultados para cada um dos métodos são apresentados na Figura 4.2 que também compara os resultados com outros métodos empregados. Para o método da largura efetiva, o momento fletor último calculado é igual a 44005 kN.m (M\_LEF1); já para a largura efetiva proposta pela NBR 14762 é igual a 38266 kN.m (M\_LEF2).

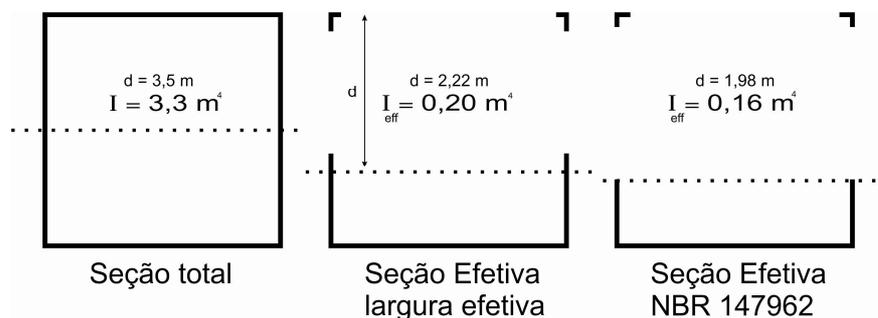


Figura 5.5 – Seção efetiva em escada (OBS: para facilitar a visualização, a espessura da parede foi multiplicada por dez, e as demais dimensões estão proporcionais).

#### 5.1.4 Método Direto IACS (M\_CSR1 e M\_CSR2)

Para o cálculo do momento fletor último pelo Método Direto, são apresentadas no CSR-IACS dois métodos possíveis: Métodos 1 e 2 (M\_CSR1 e M\_CSR2). Em ambos os métodos é considerada a existência de uma área efetiva resistente do convés da embarcação, considerando o restante da seção como efetiva, no caso da aplicação em um perfil caixão o convés será representado pela mesa superior, modelo mesa na Figura 5.4, considerando os demais elementos estruturais como totalmente efetivos.

O cálculo da área efetiva do convés é realizado pelo quociente da carga de colapso pela carga de escoamento linear da seção, considerando para o Método 1 (M\_CSR1) a carga de colapso como a carga de início de escoamento, e para o Método 2 (M\_CSR2) a carga do primeiro modo de flambagem. Com base na área efetiva do convés é então possível obter a posição do eixo neutro da seção e o momento de inércia da seção efetiva e, conseqüentemente, o momento fletor último da seção. A Figura 5.6 apresenta um esquema de aplicação do método. Já a Figura 5.7 apresenta a resposta estrutural do modelo local da mesa e marca as cargas de colapso para cada método, bem como as seções efetivas resultantes.

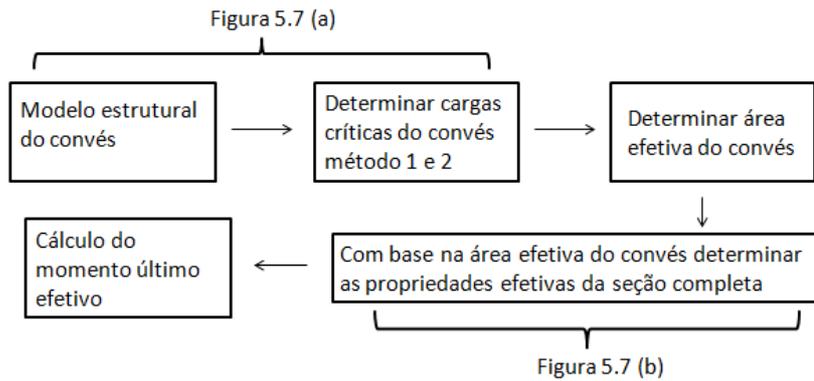


Figura 5.6 – Esquema de aplicação do Método Direto.

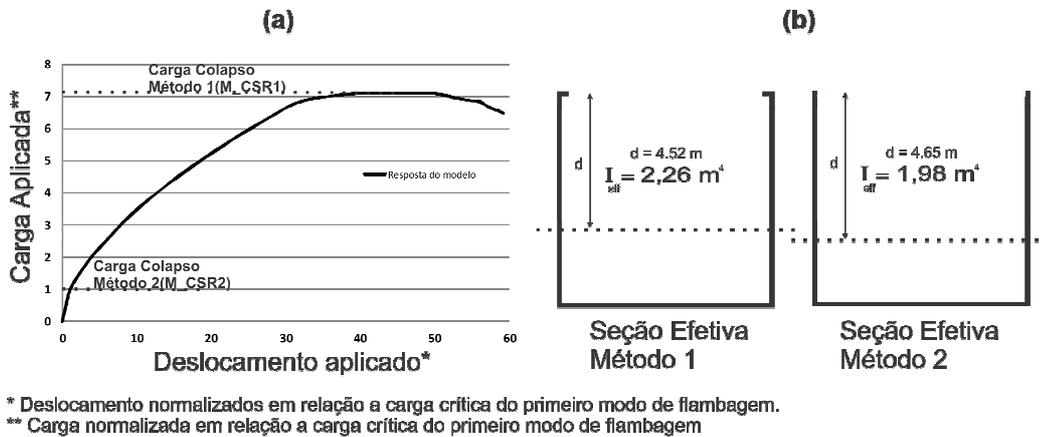


Figura 5.7 – (a) Resposta estrutural modelo convés (b) Seções efetivas.

Os resultados para o momento fletor último calculado através dos dois métodos sugeridos para o Método Direto, M\_CSR1 e M\_CSR2, são apresentados e comparados na Figura 4.2. Ambos os métodos apresentam grande erro quando comparados com os outros métodos como, por exemplo, a solução por elementos finitos. Isso ocorre devido à característica da aplicação, já que os métodos apresentados no CSR [IACS 2008] são estruturados para obter boas soluções em estruturas navais, onde geralmente existem elementos pouco esbeltos e comumente enrijecidos e o efeito da perda de rigidez das paredes laterais pode ser desconsiderado, justamente o oposto da seção do perfil caixão. O valor obtido para o momento fletor último é 125.231 kN.m para o método 1 (M\_LEF1), para o método 2 o valor é 106.852 kN.m (M\_LEF2) e a solução via elementos finitos, considerando não linearidade física e geométrica, seria 48176kN.m.

## 5.2 BARCO\_S

Nesta seção são detalhados os métodos utilizados no cálculo do momento fletor último na aplicação BARCO\_S.

### 5.2.1 Modelo em Elementos Finitos (M\_FEM)

De forma análoga ao utilizado na aplicação do perfil caixão, foi elaborado um modelo em elementos finitos com elementos de quatro nós com seis graus de liberdade cada nó, *SHELL 181*, utilizando o software comercial ANSYS (2007), através do qual o modelo foi submetido a análises estáticas não lineares física e geométrica. A aplicação do momento é apresentada esquematicamente na Figura 4.3 através da técnica MPC (*multipoint constraints*), e como condições de contorno foram restringidas as rotações dos nós das seções onde foi aplicado o momento em todas as direções.

Em função da existência de um fundo duplo na embarcação não existe simetria em relação a um eixo transversal (eixo neutro não está posicionado na altura média da seção). Assim, é esperada uma resistência diferente em relação aos momentos de aquebramento e tosamento, que representam o convés da embarcação tracionado e comprimido respectivamente. A Figura 5.8 apresenta a curva estrutural obtida como resposta do ensaio não linear em elementos finitos.

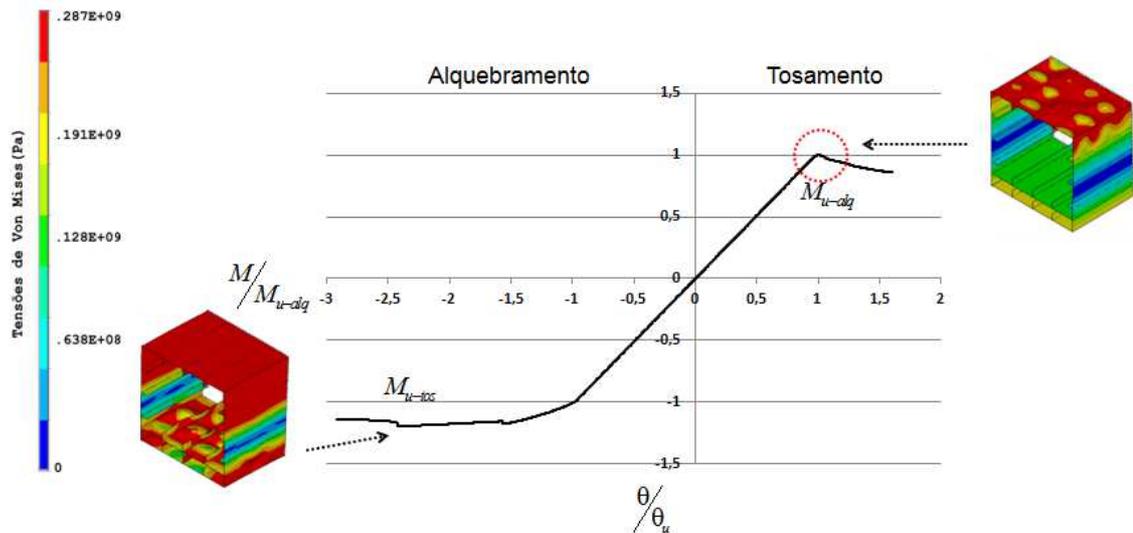


Figura 5.8 – Resultado da análise de elementos finitos para o momento de alquebramento e tosamento para o perfil fundo duplo. (eixos normalizados em função do momento fletor último e a respectiva rotação na condição de tosamento  $M_{u-tos}$  e  $\theta_u$  )

Com base nos resultados obtidos na curva de resposta do modelo apresentada na Figura 5.8, é possível definir os valores de 713,9 kN.m para o momento fletor último de tosamento e -867 kN.m para alquebramento (valores alcançados com 23926 elementos). Nota-se que o momento fletor último de tosamento é mais crítico nesta aplicação devido à presença de um número maior de enrijecedores na parte inferior da seção, com o objetivo de suportar o fundo do tanque. Essa característica geralmente está presente em embarcações de fundo duplo. Assim, nos demais métodos apenas este momento será estudado.

### 5.2.2 Método da Resistência Direta (M\_RD)

Como dado de entrada nas equações semiempíricas do MRD que calculam o momento fletor último, é necessário conhecer dois parâmetros, o momento de colapso global e o momento crítico de flambagem local. No caso desta aplicação, o momento de colapso global é o menor entre o momento de início de plastificação e o momento de colapso global. Já o momento crítico de flambagem local é o primeiro modo de flambagem da seção estudada.

O cálculo do momento de início de escoamento é relativamente simples, aplicando as propriedades do material e da seção estudada na equação 5.1 resulta em 716 kN.m. Para o

momento de flambagem global, pode-se fazer uma aproximação considerando a seção como uma viga e tomando o primeiro modo de flambagem da viga por flexão. Neste caso, o momento de início de escoamento é bem inferior à aproximação do momento de flambagem global da seção, de modo que o momento de colapso global é admitido como 718 kN.m.

O momento crítico de flambagem local é o primeiro modo de flambagem local. O cálculo deste foi realizado através de um modelo de elementos de faixas finitas utilizando o programa CUFSM. Através deste método é possível observar a curva de comportamento da seção, apresentada no gráfico da Figura 5.9, onde é possível observar o comprimento de meia onda pelo fator de carga. O primeiro modo de flambagem passa a ser o menor fator de carga encontrado, desde que o comprimento de meia onda seja inferior ao comprimento do perfil, neste caso, 588 kN.m.

O gráfico apresentado na Figura 5.9 mostra também a existência de um modo de flambagem com carga menor do que a utilizada, porém, neste caso tal modo não acontece, já que o comprimento de meia onda é superior ao comprimento do perfil.

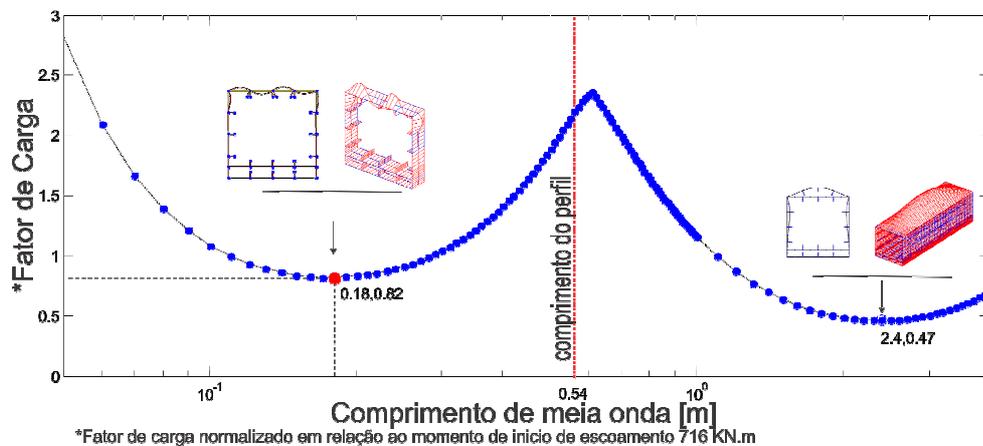


Figura 5.9 – Cargas e comprimento de meia onda para o primeiro modo de flambagem pelo método das faixas finitas (considerando uma malha de 150 elementos).

De posse do momento crítico de flambagem local, 587 kN.m, é possível então, aplicar as equações do Método da Resistência Direta, resultando como solução para o momento fletor último, levando em conta a flambagem local igual a 570 kN.m. Como este valor é inferior ao momento de colapso global, o momento fletor último da seção é o momento fletor último levando em conta a flambagem local.

