



SIMULAÇÃO DO COLAPSO PROGRESSIVO DA SEÇÃO MESTRA DE UM
NAVIO MILITAR DEVIDO À FLEXÃO LONGITUDINAL

Jeferson Ferreira de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino

Rio de Janeiro
Setembro de 2017

SIMULAÇÃO DO COLAPSO PROGRESSIVO DA SEÇÃO MESTRA DE UM
NAVIO MILITAR DEVIDO À FLEXÃO LONGITUDINAL

Jeferson Ferreira de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2017

Oliveira, Jeferson Ferreira de

Simulação do colapso progressivo da seção mestra de um navio militar devido à flexão longitudinal/ Jeferson Ferreira de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVIII, 88 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Julio Cesar Ramalho Cyrino

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 79-81.

1. Navio militar. 2. Seção Mestra. 3. Momento último.
I. Cyrino, Julio Cesar Ramalho. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

À minha fiel amiga, companheira e
esposa Lilian Xavier por seu amor e
carinho, aos meus filhos Daniel e Davi
pelo apoio e compreensão e aos meus pais
João Ferreira e Maria das Neves (*in*
memória) pelo caminho que
incansavelmente me ensinaram a trilhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que me fortaleceu, me deu vida, saúde e sabedoria para concluir este trabalho.

Ao Professor Julio Cesar Ramalho Cyrino pela sua valiosa orientação, compreensão e principalmente por sua amizade que fez mais agradável o desenvolvimento do presente trabalho. Ao meu caro amigo DSc. Jorge Luís Martinez Fernandez que mesmo muito ocupado com sua pesquisa dispôs seu tempo a me dirimir muitas dúvidas.

E em fim, ao Centro de Projetos de Navios, personificado no Capitão de Fragata (EN) Yuri, no Capitão-Tenente (EN) Washington e no Capitão-Tenente (EN) Jonathan dentre outros, que em muito me ajudaram e apoiaram na conclusão deste trabalho, principalmente o Capitão-Tenente (EN) Jonathan que não poupou esforços para me auxiliar na reta final desta dissertação.

Alguns confiam nos seus carros de guerra, e outros, nos seus cavalos, mas nós confiamos no poder do Senhor, nosso Deus.

Eles tropeçarão e cairão, mas nós levantaremos e ficaremos firmes.

Salmos 20:7 e 8 (NTLH)

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO DO COLAPSO PROGRESSIVO DA SEÇÃO MESTRA DE UM NAVIO MILITAR DEVIDO À FLEXÃO LONGITUDINAL

Jeferson Ferreira de Oliveira

Setembro/2017

Orientador: Julio Cesar Ramalho Cyrino

Programa: Engenharia Oceânica

A imprescindibilidade de salvaguardar os direitos e exercer os deveres do Brasil no mar, na plataforma continental e sua extensão (Amazônia Azul), gera a necessidade do projeto e obtenção de plataformas de combate eficientes e confiáveis os quais estão descritos na Estratégia Nacional de Defesa (END). Objetivando a eficiência estrutural este trabalho analisou o colapso progressivo da seção mestra de um navio militar devida à flexão longitudinal projetado por norma. Após a validação das condições de contorno e da análise da seção mestra obteve-se as diferenças percentuais entre os momentos últimos, tosamento e aquebramento, calculados pela norma e os resultantes da simulação por elementos finitos. Obteve-se, também, as diferenças percentuais entre as tensões últimas de flambagem dos diversos escantilhões e as obtidas na flambagem dos perfis e chapas. Os resultados foram 18% e 23% de diferenças em tosamento e aquebramento, respectivamente. A diferença global média entre as tensões últimas encontradas e as previstas por norma foi de 44%.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROGRESSIVE COLLAPSE SIMULATION OF THE MIDSHIP SECTION OF A
MILITARY SHIP DUE TO LONGITUDINAL BENDING

Jeferson Ferreira de Oliveira

September/2017

Advisor: Julio Cesar Ramalho Cyrino

Department: Ocean Engineering

The necessity of safeguarding the rights and exercising Brazil's obligations at sea, on the continental shelf and its extension (Blue Amazon), generates the need to design and obtain efficient and reliable combat platforms, which are described in the National Defense Strategy (NDS). Aiming at structural efficiency, this work analyzed the progressive collapse of the midship of a military vessel due to longitudinal bending designed by standard. After the validation of the boundary conditions and the analysis of the midship section, we obtained the percentage differences between the last moments, sagging and hogging, calculated by the norm and those resulting from the simulation by finite elements. The percentage differences between the last buckling stress of the different stiffness and those obtained in the buckling of the profiles and plates were also obtained. The results were 18% and 23% of differences in sagging and hogging, respectively. The overall average difference between the critical stress encountered and the standard stress was 44%.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	5
1.2. Objetivo	7
1.3. Estrutura do trabalho.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. Estrutura do navio	10
2.2. Painéis enrijecidos	10
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS	25
3.1. Carregamentos Verticais.....	25
3.2. Análise das cargas atuantes sobre um navio.....	26
4. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	30
4.1. Malha dos modelos	31
5. VALIDAÇÃO NUMÉRICA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	32
5.1. Material considerado na validação.....	34
5.2. Malha de validação	34
5.3. Imperfeições geométricas do modelo de validação	35
5.4. Condições de contorno.....	38
5.5. Modelo para validação e resultados.....	39
5.5.1. Resultados da validação e discussão	39
6. ANÁLISE E RESULTADOS	42
6.1. Metodologia.....	48
6.2. Caracterização do Material considerado no modelo.....	49
6.3. Estudo de convergência de malha do modelo.....	53
6.3.1. Convergência de malha	53

6.3.2. Malha do modelo simulado	55
6.4. Imperfeições geométricas	59
6.5. Condições de contorno e carregamentos.....	60
6.6. Solução.....	62
6.7. Resultados	64
6.8. Discussão dos resultados e comparação	72
7. CONCLUSÃO	76
7.1. Trabalhos futuros.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÊNDICE - A	82
APÊNDICE - B	83
APÊNDICE - C	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Amazônia Azul, área de exploração do Pré Sal. Fonte: Geopolítica do Petróleo e Wikimedia	2
Figura 1-2 - Concepção artística de CV-03 Tamandaré. Fonte: Centro de Projetos de Navio	5
Figura 1-3 - Corveta V32 patrulhando próximo a uma plataforma em águas territoriais brasileiras.....	6
Figura 1-4 - Exemplo de seção mestra de navio militar tipo escolta.....	8
Figura 2-1 Estrutura retangular de um navio, tipo grelha. FONSECA (1989).....	10
Figura 2-2 – A imagem da direita (b) mostra um chapeamento estruturado na forma de grelha e a da esquerda (a), tensões de membrana atuando no chapeamento do navio. BRITTO (2004).....	11
Figura 2-3 - (a) Deflexão inicial da placa: (i) Antes da ação da pressão lateral e (ii) sofrendo a ação da pressão (ampliado 30 vezes). (b) Placa sofrendo deformação predominantemente de compressão transversal: (i) Antes da ação da pressão lateral e (ii) sofrendo a ação da pressão (ampliado 30 vezes). PAIK <i>et al</i> (2007a)	14
Figura 2-4 - A esquerda mostra o gráfico representativo da variação da deflexão com as bordas restritas e no regime elástico. A direita mostra, com ampliação de 10 vezes, a distribuição de tensão von Mises no estado limite sob compressão biaxial ($\sigma_x : \sigma_y = 0,8: 0,2$) e pressão lateral ($p = 0,16$ MPa), placa simplesmente apoiada. PAIK <i>et al</i> (2007a)	15
Figura 2-5 - A direita painel enrijecido idealizado e a esquerda modelo de elementos finitos não-linear alvo da análise. PAIK <i>et al</i> (2007b).....	16
Figura 2-6 - Forma da distorção inicial do painel enrijecedor do fundo, amplificação em 10 vezes: (a) sob compressão, predominantemente longitudinal (com $m = 5$) antes da carga de pressão lateral, (b) sob compressão, predominantemente longitudinal, após o	