### 5.2.3 Método Direto IACS (M\_CSR1 e M\_CSR2)

O Método Direto proposto pela IACS considera uma redução de rigidez do convés da embarcação através da existência de uma área efetiva para tal. Essa área é calculada em função da capacidade de flambagem do convés. No caso do Método 1 (M\_CSR1) a capacidade de flambagem é considerada como a carga de início de escoamento em uma análise não linear física e geométrica do modelo local do convés, já para o Método 2 (M\_CSR2) a capacidade de flambagem é considerada como a carga do primeiro modo de flambagem do modelo local do convés.

Com o objetivo de se obter as cargas da capacidade de flambagem pelos Métodos 1 e 2, foi construído um modelo local em elementos finitos do convés da embarcação; detalhes do modelo são mostrados na Figura 5.10 (a). Tal modelo foi submetido à compressão até a carga última em uma análise não linear física e geométrica, e a resposta é apresentada na Figura 5.11 (na qual são também indicadas as cargas críticas para cada um dos métodos, M\_CSR1 e M\_CSR2). A Figura 5.10 (b) apresenta a deformada e o mapa da tensão de Von Mises do modelo quando aplicada a carga última.

Neste caso a carga última não será utilizada já que ocorre plastificação com carga inferior, a esta, a carga de início de plastificação, que define a carga de capacidade de flambagem para o Método 1 (M\_CSR1). Para o Método 2 (M\_CSR2), a carga do primeiro modo de flambagem será utilizada; esta pode ser obtida analisando uma alteração na rigidez do modelo mostrada na curva de resistência apresentada na Figura 5.11, por uma análise de flambagem por autovalores, utilizando um modelo em faixas finitas.

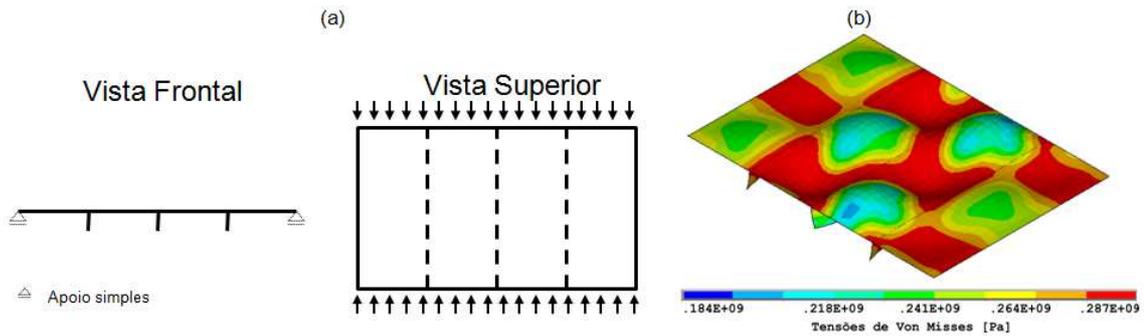


Figura 5.10 – Descritivo modelo convés perfil fundo duplo.

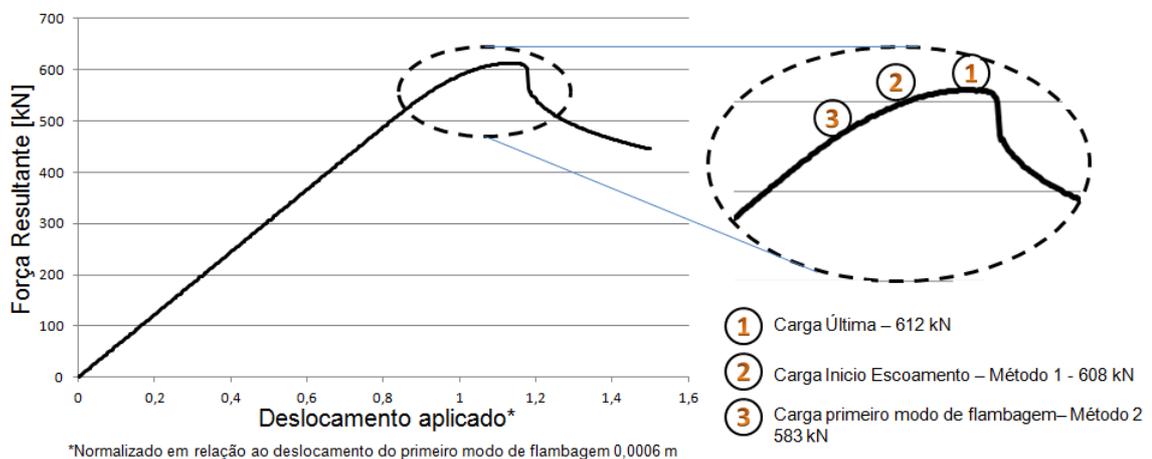


Figura 5.11 – Resposta análise não linear para o modelo convés perfil fundo duplo. (solução com 4898 elementos)

Assumindo valores de carga de flambagem de 608 kN para o método 1 (M\_CSR1) e 583 kN para o método 2 (M\_CSR2), é possível calcular a área efetiva do convés por ambos os métodos pela equação 5.2, onde  $\sigma_u$  é a tensão crítica de flambagem obtida pela equação 5.3.  $F_{cf}$  é a carga da capacidade de flambagem,  $\sigma_{esc}$  a tensão de escoamento linear, e  $A$  é a área total do convés.

$$A_{eff} = A \frac{\sigma_u}{\sigma_{esc}} \quad (5.2)$$

$$\sigma_u = \frac{F_{cf}}{A} \quad (5.3)$$

Depois de calculada a área efetiva, calcula-se o momento de inércia efetivo da seção  $I_{red}$  e o eixo neutro efetivo  $Z_{en-red}$ ; para isso basta considerar a área efetiva do convés e as demais áreas são consideradas como totalmente efetivas. Assim, pela equação 5.4, onde  $M_u$  é o momento fletor último e  $Z_{con}$  a altura total do convés, é possível obter o momento fletor último da seção por cada uma dos métodos. A Tabela 5.1 apresenta os resultados.

$$M_u = \frac{I_{red} \sigma_{esc}}{Z_{con} - Z_{en-red}} \quad (5.4)$$

Tabela 5.1 – Resultados obtidos pelo Método Direto IACS para o perfil fundo duplo

	$F_{cf} (kN)$	$A_{eff} / A$	$I_{red} / I_{tot}$	$Z_{en-red} (m)$	$M_u (kN.m)$
Método 1	608,3	79,78%	90,9%	0,289	626,1
Método 2	583,9	76,68%	89,4%	0,286	611,7

#### 5.2.4 Método Iterativo IACS (M\_ITER)

O primeiro passo para o cálculo do momento fletor último através do Método Iterativo é dividir a seção estudada em elementos estruturais independentes, e depois classificá-los conforme seu comportamento estrutural. De acordo com as recomendações presentes no IACS-CSR (2008) para a aplicação em questão, a estrutura será dividida em dois tipos de elementos: quina e elemento enrijecido longitudinal. A Figura 5.12 traz um desenho esquemático da divisão do perfil completo em elementos locais independentes.

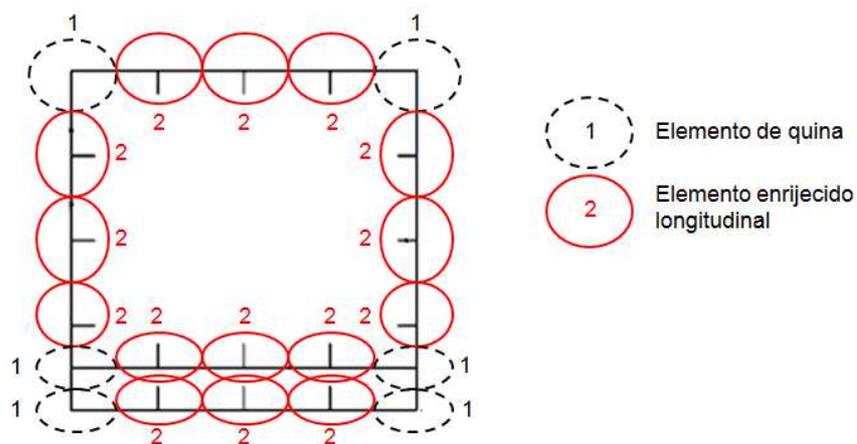


Figura 5.12 – Divisão dos elementos independentes no perfil fundo duplo

Depois de definidos os elementos estruturais independentes, é necessário levantar as curvas de resistência associadas. No caso dos elementos de quina, a resposta é sempre elastoplástica independente da solicitação, seja ela tração ou compressão. Já os elementos longitudinais enrijecidos apresentam uma curva de resistência à compressão diferenciada, que é função das características geométricas e do material. No *Common Structural Rules* [IACS 2008] são apresentadas equações que devem ser utilizadas no levantamento da curva estrutural no caso de compressão destes elementos. No caso de tração, o comportamento é considerado elastoplástico, conforme apresentado na Figura 5.13.

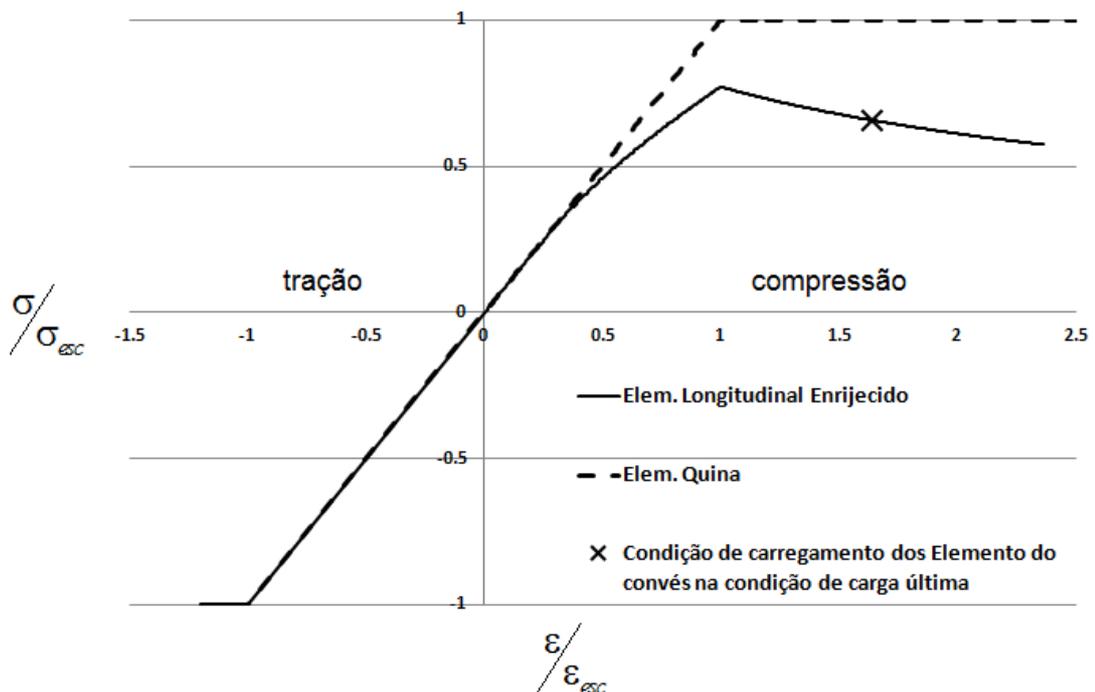


Figura 5.13 – Comportamento estrutural dos elementos de quina e longitudinal enrijecido

É possível calcular a resposta de cada elemento quando aplicado um incremento de rotação  $\theta$  na seção. A deformação de cada elemento é dada pela equação 5.5, onde  $d$  é a distância do elemento até o eixo neutro da seção e  $l$  o comprimento total do elemento. Usando as deformações de cada elemento como dado de entrada nas funções apresentadas na Figura 5.13, é possível obter a tensão em cada elemento. Aplicando a tensão na equação 5.6, onde  $A$  é a área do elemento, é possível obter a força em cada elemento. Fazendo um somatório dos momentos gerados pelas forças individuais, equação 5.7, é possível encontrar o momento resultante associado ao incremento de rotação aplicado.

Devido a não linearidade da resposta estrutural dos elementos comprimidos, é esperado uma alteração na posição do eixo neutro da seção. Portanto, a cada incremento de rotação é necessário realizar um balanço de forças, e através deste balanço, alterar a posição do eixo neutro. Tal não linearidade fica evidenciada na Figura 5.13, que apresenta também o ponto na curva de resposta estrutural onde os elementos longitudinais do convés estão submetidos à condição de carga do momento fletor último.

A Figura 5.14 apresenta a solução do momento resultante para cada incremento de rotação, bem como a posição do eixo neutro da seção conforme são aplicados os incrementos

de rotação. Nesta análise foram seguidas as recomendações presentes no CSR [IACS 2008] em relação fato de o incremento de rotação possuir pelo menos 300 passos até a rotação correspondente ao momento fletor último, e o cálculo da posição do eixo neutro ter precisão de no mínimo 0,1 milímetros.

$$\varepsilon = \frac{d \tan \theta}{l} \quad (5.5)$$

$$F = A\sigma \quad (5.6)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i d = M_r(\theta) \quad (5.7)$$

A Figura 5.14 tem seus resultados de momento normalizados em relação ao momento fletor último atingido  $M_{ult}$ , a uma rotação  $\theta_{ult}$  e à posição inicial do eixo neutro  $d_{ini}$ , sendo esta a posição convencional do eixo neutro numa análise linear. A Tabela 5.2 apresenta os valores supracitados.