carregamento da carga de pressão lateral, (c) sob compressão, predominantemente, transversal ($m = 1$) antes da carga de pressão lateral e (d) sob compressão, predominantemente longitudinal, após o carregamento da carga de pressão lateral PAIK <i>et al</i> (2007b)	16
Figura 2-7 - A esquerda corte transversal da seção mestra do AFRAMAX com o convés e o fundo marcados e a direita a mesma seção mestra modelada no ANSYS. PAIK <i>et al</i> (2007c).....	17
Figura 2-8 - A esquerda mostra o corte transversal da seção mestra do AFRAMAX deformada após a simulação do colapso progressivo e a direita a mesma seção mestra mostrando as tensões equivalentes de von Mises. PAIK <i>et al</i> (2007c).....	18
Figura 2-9 - Gráfico representativo da simulação nos diversos programas do colapso progressivo da seção mestra do AFRAMAX, mostra a curva de crescimento do momento em relação à curvatura do casco, tanto em tosamento quanto em alquebramento. PAIK <i>et al</i> (2007c).....	19
Figura 2-10 - Modelo em elementos finitos estudados. VAN-VU (2015)	20
Figura 2-11 - A figura mostra as condições de contorno imposta nos pontos remotos. VAN-VU (2015).....	20
Figura 2-12 - Deflexões iniciais na placa e nos reforçadores. VAN-VU (2015)	21
Figura 2-13 - Modelo em MEF da experiência de Nishihara (MST-3). VAN-VU (2015)	22
Figura 2-14 - Resultados das simulações dos modelos de Nishihara, a esquerda MST-3 e tabela superior, a direita MSD e tabela inferior. VAN-VU (2015)	23
Figura 2-15 - Modelo em MEF da experiência de Dow. VAN-VU (2015)	24
Figura 2-16 - Resultado da análise do modelo de Dow em MEF, na condição de tosamento. VAN-VU (2015)	24

Figura 3-1 - Carregamentos atuantes no casco de um navio. RAWSON, TUPPER (2001)	25
Figura 3-2 - Navio em águas tranquilas. RAWSON, TUPPER (2001).....	25
Figura 3-3 - Navio em tosamento do casco devido à influência da onda. RAWSON, TUPPER (2001).....	26
Figura 3-4 - Navio em alquebramento do casco devido à influência da onda. RAWSON, TUPPER (2001).....	26
Figura 3-5 - Resumo gráfico da flexão da viga navio. HUGHES, PAIK (2010)	28
Figura 3-6 - Tensões primária, secundária e terciária.	29
Figura 4-1 - Elemento SHELL181. Fonte: ANSYS.	31
Figura 5-1 - Seção reta da viga caixão, MST-3, construída e experimentada por Nishihara. NISHIHARA (1983).....	32
Figura 5-2 - Experimento de Nishihara. NISHIHARA (1983)	33
Figura 5-3 - Resultados obtidos por Nishihara. NISHIHARA (1983)	33
Figura 5-4 - Material elástico-perfeitamente plástico.....	34
Figura 5-5 - Deslocamentos aplicados no modelo de validação para o <i>Linear Buckling</i>	35
Figura 5-6 - 1º modo de flambagem natural, aumentado em 54 vezes.	36
Figura 5-7 - Máxima amplitude recomendada. DNV (2010)	37
Figura 5-8 - Comando UPGEOM.....	37
Figura 5-9 - À esquerda a figura mostra as condições de contorno, à direita, mostra os pontos remotos e os acoplamentos rígidos.	38
Figura 5-10 – Gráfico comparativo entre o resultado de Van-Vu e a caixa simulada ...	40