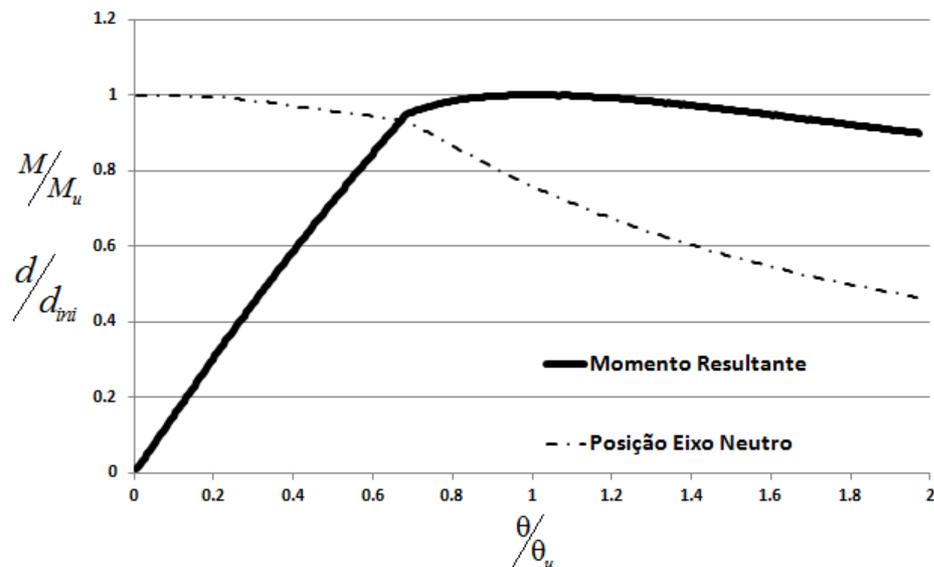


Figura 5.14 – Momento resultante e posição do eixo neutro pelo Método Iterativo IACS para o perfil fundo duplo

Tabela 5.2 – Resultados obtidos pelo Método Iterativo IACS(M\_ITER) para o perfil fundo duplo.

	$M_u (kN.m)$	$\theta_u (rad)$	$d_u (m)$	$d_{ini} (m)$
Método Iterativo	682,9	0,0025	0,3	0,24

## 6 MÉTODO ITERATIVO MODIFICADO

Tendo como base o Método Iterativo apresentado no *Common Structural Rules* [IACS, 2008], é proposta neste trabalho, com o intuito de melhorar a qualidade da resposta do método, uma modificação no método original. A modificação proposta se baseia no uso de modelos não lineares locais para o cálculo da resposta de cada elemento, ao invés do uso de equações analíticas propostas pela norma. Como estudo de caso para tais comparações é apresentada a aplicação GUARITA.

Ainda neste trabalho, o método modificado é usado em uma análise de sensibilidade do momento fletor último frente à redução das espessuras das chapas na aplicação GUARITA, caracterizando qualitativamente a contribuição de cada elemento na resistência total da estrutura.

Inicialmente são discutidas no subcapítulo a seguir as principais diferenças entre a resposta do método iterativo (M\_ITER) e da análise não linear por elementos finitos (M\_FEM); logo após é proposta a modificação no método.

### 6.1 Comparação do Método M\_ITER com MEF

O primeiro passo na aplicação do Método Iterativo é definir quais regiões serão classificadas como de resposta linear e quais apresentarão comportamento não linear. No caso do Método Iterativo, aos elementos de comportamento não linear são aplicadas curvas de resistência específicas em função da geometria de cada elemento. A Figura 6.1 (a) apresenta os elementos classificados como linear (quinas). Os demais elementos, quando submetidos à compressão, estarão sujeitos ao comportamento não linear. Na Figura 5.2 (b) é apresentado o elemento típico do convés, cuja geometria servirá de insumo para equações de resistência não linear presentes no método IACS Iterativo.

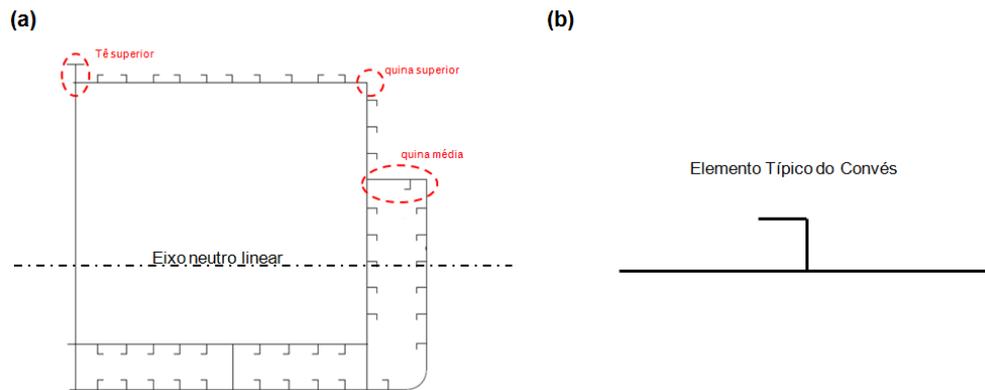


Figura 6.1 – (a) Elementos de resposta linear. (b) Elemento típico de convés.

Com o intuito de verificar a adequação das curvas estruturais do Método Iterativo, a resposta estrutural dos elementos foi comparada com o resultado de uma análise não linear até a carga última. A Figura 6.2 (a) apresenta a comparação dos resultados. Para minimizar o efeito das condições de contorno, o modelo foi elaborado com dez elementos. Nota-se nos gráficos da Figura 6.2 que a curva de resistência proposta pela IACS é substancialmente mais conservadora do que os resultados da análise via MEF.

Contudo, o Método Iterativo recomenda que as quinas sejam consideradas totalmente lineares até a tensão de escoamento. Isso impõe uma resistência superior para a quina quando comparada aos resultados em elementos finitos. No entanto, esta consideração acaba por nivelar a resposta do convés, que estava prejudicada em função das curvas de comportamento adotadas pela IACS, conforme mostra a Figura 6.2 (a). A Figura 6.2 (b) apresenta a resposta estrutural do convés como um todo, somando a contribuição das quinas com os elementos não lineares, e compara com resultados obtidos no modelo completo de elementos finitos submetido a momento.

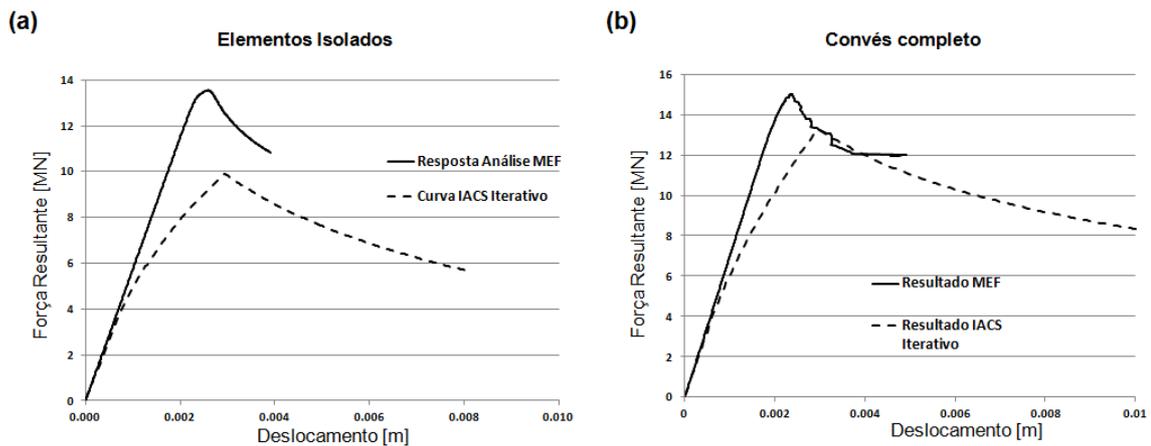


Figura 6.2 – Comparação da resposta das curvas estruturais pelo Método Iterativo com a resposta da análise em elementos finitos.

Com o intuito de verificar o comportamento dos elementos considerados de resposta linear pelo Método Iterativo, tendo como base o modelo completo da embarcação apresentado na Figura 4.8, é possível isolar os trechos de interesse e obter a resposta de cada elemento ao deslocamento. Assim, a resposta dos elementos considerados lineares até o escoamento pelo Método Iterativo foi comparada com a respectiva região na análise não linear. A Figura 4.28 apresenta as comparações.

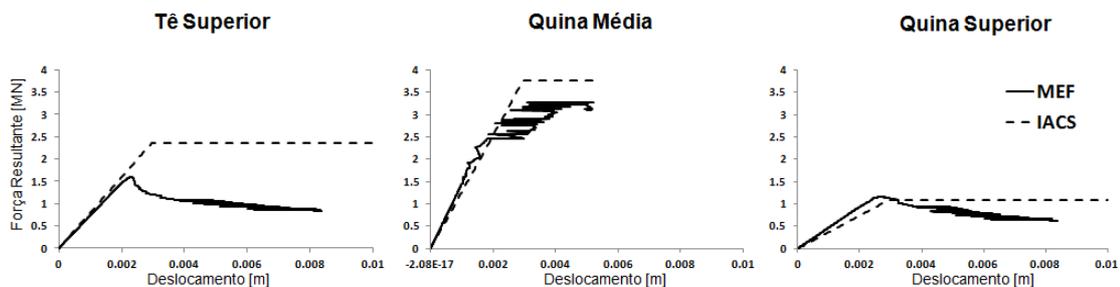


Figura 6.3 – Comparação da curva de resistência pelo Método Iterativo com a resposta dos elementos correspondentes na análise não linear em elementos finitos.

Nota-se claramente que existe uma grande diferença na resposta estrutural dos elementos considerados lineares pelo Método Iterativo quando comparado aos resultados obtidos via análise em elementos finitos. Somando-se essas diferenças às diferenças apresentadas pelos elementos não lineares, é possível explicar a divergência dos resultados para o momento fletor

último pelo Método Iterativo (M\_ITER) quando comparados aos resultados obtidos pela análise em elementos finitos (M\_FEM), conforme mostra a Figura 6.4.

Observando as diferenças e conhecidos os comportamentos dos elementos via resultados em elementos finitos, surge a possibilidade de adequar as equações do método aos resultados obtidos via elementos finitos, realimentando agora o método com as curvas obtidas com o modelo completo de elementos finitos. Assim, com base nos resultados apresentados no modelo completo da embarcação, foram elaboradas curvas estruturais dos elementos considerados. A Figura 6.4 apresenta o resultado obtido ao realizar tal modificação. Os resultados apresentados com este método serão aqui chamados de Método Iterativo Modificado.

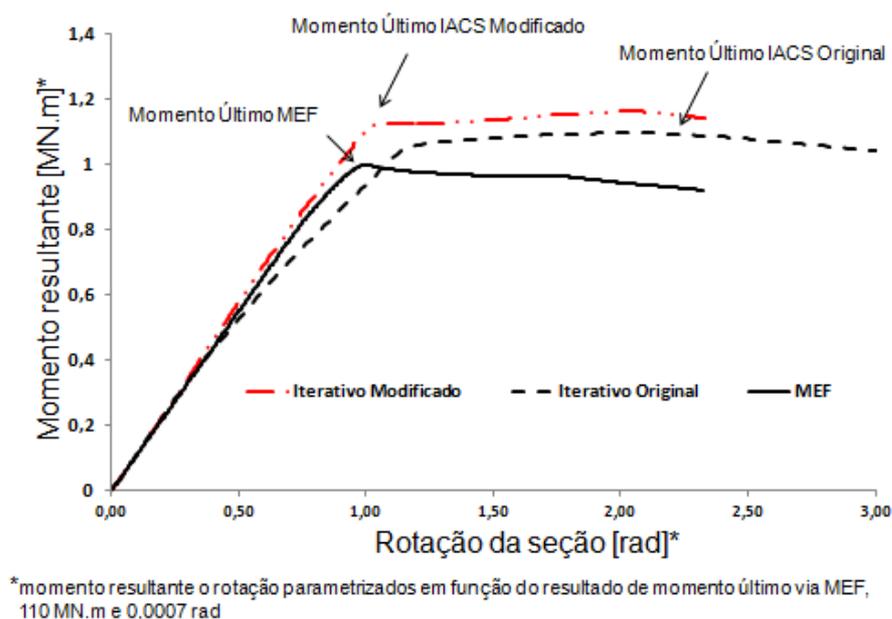


Figura 6.4 – Resultado do Método Iterativo Modificado.

Analisando os resultados obtidos pelo Método Iterativo Modificado, nota-se que existe uma maior coerência com relação à rotação encontrada para o momento fletor último. Isso se deve ao fato das curvas estruturais agora estarem calibradas com os resultados da análise via elementos finitos, não sendo mais curvas genéricas em função da geometria ou até mesmo da resposta linear para certas regiões comprimidas, como adotado no método iterativo original.

Existe ainda no método modificado uma diferença significativa em relação ao valor de momento fletor último encontrado. Acredita-se que esta diferença seja intrínseca às

simplificações necessárias para a aplicação do método, principalmente com relação aos elementos verticais, que neste caso tem suas deformações e, conseqüentemente, suas reações atribuídas localmente a um “nó” central, que acaba atribuindo deformações constantes ao elemento que na realidade está submetido a um campo de deformações linear, conforme apresentado na Figura 6.5.

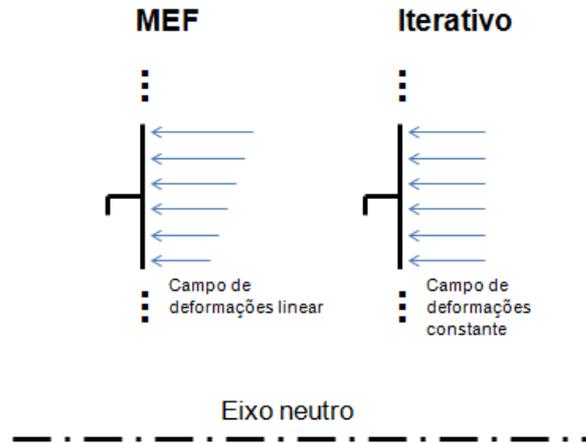


Figura 6.5 – Diferença no campo de deformações para o método iterativo.

Mesmo levando em conta a diferença numérica obtida para o valor de momento fletor último entre a resposta da análise em elementos finitos e o Método Iterativo Modificado, nota-se que o comportamento de ambos os modelos é similar. Assim, é esperado que os modelos se comportem de forma análoga frente a uma mesma alteração.

Um teste realizado com o intuito de validar a coerência da sensibilidade do Método Iterativo Modificado é apresentado na Figura 6.6, onde em ambos os modelos a espessura das chapas do convés é reduzida em 20%, e os modelos apresentam praticamente a mesma variação no valor de momento fletor último.

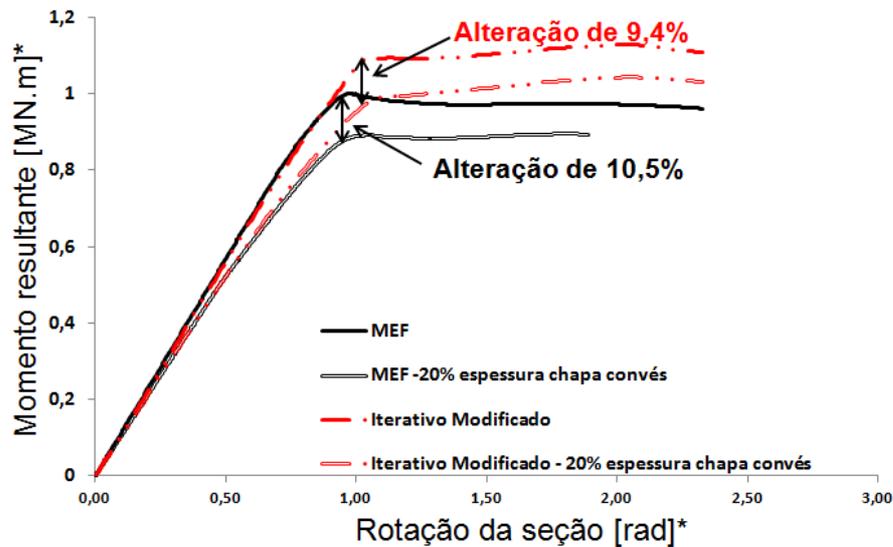


Figura 6.6 – Análise de sensibilidade no Método Iterativo Modificado.

Conforme apresentado acima, o Método Iterativo Modificado obtém bons resultados para o cálculo do momento fletor último e também apresenta sensibilidade coerente quando comparado à análise via elementos finitos. A grande vantagem do Método Iterativo Modificado é o baixo custo computacional. Enquanto uma análise não linear física e geométrica em elementos finitos tem um peso computacional considerável, o Método Iterativo Modificado requer muito menos volume de cálculo. Como comparação para um mesmo computador (computador pessoal Processador Intel® Core™ i3-2370M, 4GB RAM) a solução por elementos finitos leva 2 horas e 30 minutos, já o Método Iterativo Modificado demanda pouco mais de 10 segundos.

Entretanto, do ponto de vista prático, o Método Iterativo Modificado como foi exposto acima, não consegue substituir a análise não linear em elementos finitos, pois o método usa como subsídio para as curvas estruturais os resultados da análise do modelo completo. Tal método foi apresentado neste trabalho como prova de que, se forem inseridas curvas estruturais corretas, o mecanismo apresentado pelo Método Iterativo IACS (M\_ITER) apresenta resultados coerentes, tanto para o momento fletor último quanto para a rotação associada, além de apresentar sensibilidade semelhante a variações na espessura, a um custo computacional muito inferior.

Na tentativa de uso do mecanismo do Método Iterativo IACS na substituição da análise não linear física e geométrica do modelo completo, sugere-se o uso de modelos locais que

levantem a curva de resistência de cada elemento estrutural da embarcação. Dessa forma, não seria mais necessário o modelo completo, mas sim vários modelos locais, geralmente mais leves e simples. A proposta desta modificação no método será apresentada na seção 6.2 a seguir.

## **6.2 Método Iterativo Modificado – Modelos Locais**

O Método Iterativo Modificado, utilizando modelos locais, é uma alternativa para o cálculo do momento fletor último e tem como base o método iterativo proposto pela IACS (M\_ITER) no documento CSR [IACS 2008]. O método, como apresentado pela IACS, propõe que a estrutura seja dividida em elementos estruturais e a estes elementos sejam atribuídas propriedades estruturais que dependem basicamente da geometria e do material do elemento, alcançando desta forma resultados coerentes quando comparados aos obtidos utilizando um modelo não linear completo de elementos finitos.

O método modificado, utilizando elementos locais, propõe a mesma metodologia de abordagem, separando a estrutura como um todo em elementos locais e a estes elementos atribuindo curvas de resistência. A diferença é que as curvas de resistência, neste caso, não são mais função das equações que constam no método original, mas sim resultados obtidos com análises não lineares com modelos locais. Esta modificação aumenta razoavelmente a precisão do método, porém, ocasiona um aumento no custo computacional, pois serão necessárias as análises não lineares dos modelos locais.

O método é aqui apresentado para o cálculo do momento fletor último de embarcações. Outra possibilidade de aplicação do método, que é explorada no capítulo 7, é realizar uma análise de sensibilidade, principalmente em casos onde existam muitos elementos iguais na estrutura.

As principais limitações para aplicação do método são a simplificação de elementos complexos com três dimensões em apenas um ponto, que concentra toda a resposta do elemento, e também a determinação das condições de contorno a serem utilizadas nas análises locais. Acredita-se que a questão das condições de contorno, na maioria das vezes, pode ser contornada ao passo que o problema de simplificação dimensional é intrínseco ao método.

A principal vantagem do método é o baixo custo computacional associado, sendo geralmente muitas vezes menor que na análise não linear do modelo completo, principalmente

em estruturas navais, onde existe uma grande repetição de elementos estruturais iguais, sendo necessárias, portanto, poucas análises locais, que tem suas respostas replicadas a vários elementos. A Figura 6.7 dá um exemplo desta simplificação, apresentando inclusive um exemplo onde uma embarcação complexa pode ser simplificada em poucos elementos locais.

Outro fator importante na redução do número de elementos locais é o fato de apenas ser necessária a modelagem e a posterior análise não linear local dos elementos que estiverem sujeitos a algum tipo de não linearidade; no caso de aplicação de momento, os elementos submetidos à compressão. Aos elementos com resposta linear, como no caso, por exemplo, dos elementos submetidos à tração sem plastificação, são aplicadas curvas lineares que dependem apenas da área e da deformação do elemento.

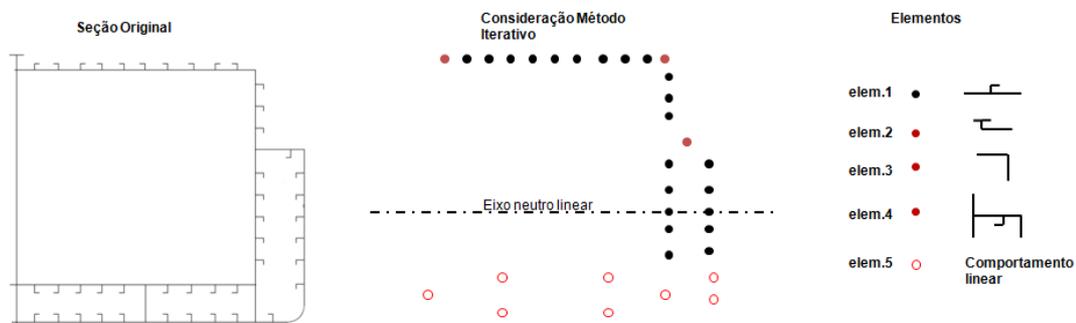


Figura 6.7 – Consideração da estrutura para o método iterativo

Na análise local de cada elemento um fator importante que define a qualidade da resposta são as condições de contorno que devem ser aplicadas aos elementos locais. Nota-se claramente, por exemplo, para o elemento 1 apresentado na Figura 6.7, que um modelo local contendo o elemento onde ele seja simplesmente apoiado não é uma boa simplificação; tão pouco ele totalmente engastado. Assim, cabe ao usuário do método analisar as especificidades de cada aplicação para melhor definir as condições de contorno que serão aplicadas.

Ainda atendendo ao problema das condições de contorno, uma boa solução para tentar minimizar os efeitos das condições de contorno seria, por exemplo, construir um elemento local maior, com três ou quatro elementos, simplesmente apoiado, sendo que a resposta total neste caso, deve ser dividida pelo número de elementos, conforme Figura 6.8. Assim, o efeito das condições de contorno é amenizado pelo número de elementos, garantindo uma resposta mais próxima da realidade.

A Figura 6.8 ilustra algumas possibilidades de solução para o elemento 1 da Figura 6.7 e apresenta as respostas obtidas para algumas condições de contorno. Além disso, compara a resposta com o resultado obtido, isolado o elemento na análise global da embarcação. Nota-se, claramente, a melhor qualidade da resposta utilizando a ideia do modelo local com vários elementos.

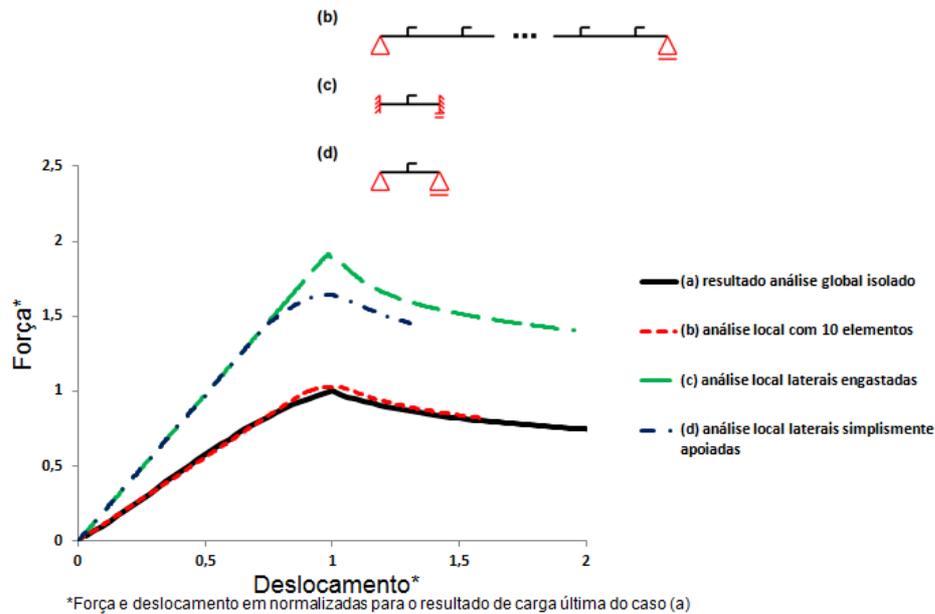


Figura 6.8 – Comportamento estrutural dos elementos para diversas condições de contorno

Para os demais elementos com comportamento não linear (2, 3 e 4 da Figura 6.7) não se identificou neste trabalho uma condição de contorno que reproduza as condições globais com tamanha precisão como apresentado para o elemento 1, mas com exceção do elemento “T” (ver Figura 6.9), os resultados são satisfatórios. A Figura 6.9 ilustra os resultados dos modelos locais dos elementos 2 a 4, considerando um apoio simples como condição de contorno.

Sugere-se como continuação deste trabalho o estudo das condições de contorno que adequariam os modelos locais à resposta dos elementos citados na estrutura global.

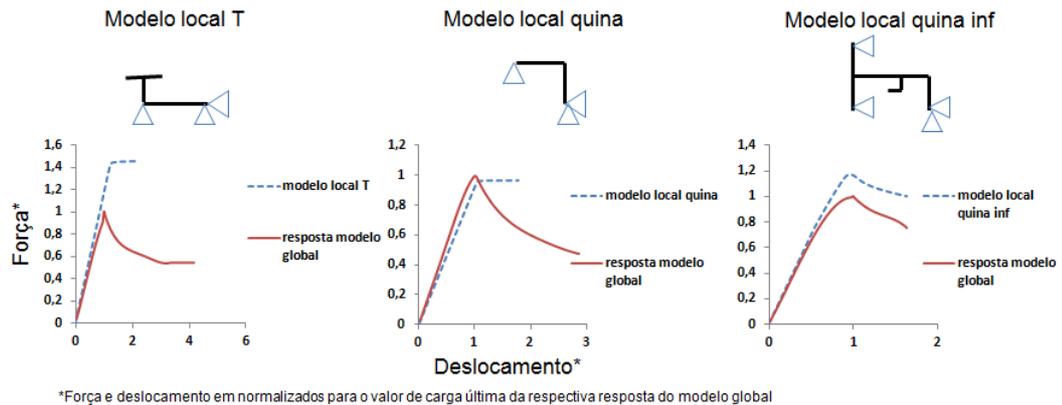


Figura 6.9 – Comparação dos resultados dos modelos locais dos elementos 2, 3 e 4

Conforme os resultados apresentados na Figura 6.9, nota-se que o resultado obtido com o modelo local Quina é muito similar à resposta linear considerando escoamento uniforme, justamente o proposto para estes elementos no método iterativo. A diferença neste caso fica para o elemento “quina inferior”, o único dos ilustrados acima que apresenta um comportamento não linear. Para os elementos “T” e “quina”, os valores obtidos pelos modelos locais são idênticos aos sugeridos pela abordagem do método iterativo original.