Figura 6-1 - Topologia do modelo de navio militar idealizado.....	43
Figura 6-2 - À esquerda tem-se o perfil bulbo que foi substituído pela chapa face no modelo analisado.	44
Figura 6-3 - À esquerda seção mestra do navio idealizado e, à direita, o simulado.....	44
Figura 6-4 - Tipos de modelo para análise progressiva do colapso do casco pelo não-linear. HUGHES, PAIK (2010).....	47
Figura 6-5 – Fluxograma metodológico	48
Figura 6-6 - Curva Tensão X Deformação de engenharia e verdadeira	51
Figura 6-7 - Curva Tensão Verdadeira x Deformação Plástica, curva inserida no ANSYS como característica do material.	51
Figura 6-8 - Modelo da placa enrijecida.....	54
Figura 6-9 - condições de contorno da placa enrijecida	54
Figura 6-10 - Análise de convergência.....	55
Figura 6-11 - Malha da seção mestra	56
Figura 6-12 - Malha dos conveses	56
Figura 6-13 - Malha do convés e dos perfis	57
Figura 6-14 - Malha do fundo e de seus perfis	57
Figura 6-15 - Estatística de malha	58
Figura 6-16 - Nós de referência na seção mestra.....	61
Figura 6-17 -À esquerda, curva com "snap through", estrutura estaticamente instável e à direita mostra uma ideia como método dos Arcos. Fonte: ANSYS	62
Figura 6-18 - Iterações do Método Newton Raphson. Fonte: ANSYS	63

Figura 6-19 - Momento Curvatura	64
Figura 6-20 - Seção mestra colapsada em tosamento.....	66
Figura 6-21 - Seção mestra colapsada em aquebramento	66
Figura 6-22 - Representação do colapso progressivo no navio.....	69
Figura 6-23 - Representação do colapso da estrutura em tosamento	71
Figura 6-24 - Representação do colapso da estrutura em aquebramento	71
Figura 6-25 - Gráfico representativo da variação do momento pela curvatura do modelo simulado comparado com os limites da Norma (linhas horizontais).....	72
Figura A-1 - Esquema da simulação da validação	82
Figura B-1 - Modo natural de flambagem 02.....	83
Figura B-2 - Modo natural de flambagem 09	83
Figura B-3 - Modo natural de flambagem 10.....	83
Figura B-4 - Modo natural de flambagem 13.....	83
Figura B-5 - Modo natural de flambagem 17	84
Figura B-6 - Modo natural de flambagem 20.....	84
Figura B-7 - Modo natural de flambagem 21	84
Figura B-8 - Modo natural de flambagem 159.....	84
Figura B-9 - Modo natural de flambagem 173	85
Figura B-10 - Modo natural de flambagem 190.....	85
Figura B-11 - Modo natural de flambagem 219.....	85
Figura B-12 - Modo natural de flambagem 258.....	85

Figura C-1 - Malha de 10mm	86
Figura C-2 - Malha de 20mm	86
Figura C-3 - Malha de 30mm	86
Figura C-4 - Malha de 40mm	87
Figura C-5 - Malha de 50mm	87
Figura C-6 - Malha de 60mm	87
Figura C-7 - Malha de 70mm	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Dimensões da CV Tamandaré. Fonte: Centro de Projetos de Navio.....	5
Tabela 2-1 - Dimensões do navio usado como referência no estudo. PAIK <i>et al</i> (2007)	13
Tabela 6-1 – Propriedades do material usado no modelo de Nishihara	34
Tabela 6-2 – Quantidade de nós e elementos no modelo de validação	35
Tabela 6-3 - Tabela comparativa do resultado obtido com a literatura referência	40
Tabela 7-1 - Dimensões Principais do modelo idealizado.	42
Tabela 7-2 - Tabela comparativa dos módulos de rigidez.....	45
Tabela 7-3 - Propriedades mecânicas do material do navio. Fonte: CPN.....	49
Tabela 7-4 - Propriedades mecânicas do material do navio. SHI (2014).....	52
Tabela 7-5 - Quantidade, qualidade e razão de aspecto dos elementos.....	59
Tabela 7-6 - Condições de contorno aplicados às extremidades do modelo.....	60
Tabela 7-7 - Rotações aplicada nos nós A e B	61
Tabela 6-8 - Tensão de von Mises em locais principais no colapso em tosamento	67
Tabela 6-9 - Tensão de von Mises em locais principais no colapso em alquebramento	68
Tabela 6-10 - Sequência de colapso obtido da seção mestra.....	70
Tabela 6-11 - Tabela representativa dos valores preconizado pela norma como tensão crítica de flambagem do chapeamento	73
Tabela 6-12 - Tabela representativa dos valores preconizado pela norma como tensão crítica de flambagem dos perfis leves e pesados	73

Tabela 6-13 - Tabela comparativa dos valores obtidos de tensão crítica de flambagem em tosamento com os obtidos através da norma e do <i>Leonard Hull</i>	74
Tabela 6-14 - Tabela comparativa dos valores obtidos de tensão crítica de flambagem em alquebramento com os obtidos através da norma e do <i>Leonard Hull</i>	75

1. INTRODUÇÃO

Em 1982, foi realizada a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM)¹, cujas resoluções foram ratificadas pelo Brasil. Esta Convenção nas partes V e VI, determina os direitos e deveres do estado costeiro sobre a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e a Plataforma Continental (PC). A CNUDM afirma que todos os bens econômicos vivos ou não vivos, existentes sobre o leito do mar e no subsolo marinho, compreendido numa faixa de 200 milhas náuticas, ZEE, ou até 350 milhas, PC, a partir da linha da costa, é de propriedade exclusiva do país ribeirinho.

Na extensa costa brasileira, a ZEE brasileira, cujo limite exterior é de 200 milhas náuticas, tem uma área oceânica aproximada de 3,54 milhões de km². A área em questão, somada, em algumas regiões ao longo do litoral, a PC ultrapassa a distância de 200 milhas da linha de costa. Toda esta grande área marítima, ZEE mais a PC, foi chamada de Amazônia Azul, Figura 1-1. Medindo aproximadamente 4,5 milhões de Km², esta área acrescenta ao Brasil 52% de toda a sua extensão territorial.

Observa-se que mais de 95% do comércio exterior brasileiro e mais de 80% da produção de petróleo nacional, Figura 1-1, ocorrem nesta área, além disto, ainda temos a pesca, o turismo, a navegação de cabotagem, os esportes náuticos, e brevemente a obtenção de energia e exploração de minério do leito marinho que são outras potencialidades da Amazônia Azul.

¹ Concluída em 10 de dezembro de 1982, em *Montego Bay*, Jamaica, é resultante de um esforço continuado de negociação da comunidade internacional a fim de equacionar, sob um espírito de compreensão, cooperação e concordância mútuas, as questões relativas ao Direito do Mar.