Utilizando as curvas estruturais obtidas com modelos locais para cada tipo de elemento como insumo na metodologia de cálculo do momento apresentada, é possível obter o resultado do momento fletor último para a seção total. A Figura 6.10 apresenta o resultado e compara com o valor obtido no modelo global em uma análise não linear física e geométrica em elementos finitos e também com os outros métodos já apresentados.

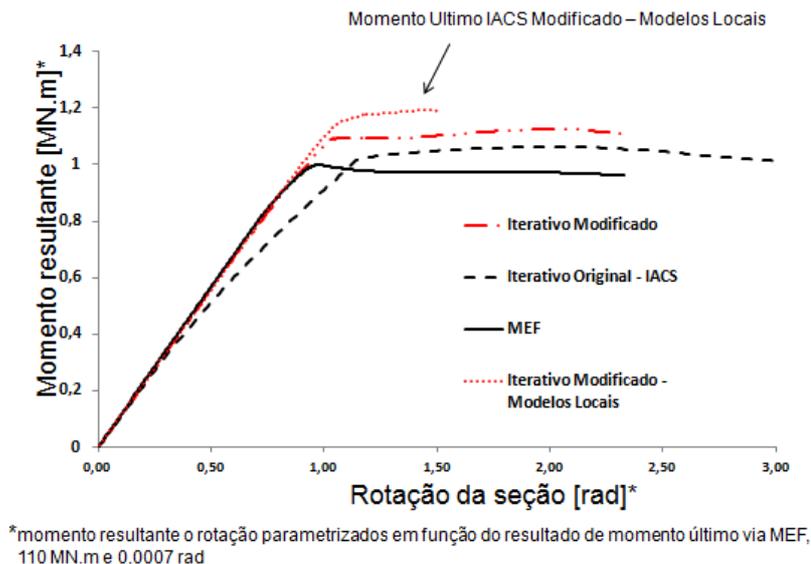


Figura 6.10 – Cálculo do momento fletor último utilizando o método iterativo com modelos locais

Nota-se na Figura 6.10 que a resposta pelo método iterativo utilizando modelos locais é menos precisa tanto para o valor do momento fletor último como para a rotação da seção associada, quando comparado aos resultados obtidos com o Método Iterativo Modificado e com a análise não linear em elementos finitos. Ocorre também uma grande alteração da rigidez para o método iterativo utilizando modelos locais no ponto onde ocorre o momento fletor último para os demais métodos, porém em função da característica das curvas dos elementos locais apresentadas na Figura 6.9, a perda de rigidez dos elementos locais não é suficiente para que se caracterize o momento fletor último, que para este método acontece com uma rotação maior da seção.

Em função da qualidade da resposta, como pode ser observado na Figura 6.10, e da potencialidade do Método Iterativo Modificado utilizando modelos locais em estudos de sensibilidade, é desenvolvido neste trabalho, no próximo capítulo, um estudo de sensibilidade da estrutura da embarcação NT Guarita ao momento fletor último (GUARITA).

## **7 ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO MOMENTO ÚLTIMO FRENTE À REDUÇÃO DE ESPESSURA DAS CHAPAS**

Ao longo dos anos de operação e apesar de conterem mecanismos de proteção, as embarcações podem ser severamente agredidas pelo ambiente, apresentando cenários de corrosão. Considerando a corrosão, neste trabalho, como um mecanismo que age de maneira uniforme, reduzindo a espessura das chapas da estrutura, busca-se identificar a sensibilidade de cada uma das regiões da seção resistente à perda de espessura frente ao valor de momento último.

O objetivo de tal levantamento é caracterizar as regiões para as quais se deve dar maior atenção nas inspeções periódicas e também na aplicação de medidas preventivas ou mitigadoras, a fim de garantir a integridade estrutural da embarcação do ponto de vista do momento fletor último. Como estudo de caso, são expostos neste trabalho os resultados para a aplicação GUARITA, que já teve o cálculo do momento último detalhado no capítulo 5.3. São usadas também as mesmas propriedades do material e a construção dos modelos em elementos finitos já indicados naquele capítulo.

Dos métodos utilizados para o cálculo do momento último apresentados neste trabalho, o método iterativo utilizando modelos locais se destaca pela potencialidade para este tipo de análise: como demonstrado no capítulo 6.2, apresenta razoável precisão e baixo custo computacional quando comparado à análise não linear física e geométrica utilizando um modelo em elementos finitos.

Conforme demonstrado pela Figura 4.6, capítulo 4.3, considera-se como boa aproximação para o cálculo do momento fletor último o cálculo baseado apenas no comprimento “entre gigantes”. Os cálculos demonstrados neste capítulo partem dessa consideração. Ainda com relação aos resultados da Figura 4.6, o efeito de “isolamento” das seções acontece devido à existência de enrijecedores transversais, que tem rigidez suficiente para limitar o comprimento de flambagem dos elementos longitudinais que compõem a seção do navio. Existe, porém, a possibilidade de corrosão severa nestes elementos transversais, que deixariam de restringir corretamente o comprimento de flambagem dos elementos longitudinais.

A Figura 7.1 apresenta o comportamento do primeiro modo de flambagem da seção mestra da embarcação estudada: nota-se que um aumento no comprimento implica numa redução do valor crítico. Como o primeiro modo de flambagem está intimamente ligado ao valor do momento último, é esperado no momento fletor último um comportamento similar. Os valores para o primeiro modo de flambagem apresentados na Figura 7.1 são resultados de uma análise utilizando um modelo de faixas finitas.

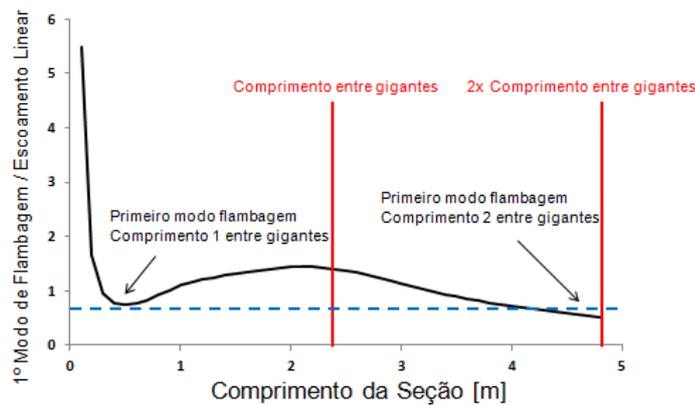


Figura 7.1 – Comportamento do primeiro modo de flambagem da seção em relação ao comprimento.

A consideração do aumento do comprimento da seção seria possível, por exemplo, em um cenário de corrosão muito severa nos elementos enrijecedores transversais.

Outro cenário considerado mais provável seria a redução do momento fletor último em função da redução das espessuras das chapas longitudinais da seção mestra, considerando que, mesmo que ocorra uma redução nos elementos transversais, esta redução não afetará significativamente o comportamento estrutural da embarcação para a solicitação que está sendo aplicada.

Analisando a Figura 7.1, percebe-se que, no caso em estudo, mesmo que ocorra a degradação total de um dos elementos transversais e o comprimento de flambagem dos elementos longitudinais por consequência dobrasse, a influencia desse segundo cenário é pequena, já que ocorre um pequeno decréscimo na carga crítica do primeiro modo de flambagem (considerando o dobro do comprimento). Ver Figura 7.1.

De qualquer forma, vale salientar que em alguma outra aplicação onde esse tipo de mecanismo tenha importância o método iterativo utilizando modelos locais não pode ser aplicado.

A alteração do valor do momento fletor último com a redução de espessura de um dos elementos está diretamente ligada à posição relativa do elemento em relação ao eixo neutro, à condição de carregamento (tração ou compressão) e ao comportamento estrutural de cada elemento. Assim, espera-se que elementos semelhantes com a mesma posição relativa ao eixo neutro, que estejam submetidos às mesmas condições de carga e que se comportem de maneira semelhante apresentem a mesma alteração do valor do momento último para uma mesma redução de espessura.

Considerando as semelhanças de comportamento citadas acima, se propõe o estudo da sensibilidade de nove regiões da embarcação, conforme mostrado na Figura 7.2. São aplicadas a cada uma dessas regiões reduções de espessura de até metade da espessura nominal, e os resultados obtidos para o momento fletor último pelo método iterativo utilizando modelos locais são apresentados no gráfico da Figura 7.6, considerando a redução de espessura em alguns elementos isolados.

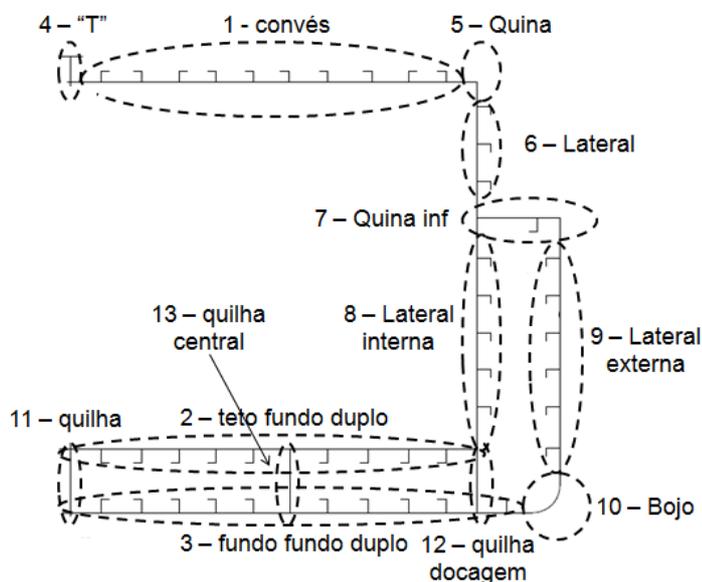


Figura 7.2 – Distribuição das regiões analisadas.

Das regiões apresentadas na Figura 7.2, algumas (como as de número 1, 4, 5 e 6) têm seu comportamento levantado por modelos locais, pois apresentam comportamento não linear,

mas os demais elementos são de comportamento linear, dentro das condições de carga atribuídas a cada um deles até o ponto onde ocorre o momento fletor último da seção. Estes últimos não necessitam modelo local, já que o comportamento é governado pela lei de Hooke. A Figura 7.3 apresenta as curvas de resistência para cada um dos elementos locais, considerando diversos cenários de redução de espessura.

Uma observação relevante em relação aos elementos 8 e 9 é que, apesar de estarem parcialmente sujeitos a compressão e apesar de que apresentariam comportamento não linear se fossem estudados até a carga última, eles não praticamente apresentam comportamento não linear na presente aplicação, pois estão localizados muito próximos ao eixo neutro e, conseqüentemente, são expostos a pequenas deformações, mantendo sua resposta estrutural em uma região que pode ser considerada linear. A posição do eixo neutro linear pode ser vista na Figura 6.7. A Figura 7.3 apresenta as curvas estruturais resultantes dos modelos locais elaborados.

Com o intuito de se quantificar a resposta em função da redução da carga de colapso de cada elemento com uma propriedade linear da estrutura, é proposto um índice que compara a redução da carga última com a redução do volume de material removido em função da redução de espessura. As equações 7.1 a 7.2 apresentam este índice, chamado de índice de não linearidade  $I_{nl}$ . Esse índice pode-se expressar das seguintes formas:

$$I_{nl} = \frac{\Delta Colapso\ na\ linear}{\Delta Colapso\ linear} \quad (7.1)$$

$$I_{nl} = \frac{1 - \frac{Cu_{-e}}{Cu_0}}{1 - \frac{\sigma_{esc} A_{-e}}{\sigma_{esc} A_0}} \quad (7.2)$$

Onde:

$I_{nl}$  = Índice de não linearidade

$Cu_0$  = Carga Última inicial

$Cu_{-e}$  = Carga Última após a redução de espessura

$A_0$  = Área transversal resistente

$A_e$  = Área após a redução de espessura

$\sigma_{esc}$  = Tensão de escoamento do material

O índice de não linearidade parece ser uma boa ferramenta para análise qualitativa do nível de não linearidade da carga de colapso de uma estrutura. Como sugestão de continuação deste trabalho, propõe-se a verificação da coerência deste índice em outras aplicações.

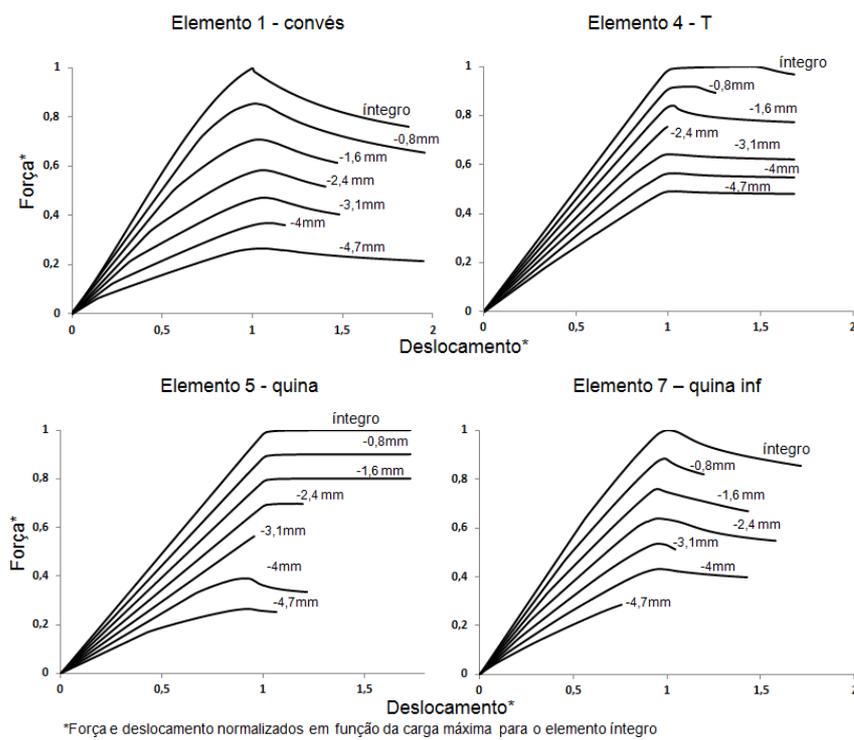


Figura 7.3 – Resposta dos elementos considerando uma redução uniforme da espessura.

No caso das aplicações apresentadas, nas quais se pretende avaliar o comportamento dos modelos locais, o índice relaciona a variação da carga última em uma análise não linear com a variação da resposta linear da estrutura, explicitando em quantas vezes a alteração da carga última foi maior ou menor em relação à alteração na área resistente (esta que é diretamente proporcional à resposta linear). Caso o índice seja igual a um, a variação da carga de colapso em uma análise não linear com a redução de espessura foi igual à variação que seria

observada em uma análise linear. A Figura 7.4 apresenta os valores obtidos para o índice de não linearidade para cada um dos modelos.

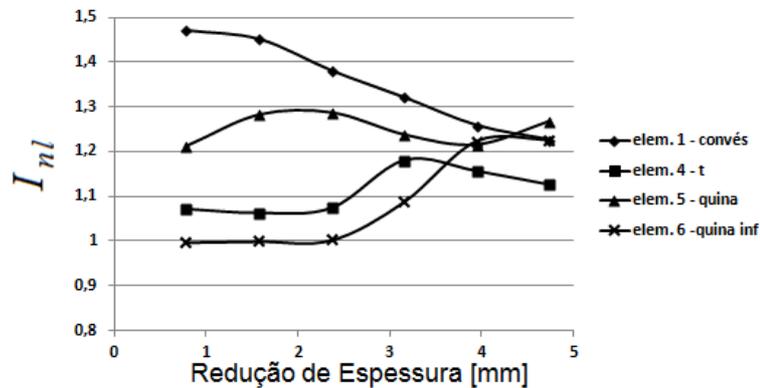


Figura 7.4 – Comportamento do Índice de não linearidade para cada modelo local.

Analisando os resultados apresentados para o comportamento estrutural de cada modelo local para as diversas reduções de espessuras apresentado na Figura 7.3 e a variação do índice de não linearidade apresentado na Figura 7.4, nota-se que existe, neste caso, coerência nos resultados. Para os modelos que obtiveram resposta mais próxima do comportamento linear e tiveram como modo principal de colapso algo próximo ao escoamento uniforme, são apontados índices próximos de um. Já onde se manifestou grande não linearidade na resposta, em geral modelos onde se desenvolveu o primeiro modo de flambagem, o índice apresenta valores maiores.

A Figura 7.5 apresenta mais detalhadamente o caso do elemento 5, mostrando a distribuição das tensões de Von Mises no estado de carga de colapso para o modelo com redução de 0,8 milímetros de espessura e para o modelo com uma redução de espessura de 4 milímetros. Nota-se pela Figura 7.3 que, neste caso, a resposta estrutural para o modelo com redução de 0,8 milímetros é próxima da linear com escoamento constante, e seu índice de não linearidade é um (Figura 7.5). Como é de se esperar pelos resultados da Figura 7.5, o elemento apresenta as tensões praticamente uniformes na carga de colapso.

Já para o modelo com redução de espessura de 4 milímetros, a curva de resistência tem comportamento claramente não linear (Figura 7.3), seu índice de não linearidade é razoavelmente maior que um (Figura 7.5), e, coerentemente, a distribuição de tensões do modelo na condição de carga de colapso evidencia a presença das bolhas de flambagem .

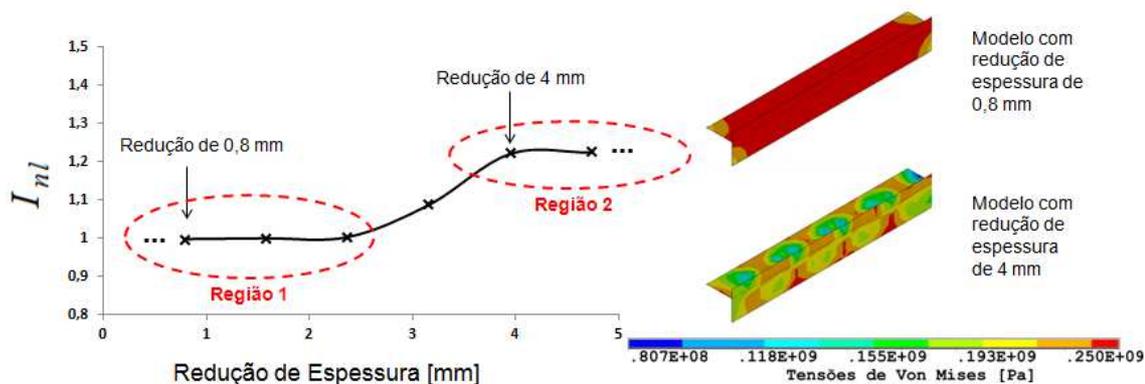
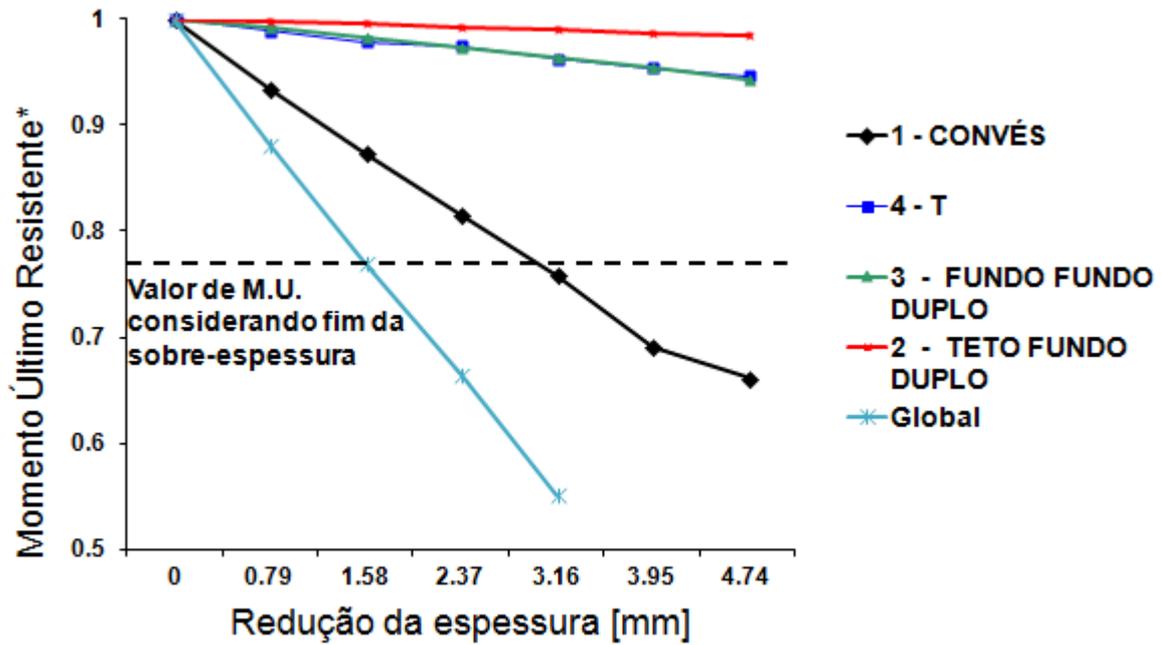


Figura 7.5 – Comportamento modelo local quina.

A aplicação do índice de não linearidade é importante para detectar-se, num cenário do modelo local, se ocorrerá uma alteração na resposta da carga última a partir de uma redução na espessura do elemento no mesmo patamar da alteração linear ou se a alteração será maior. Por exemplo, tratando-se de um elemento que se encontra na região 1 da Figura 7.5, sabe-se que uma pequena redução na sua espessura de, por exemplo, 1%, impactará o mesmo 1% na resposta de carga última do elemento. Caso o elemento se encontre na região 2 da curva do índice, Figura 7.5, a análise deve ser mais criteriosa, pois a redução porcentual da carga última será maior, se comparada com a redução da espessura. A aplicação deste índice para o cálculo do momento último da embarcação como um todo será discutida ainda neste capítulo.

Voltando ao cálculo do momento fletor último da seção mestra da embarcação a partir dos resultados dos modelos locais: com base nas curvas estruturais dos modelos locais levantadas para diversas reduções de espessura, estuda-se como a seção da embarcação se comporta de maneira global frente à estas reduções locais de espessura. A Figura 7.6 apresenta a variação ocorrida no momento fletor último da embarcação quando são aplicadas as reduções de espessura individualmente em algumas das regiões. Também na Figura 7.6, vê-se o comportamento apresentado caso a redução de espessura ocorresse de forma global, ou seja, em todas as chapas da seção.



\*Valor normalizado em relação ao resultado para a seção mestra integra, 137,3MN.m

Figura 7.6 – Variação do valor do momento último em função da redução uniforme de espessura em cada um dos elementos.

No gráfico da Figura 7.6, são apresentados valores obtidos considerando em cada elemento uma redução de espessura constante. Nota-se que existe uma grande redução no valor do momento fletor último da seção quando ocorre uma redução de espessura no convés (elemento 1). As regiões que não tiveram os resultados apresentados na Figura 7.6 apresentam curvas muito semelhantes aos resultados apresentados para os elementos 2, 3 e 4.

A linha pontilhada na Figura 7.6 indica o valor do momento fletor último considerando o fim da sobre-espessura de corrosão (considerando 20% de sobre-espessura). Esse valor é importante, pois é o valor considerado no projeto.

A comparação dos resultados conforme apresentados na Figura 7.6 é importante, pois nela percebe-se, de maneira global, o comportamento da seção mestra da embarcação frente a uma redução de espessura constante nas regiões. Porém, tal análise na maneira como foi apresentada não identifica as regiões mais sensíveis à redução do momento fletor último, pois, como pode ser observado na Figura 7.2, os elementos não são do mesmo tamanho. Exemplificando: uma redução uniforme de espessura no elemento 1 retiraria da seção uma área de material muito maior do que se essa redução fosse aplicada ao elemento 4.

De qualquer forma, pela Figura 7.6, é possível avaliar o comportamento de elementos de área semelhantes, como os elementos 1, 2 e 3. Principalmente em função da distância do convés ao eixo neutro (que nesta aplicação fica localizado apenas alguns centímetros acima do teto do fundo duplo) e também devido ao comportamento não linear, a redução do momento fletor último quando reduzida a espessura desse elemento (convés) é significativamente maior quando comparado aos elementos 2 e 3, que são de tamanho similar mas pouco contribuem na resistência ao momento fletor último.

Conclui-se (pelos resultados apresentados na Figura 7.6) que, mesmo com reduções de até 60% da espessura nos elementos locais de uma forma isolada, pouco se altera o valor do momento último. A exceção é o elemento 1, que representa o convés da embarcação e é capaz de reduzir significativamente a resistência da embarcação ao momento. Para os elementos do convés, aplicando uma redução de espessura que corresponda a 100% da espessura adicional de corrosão (geralmente próximo a 20% da espessura do elemento – Bureau Veritas, Rules for The Classification of Inland Vessels, Part B, 2011), como pode ser observado na Figura 7.6, o valor do momento fletor último reduz apenas 13% do total.

Considerando um caso em que a redução de espessura seja constante em todas as chapas da embarcação, o comportamento correspondente é apresentado pela linha azul clara “Global” na Figura 7.6. Nesse caso extremo, se ocorresse a redução de toda a espessura adicional de corrosão (aproximadamente 20%, 1,58mm), o momento fletor último seria reduzido a 77% do valor obtido para a seção íntegra. Nota-se também que, pelo resultado para a seção completa, o comportamento de redução do momento fletor último da seção em função das reduções de espessura é gradativo, quase linear e desprovido de reduções abruptas.

Na tentativa de realizar uma análise de sensibilidade, onde se avalie de forma independente o tamanho do elemento e o comportamento da estrutura em função da redução de espessura, propõe-se o emprego do índice de não linearidade antes apresentado. Neste caso, o índice leva em conta a variação do momento fletor último não linear com a redução do momento de início do escoamento. Assim, o índice de não linearidade aplicado ao momento é apresentado na equação 7.6, que é uma abrangência da equação 7.1 ao cálculo de momento.

$$I_{nl} = \frac{1 - \frac{Mu_{-e}}{Mu_0}}{1 - \frac{I_{-e}}{I_0}} \quad (7.3)$$

As equações consideram que a posição do eixo neutro da seção se mantém praticamente inalterada antes e depois da aplicação da redução de espessura e resultam na equação 7.3 (que, portanto, desconsidera a variação do eixo neutro).

A partir dos resultados do momento fletor último da seção levantados para a variação do comportamento estrutural de cada elemento (seja de comportamento linear ou não linear) e aplicando os resultados a equação 7.3, montam-se os gráficos apresentados na Figura 7.7.