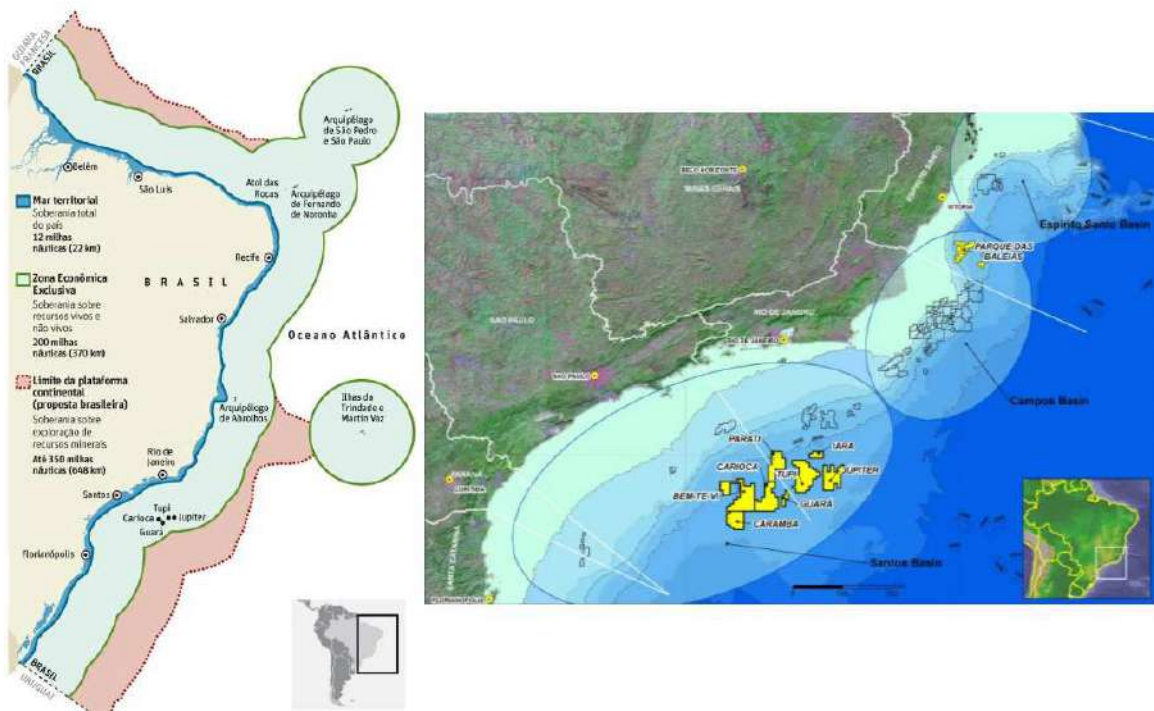


Figura 1-1 - Amazônia Azul, área de exploração do Pré Sal. Fonte: Geopolítica do Petróleo² e Wikimedia³

Para proteger a Amazônia Azul e suas riquezas o Governo Brasileiro através da Estratégia Nacional de Defesa (END) e reforçado no Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN), ambos de 2012, consolida o entendimento do Ministério da Defesa e das Forças Armadas, acerca de sua formulação da estratégia de Defesa. Ambos os documentos mostram como prioritária a remodelagem da Marinha e da defesa marítima. A END explicita notória relevância do controle, monitoramento, dissuasão, mobilidade e presença, estes observados nas diretrizes primeira, segunda, terceira, quarta e nona, clara e diretamente ligados à Marinha:

1. Dissuadir a concentração de forças hostis nas fronteiras terrestres, nos limites das águas jurisdicionais brasileiras, e impedir-lhes o uso do espaço aéreo nacional.
2. Organizar as Forças Armadas sob a égide do trinômio monitoramento/controle, mobilidade e presença.

² Disponível em: <https://geopolitica-dopetroleo.wordpress.com/geopolitica-do-atlantico-sul/#jp-carousel-1135>. Acesso em: 02 outubro 2017 às 21:57.

³ Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Br%C3%A9sil_-_ZEE_et_plateau_continental.jpeg. Acesso em: 02 outubro 2017 às 22:04.

3. Desenvolver as capacidades de monitorar e controlar o espaço aéreo, o território e as águas jurisdicionais brasileiras.
4. Desenvolver, lastreado na capacidade de monitorar/controlar, a capacidade de responder prontamente a qualquer ameaça ou agressão: a mobilidade estratégica.
9. Adensar a presença de unidades do Exército, da Marinha e da Força Aérea nas fronteiras. BRASIL (2012, p. 47-52).

Estas diretrizes enfatizam a importância da proteção das águas jurisdicionais brasileiras como parte importante da estratégia nacional de defesa e exercício da soberania, bem como os conceitos de controle e monitoramento.

A END expõe como prioridade assegurar os meios necessários para negar o uso do mar a qualquer concentração de forças inimigas que pretendam se aproximar do Brasil por vias marítimas. Essa prioridade implica, diretamente, na reorganização das forças navais.

A Estratégia Nacional também apresenta objetivos sem hierarquização de prioridades a serem de acordo com as circunstâncias:

- (a) defesa proativa das plataformas petrolíferas; (b) defesa proativa das instalações navais e portuárias, dos arquipélagos e das ilhas oceânicas nas águas jurisdicionais brasileiras; (c) prontidão para responder a qualquer ameaça, por Estado ou por forças não convencionais ou criminosas, às vias marítimas de comércio; e
- (d) capacidade de participar de operações internacionais de paz, fora do território e das águas jurisdicionais brasileiras, sob a égide das Nações Unidas ou de organismos multilaterais da região. BRASIL (2012, p. 69).

Duas áreas são relacionadas na END como de maior importância do ponto de vista de controlar o acesso marítimo: a faixa que abrange a região de Santos até Vitória, Figura 1-1, e a região no entorno da foz do Rio Amazonas. Estas áreas se revestem de importância por serem, no caso da faixa marítima Santos - Vitória, região de bacias petrolíferas e da foz do rio Amazonas por ser uma via que pode facilitar o acesso de forças navais hostis ao interior do território brasileiro.

Com o objetivo de cumprir a sua missão estratégica e tática descritas na Estratégia de Defesa Nacional (EDN), e melhor descrita no Livro Branco da Defesa Nacional (LBDN), a Marinha desenvolveu alguns programas para obtenção de meios, quais sejam:

- Programas de obtenção de submarinos (PROSUB), que prevê a construção de quatro submarinos convencionais e de um submarino de propulsão nuclear, além de um estaleiro e de uma nova base de submarino para o apoio dessas unidades;
- Programas de obtenção de navios-aeródromo (PRONAE), que visa projetar e construir duas unidades, sendo uma para a Primeira Esquadra e outra para a Segunda⁴;
- Programa de obtenção de navio anfíbio (PROANF), que visa pesquisar projetos de navios desta classe no exterior, que tenham sido aprovados por outras marinhas. O intuito disto é obtê-lo através da construção em estaleiro localizado no território brasileiro; e
- Programas de obtenção de corvetas, de fragatas, de navios patrulha de 500 toneladas e de navios-patrulhas oceânicos (PROSUPER), que visa desenvolver a capacidade de projeto e construção, no Brasil, de cinco navios-escolta (corveta/fragata), cinco navios-patrulha oceânicos de 1,8 mil toneladas, um navio de apoio logístico, um navio de desembarque de carros de combate (NDCC) ou um navio de desembarque-doca (NDD) e vinte e sete navios-patrulha de 500 toneladas.;

Contribuindo para a consecução de parte do PROSUPER o Centro de Projetos de Navios (CPN) está, atualmente, responsável pelo gerenciamento do desenvolvimento de uma corveta que é uma evolução da CV Barroso, CV Tamandaré, que será a primeira de uma nova classe. Com dimensões, capacidades e armamentos diferentes da CV Barroso, Figura 1-2. Para tanto, o projeto está sendo desenvolvido por uma empresa brasileira pertencente a um grupo de empresas de projetos navais Italiana fazendo uso da norma da Registro Italiano Navale, RINAMIL (2011), para navios militares. As dimensões previstas para esta nova corveta estão descritas na Tabela 1-1.