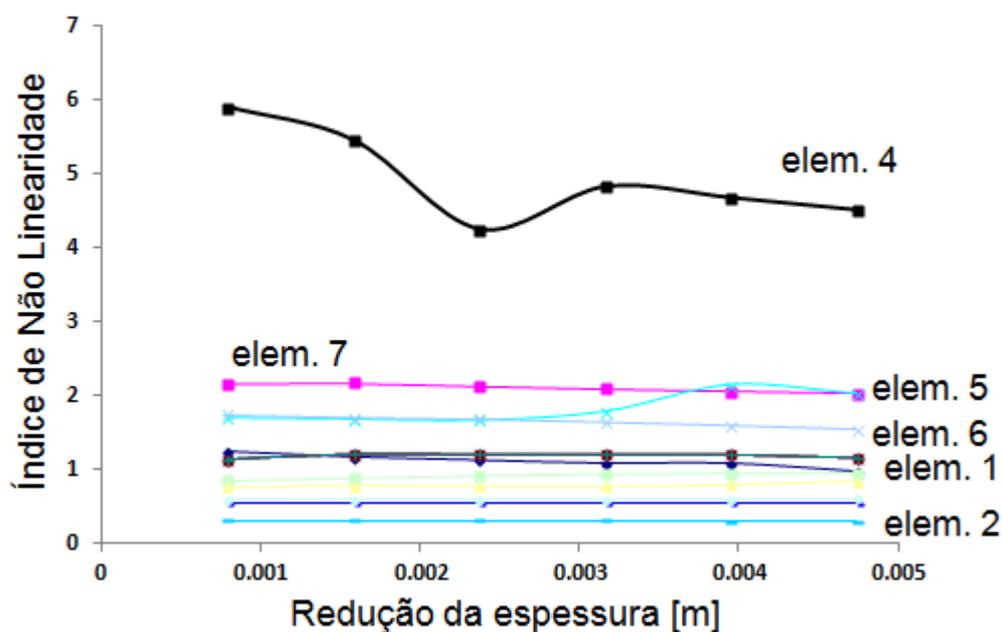


Figura 7.7 – Índice de não linearidade aplicado ao cálculo do momento fletor último da seção mestra.

De forma equivalente ao aplicado para a carga última dos elementos, o índice de não linearidade compara a variação da carga de colapso (neste caso, o momento fletor último) com a variação da propriedade linear (neste caso, momento de inércia da seção). Assim, elementos com índice inferior a um apresentam uma variação do momento fletor último

inferior à variação do momento de inércia linear. Na prática, isso significa que, dado um cenário de corrosão desses elementos, seria conservativo avaliar simplesmente o momento de inércia da seção, o que seria muito mais simples e rápido.

Adicionalmente, de acordo com os resultados apresentados na Figura 7.7, existem elementos com índice superior a um. Caso esses elementos apresentem cenários de corrosão, devem ser aplicadas análises mais complexas para que seja possível avaliar a redução do momento fletor último da seção, pois é esperada uma redução superior à variação da propriedade linear.

De qualquer forma, conforme apresentado na Figura 7.6, a redução do momento fletor último pela redução uniforme de espessura chega a ser insignificante para quase todos os elementos, à exceção do elemento 1, este que representa o convés e se apresenta muito sensível. Portanto, para a aplicação em questão e dado um cenário de corrosão severa ou não, bastaria uma análise complexa que considere o comportamento não linear para a redução de espessura do convés, já que as demais regiões ou são pouco sensíveis para o momento fletor último ou podem ser calculadas (sempre de forma conservativa) por uma análise linear, verificando-se a alteração do momento de inércia da seção.

Como continuação deste trabalho, propõe-se o estudo de outras aplicações para o índice de não linearidade. Ademais, lista-se na Figura 7.8 as regiões com os respectivos índices de não linearidade e a redução do valor do momento último para reduções de espessura de 20% (uma provável espessura adicional de corrosão).

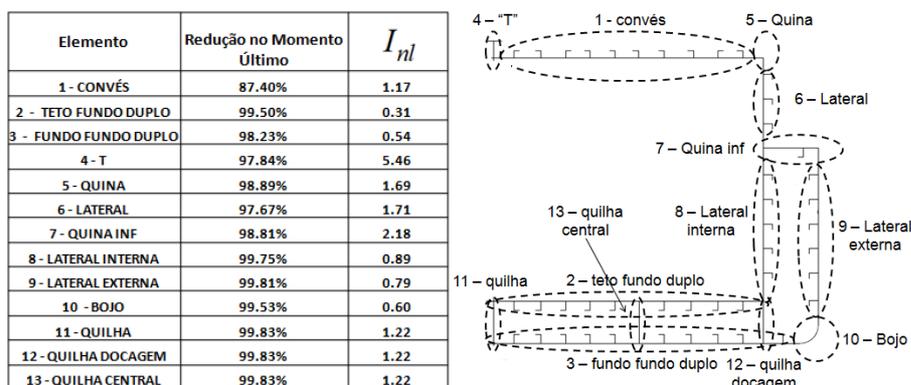


Figura 7.8 – Resultados para redução do momento último e índice de não linearidade para cada elemento local.

Vale ressaltar que tanto o índice de não linearidade quanto a redução do momento fletor em função da perda de espessura em cada região são baseados na aplicação do momento longitudinal de tosamento. Acredita-se que esse seja o cenário mais crítico possível numa embarcação típica da Bacia do Sudeste, como já foi demonstrado na Figura 5.8 e na discussão a respeito das solicitações.

Na prática, a aplicação desse índice para o cálculo do momento fletor último da embarcação é interessante no seguinte aspecto: uma vez mapeado o valor do índice de não linearidade isoladamente para cada região do casco (Figura 7.8), seria possível (conhecendo o valor do índice para cada região) inferir se uma análise linear da seção será uma aproximação adequada ou não. Por exemplo, caso seja detectada uma redução de espessura em uma região cujo índice de não linearidade seja igual a 1 e conhecendo-se o valor do índice, sabe-se que, para essa região, o momento fletor último reduzirá em igual percentual a propriedade linear da seção (quer seja esta a área, no caso da análise ser local, quer seja o momento de inércia, no caso da avaliação ser global). Assim, evita-se a necessidade de realizar uma análise não linear de toda a seção para se avaliar o dano.

## 8 CONCLUSÕES

Com base no exposto neste trabalho, conclui-se que:

É aceitável a aplicação de métodos simples como o Método da Resistência Direta (M\_RD) para o cálculo do momento fletor último de embarcações, baseado no fato de que, para todas as aplicações deste trabalho, esse método apresentou respostas coerentes quando comparado aos outros métodos empregados.

O Método da Largura Efetiva (M\_LEF1 e M\_LEF2), apesar de apresentar bons resultados para aplicações convencionais, não se mostrou adequado à aplicação naval, demandando uma série de adaptações e se mostrando muito trabalhoso para estruturas enrijecidas.

Os métodos propostos pelo CSR [IACS 2008] apresentaram bons resultados quando aplicados a estruturas navais, tanto para as duas versões do método direto (M\_CSR1 e M\_CSR2) quanto no caso do método iterativo (M\_ITER). Vale destacar a qualidade inferior da resposta do método M\_CSR2, porém, tal método é muito simples e de fácil aplicação, e é o mais indicado para análises preliminares.

Através da modificação do método iterativo proposto pela IACS, foi possível melhorar a resposta do método original, tendo como comparação o valor obtido pelo método M\_FEM. Tal método apresentou resultados coerentes, tanto em relação ao momento quanto em relação à rotação da seção (Figura 6.10).

Aplicando o método modificado a partir do método iterativo proposto pela IACS, foi verificado que, no caso da aplicação (GUARITA), quando aplicadas reduções de até 20% da espessura nominal de forma uniforme em todas as chapas da estrutura (equivalente à sobre-espessura de corrosão), o valor do momento fletor último se reduz em aproximadamente 23% com respeito ao momento fletor último da estrutura sem dano, como se observa na Figura 7.6.

Ainda a respeito do estudo de caso GUARITA, verificou-se que, quando aplicadas reduções de espessura localizadas nas regiões da Figura 7.8, apenas a região do convés (elemento 1) apresenta reduções significativas no valor do momento fletor último (Figura 7.6).

O índice de não linearidade proposto neste trabalho apresentou comportamento coerente, sendo aplicado com sucesso para identificar as regiões da seção mestra da embarcação NT Guarita que apresentam comportamento não linear mais acentuado.

Como sugestão de continuação deste trabalho, se propõe o uso da metodologia da matriz dimensional. O objetivo em aplicar-se tal método seria encontrar uma forma de representar-se em um só índice o comportamento global do elemento local e o índice de não linearidade do mesmo.

## 9 Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio – Procedimento**. NBR 14762. 2001.

Andric, J.; Zanic, V. The global structural response model for multi-deck ships in concept design phase. **Ocean Engineering** **37** pp. 688–704, 2010.

ANSYS, INC. Em: <http://www.ansys.com/>. 2007.

Bathe, K. J., 1996. “**Finite Element Procedures**”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Billingsley, D. W., Hull girder response to extreme bending moments, 5th STAR Symposium, **SNAME**, 51-63. 1980

Bureau Veritas – **Rules for The Classification of Inland Vessels** – Part B – 2011

Caldwell. J. B. 1965, Ultimate longitudinal strength. **RINA** **107**, 411-430.

Camotim, D.; Reis, A. **Estabilidade Estrutural**, McGraw-Hill, 2000.

Cheung, Y. K., Tham, L. G., **The Finite Strip Method**. Oxford: CRC Press. 416p, 1988.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, University of Wisconsin – Madison, John Wiley & Sons, Nova Iorque. 1974.

Crisfield, M.A., A Fast Incremental-Iterative Solution Procedure that Handles Snap-Through, **Computer & Structures**, v. 13, p. 55-62, 1981.

Crisfield, M.A., An Arc Length Method Including Line Searches and Accelerations, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 19, p. 1269-89, 1983.

Dow, R. S., Hwill, R. C., Clarke, J. D., AND Smith, C. S., Evaluation of ultimate ship hull strength. In Proceedings, **Extreme Loads Response Symposium**, **SNAME**, 133-147. 1981

Fairbairn, W., **Iron Ship Building: History and progress**. London, Longmans, Green, and co., 1865.

Faulkner, D., A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression, **Journal of Ship Research** **19**, 1, 1-17, 1975

Ferreira Franklin ; Gomes, Herbert ; Iturrioz, I., Evaluating the fatigue life in tank ship. **Tenth Pan American Congress in Applied Mechanics (PACAM X)**, 2008.

Gordo, J. M., Guedes Soares, C., Faulkner, D., Approximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder, **Journal of Ship Research**, Vol. 40, 1996.

Grigoletti, G. C; Iturrioz, I., Pravia, Z. M. C. **Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio pelo Método da Resistência Direta. Construção Metálica - Estudos e Pesquisas Recentes**. Editora Universidade de Passo Fundo, p. 67-99, 2005.

Hancock, G. J.; Murray, T. M.; Ellifritt, D. S., **Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification**, Macel Dekker, 2001

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

Kitarovic, S.; Andric, J.; Zanic, V. Extended IACS incremental-iterative method for calculation of hull girder ultimate strength in analysis and design. International workshop - **Advanced Ship Design for Pollution Prevention**, 2009.

Kuo, H.; Chang, J. A., simplified approach to estimate the ultimate longitudinal strength of ship hull. **Journal of Marine Science and Technology**, Vol. 11, No. 3, pp. 130-148, 2003.

Kutt, L. M., Piaszczykc, M., Chen, Y. K., Lin, D., Evaluation of the longitudinal ultimate strength of various ship hull configurations, **SNAME**, 93, 33-53. 1985.

Nishihara, S. Analysis of Ultimate Strength of Stiffened Rectangular Plate-on the Ultimate Bending Moment of Ship Hull Girder. **J. Soc. Naval Architects Japan**, Vol. 154, pp. 367-375. 1983.

Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., Okada, T., **Design of Ship Hull Structures**, Springer 2009.

Paik, J. K. Ultimate limit state performance of oil tanker structures designed by IACS common structural rules. **Thin-Walled Structures** vol.45 pp. 1022–1034. 2007.

Rutherford, S. E., Caldwell, J. B., Ultimate longitudinal strength of ships: a case study. **SNAME**, 98, 441-471. 1990.

Schafer, B. W. **Cold-formed steel behavior and design: analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners**. Ph.D. dissertation. Cornell University, Ithaca. 1997.

Schafer, B.W. Design Manual for Direct Strength Method of Cold-Formed Steel Design. **Draft for American and Iron Steel Institute – Committee on Specifications**, 2002

Schafer, B. W. **CUFSM 2.5 - Users Manual and Tutorials**. 2001. Disponível em [www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm](http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm) Acesso em: jul. 2011.

Smith, C. S. MD Dow, R. S., Ultimate Strength of a Ship's Hull under Biaxial Bending, **ARE TR86204**, ARE, Dunfermline, Scotland. 1986.

Søreide, T. H., Bergan, P. G., Moan, T. **Ultimate collapse behaviour of stiffened plates using alternative finite element formulations**, **Steel Plated Structures**, Crosby Lockwood Staples Ed., London, 1976.

Von Kármán, T.; Secheler, E. E.; Donnell, L. H., 1932. The Strength of Thin Plates in Compression, Transactions, **ASME**, v. 54, p. 54-5.

Yu, W. W. **Cold-Formed Steel Design**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons. 756p), 2000.

Toldo, E.E.; Almeida, L.E.S.B.; Stalliviere Corrêa, I.C.; Rigelo Ferreira, E.; Sambaqui Gruber, N.L. Wave Prediction Along Lagoa Dos Patos Coastline, Southern Brazil, **Atlântica**, Rio Grande, 28(2): 87-95, 96 2006.

Zienkiewicz, O. C. **The Finite Element Method**, McGraw-Hill Company, Londres. 1977.

## APÊNDICE A

Neste apêndice, apresentam-se os detalhes da aplicação do método da largura efetiva (M\_LEF1) nos modelos locais, da mesa e da alma do perfil CAIXÃO.

### 1 - Análise não linear, modelo local, mesa

O modelo independente da mesa foi construído com elementos de casca de quatro nós (SHELL 181) e submetido a uma análise não linear físico geométrica. As condições de contorno do modelo podem ser observadas tendo como base a Figura A.1. As linhas 1,2,3 e 4 foram simplesmente apoiadas na direção do eixo z, já sobre as linhas 3 e 4 foi imposto deslocamento prescrito na direção y com o intuito de criar compressão na placa. O resultado foi considerado satisfatório com uma malha de 4032 elementos.

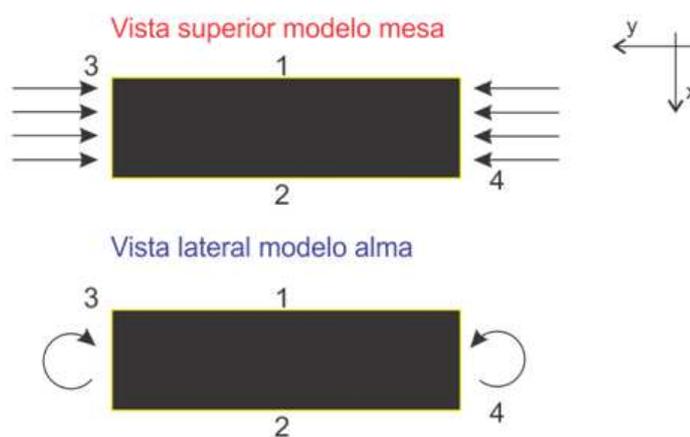


Figura A.1 - Modelos locais.

As Figuras A.2 (a) e (b) apresentam o resultado da análise não linear realizada no software de elementos finitos, enquanto a Figura A.3 (b) mostra a deformada e as tensões de Von Mises na condição de carga de colapso. Fica evidente o comportamento não linear adotado pela estrutura ao atingir-se a carga crítica referente ao primeiro modo de flambagem representado na Figura A.3 (a) (a linha pontilhada representa o que seria a resposta linear e o ponto de separação da linha contínua e da linha pontilhada marca o ponto de bifurcação da estrutura). Aos resultados obtidos através da análise em elementos finitos na condição de

colapso é aplicado o método da largura efetiva. Assume-se como ponto de colapso da estrutura o ponto no qual é possível imprimir-se deslocamento sem que ocorra acréscimo nas reações.

Existe, neste caso, uma peculiaridade na aplicação do método da largura efetiva, devido à baixa esbelteza da estrutura em questão. Normalmente, esse método considera que na situação de colapso nas bordas da seção será atingida a tensão de escoamento do material. No caso desta aplicação, o colapso ocorre sem que ocorra plastificação nas bordas, assim, uma sugestão deste trabalho é que a largura efetiva seja calculada igualando a área sob a curva de tensão com dois retângulos de altura igual à tensão de escoamento do material, conforme Figura A.2 (a), já que esta será utilizada como critério de falha na aplicação do método.

A Figura A.2 (b) mostra também a distribuição de tensões que ocorre na mesa no momento do colapso. É possível observar que ocorre a redistribuição de esforços do meio para as laterais devido à presença das bolhas de flambagem.

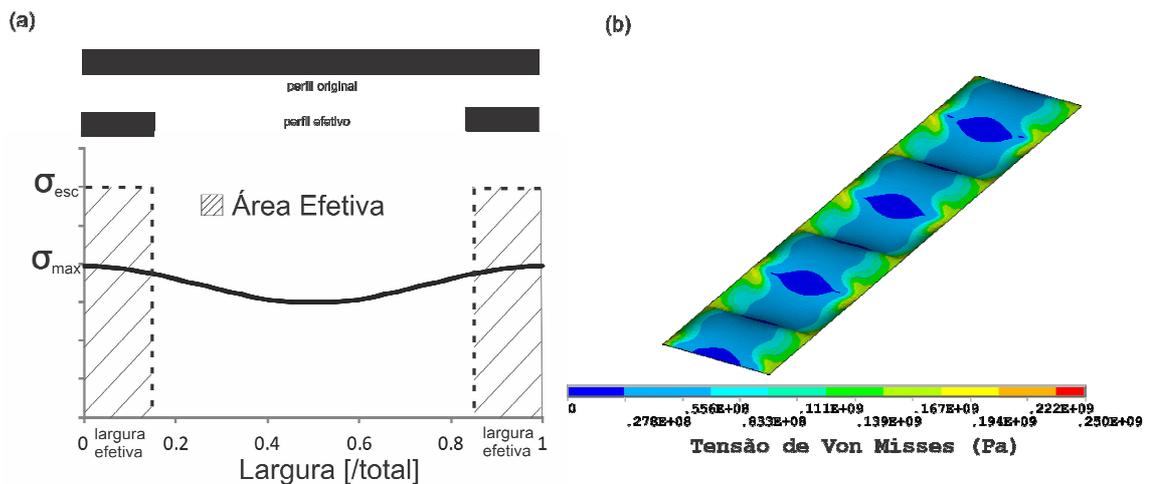


Figura A.2 – Modelo mesa (a) Perfil de tensões e largura efetiva;  
(b) Deformada na condição de carga máxima.

## 2 - Análise não linear modelo local alma

O modelo local da alma foi elaborado com o mesmo elemento de casca utilizado no modelo local da mesa, porém, neste caso, foi aplicada flexão às linhas 3 e 4 (Figura A.1). Para a aplicação da flexão, foi utilizado o conceito de MPC “Multi-Point Constraints” para os

deslocamentos no eixo y local das linhas. Ainda como condição de contorno, as linhas 1, 2, 3 e 4 estão simplesmente apoiadas na direção do eixo z (Figura 1). O resultado foi considerado satisfatório com uma malha de 1025 elementos.

O resultado da análise não linear é apresentado na Figura A.3 (b), e mostra claramente o comportamento de carga de colapso quando, mesmo com uma sensível redução do momento aplicado, ocorre um grande aumento na rotação nas linhas 3 e 4. A Figura A.4 (a) mostra a deformada e as tensões de Von Mises para a carga de colapso.

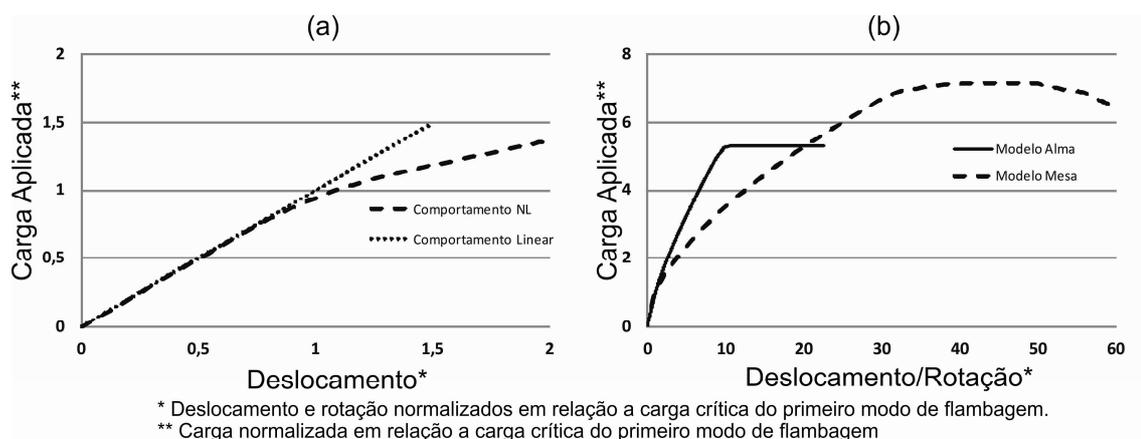


Figura A.3 – (a) Início do comportamento não linear do modelo mesa quando atingida a carga de flambagem (b) Comportamento global dos modelos locais da mesa e da alma.

Os resultados obtidos na análise não linear servem de base para a aplicação do método da largura efetiva para o cálculo da área efetiva da seção. A aplicação do método da largura efetiva apresenta duas peculiaridades que diferem da aplicação convencional. Uma delas diz respeito ao nível de tensões atingidas: no método da largura efetiva tradicional, a peça atinge a tensão de escoamento nas bordas, mas nesta aplicação não, a solução se dá de forma análoga à proposta para o modelo da mesa em compressão. Outra diferença em relação à aplicação tradicional é o fato de que a seção está sujeita a flexão. A Figura A.4 (b) apresenta uma sugestão de abordagem para o cálculo da largura efetiva com base na distribuição de tensões ao longo de uma linha transversal da estrutura, apresentada como “Corte AA”.

Consideram-se como efetivas as áreas que permanecem tracionadas na condição de carga máxima e também a área  $A2_{eff}$  (que deve ser igual à área A2, Figura A.4 (b)). Analisando a

distribuição de tensões na condição de carga máxima na Figura A.4 (b), percebe-se um deslocamento do eixo neutro em relação à posição original. Isso ocorre devido à redução da rigidez da parte comprimida da seção.

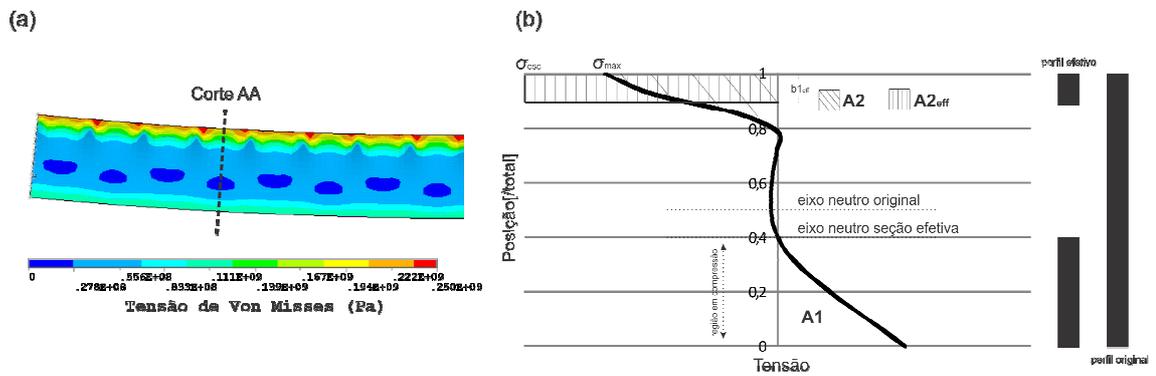


Figura A.4 – Modelo Alma; (a) Deformada e tensões de Von Mises na carga de máxima (b) Aplicação da largura efetiva no perfil de tensões Corte AA.

## APÊNDICE B

Neste apêndice, é apresentado um glossário dos principais termos navais utilizados no corpo deste trabalho. Uma obra mais completa a respeito é apresentada pela Sociedade Brasileira de Engenharia Naval em seu site oficial. A Figura B.1 é apresentada a seguir e ilustra a nomenclatura.

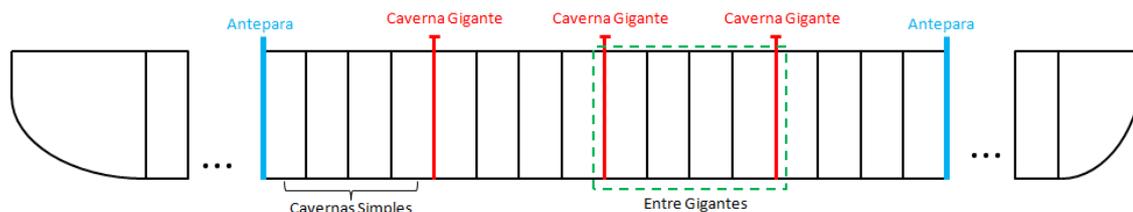


Figura B.1 – Apresentação esquemática estrutural do navio.

**Caverna:** entidade de posição longitudinal que serve de referência para qualquer embarcação. Identificada apenas por números inteiros, normalmente adota o valor ZERO na madre do leme ou na perpendicular de ré (quando não possui leme), tendo valores positivos para vante e negativos para ré (quando possui). É comum a utilização de um espaçamento de 600mm entre uma caverna e outra, principalmente na navegação interior.

**Caverna simples:** à seção transversal menos estruturada é dado o nome de caverna simples. Normalmente, a caverna simples se repete três ou quatro vezes entre seções mais reforçadas, chamadas de cavernas gigantes ou anteparas, podendo haver mais de um tipo de caverna simples com diferenças de pequenos detalhes entre elas.

**Caverna gigante:** seção transversal mais reforçada, possuindo elementos no fundo (hastilhas, prumos, etc.) e no costado (sejam eles duplos ou não) inteiros e não estanques. Normalmente existem cavernas simples entre cavernas gigantes, e a seção transversal mais rígida de uma caverna gigante será uma antepara, que deve aparecer após três ou quatro cavernas gigantes, normalmente.

**Antepara:** Terminologia utilizada na área naval para definição de uma "parede". No caso das seções transversais de uma embarcação é a seção mais rígida, além de estanque, pois divide tanques (sejam eles de carga ou de lastro) ou compartimentos. Por conferir rigidez e estanqueidade, normalmente possui maior espessura e tem uma seção transversal preenchida por chapa e reforços.

**Tanque de lastro:** tanques no fundo e ou costados duplos da embarcação, limitados por anteparas estanques que servem para ajustar calado e ou completar situações especiais de carregamento.

**Tanques de carga:** tanques para carregamento de carga, normalmente divididos transversal e longitudinalmente por anteparas longitudinais e transversais, respectivamente. Em embarcações de produtos perigosos, petroquímicos ou derivados de petróleo, normalmente são protegidos externamente por fundo e costado duplos. Nas partes a ré e à vante, normalmente existem espaços vazios (cofferdams) que separam a zona de carga de outras regiões.

**Entregigantes:** terminologia utilizada para modelar numericamente a região entre cavernas gigantes, constituída basicamente de chapas e perfis longitudinais.