⁴ Consolidando uma das prioridades do Poder Naval, segundo a END, que é defender a foz do Rio Amazonas, a Marinha do Brasil pretende estabelecer uma Base Naval nos moldes da Base Naval do Rio de Janeiro (BNRJ) na região norte-nordeste esta servirá de base para a Segunda Esquadra.



Figura 1-2 - Concepção artística de CV-03 Tamandaré. Fonte: Centro de Projetos de Navio⁵

Tabela 1-1 - Dimensões da CV Tamandaré. Fonte: Centro de Projetos de Navio

Deslocamento (Δ) =	2640	Toneladas
Comprimento total (L_{OA}) =	103,4	Metros
Comprimento na Linha d'água (L_{WL}) =	94,9	Metros
Comprimento entre perpendiculares (L_{PP}) =	94,2	Metros
Boca máxima (B_W) =	11,47	Metros
Calado (T) =	4,3	Metros
Pontal (D) =	9,3	Metros
Velocidade de Cruzeiro (V_{CRUISE}) =	17	Nós
Velocidade máxima ($V_{MÁX}$) =	25	Nós

1.1. Motivação

Corvetas são, historicamente, navios de porte médio que possuem poder de fogo maior que os navios-patrolhas e relativamente menor que as fragatas. As corvetas são atualmente usadas como navios escolta e por serem menores e mais leves que as fragatas apresentam, por vezes, maior velocidade e certamente maior manobrabilidade.

⁵ Localizado no Complexo Naval da Ilha das Cobras, o CPN tem o propósito de gerenciar as atividades técnicas especializadas de projeto básico, de projeto de integração de sistemas e de análises e avaliações de engenharia, pertinentes aos processos de construção, modernização, conversão, alteração e apoio de navios de superfície e de submarinos.

Os navios tipo escoltas servem para proteger os capitâneas (NAe, NTrT⁶, NApLog⁷, NT⁸ e outros⁹) de uma esquadra em movimento, além desta função, pode cumprir missões de patrulhas e salvamentos em regiões distantes da costa preservando, assim, a soberania e os interesses do Brasil no mar, Figura 1-3.



Figura 1-3 - Corveta V32 patrulhando próximo a uma plataforma em águas territoriais brasileiras ¹⁰.

Navios são estruturas sujeitas a esforços decorrentes do seu carregamento e das cargas transmitidas pelo mar à sua estrutura. A grande maioria dos navios, principalmente os mercantes, são projetados para atuarem em uma determinada rota ou região da qual se tem conhecido, estatisticamente, as suas características naturais. Desta

⁶ Navio transporte de tropa.

⁷ Navio de apoio logístico.

⁸ Navio tanque.

⁹ Navios que sejam designados como capitânia pela missão ou que devam ser protegidos.

¹⁰ Imagem disponível em: <https://eduardoalmeida.files.wordpress.com/2011/03/marinha-do-brasil-presal.jpg>. Acesso em: 02 outubro 2017 às 22:10.

forma, o projeto é otimizado para suportar as piores condições de carregamento possíveis, sobre a estrutura do navio na rota idealizada.

Os navios militares, do tipo escolta, são projetados para atuarem em regiões onde as características do mar podem diferenciar, e muito, das observadas nas águas jurisdicionais do país costeiro. Ante a esta dependência probabilística das regiões onde o navio pode operar, a vida útil da embarcação pode vir a ser bastante reduzida devido à variação dos carregamentos sobre a estrutura do meio flutuante.

A solução para este problema é fazer uso de um coeficiente de segurança maior que, em princípio, virá de encontro à economicidade do projeto a curto prazo, porém aumentará a segurança do pessoal de bordo e garantirá o êxito de muitas missões da embarcação.

1.2. **Objetivo**

O objetivo primário deste trabalho é simular a variação de momentos na região da seção mestra, Figura 1-4, de um navio militar, do tipo escolta, até o ponto de colapso global da estrutura devido à flexão longitudinal da embarcação. Como objetivo secundário serão obtidas as diferenças percentuais das tensões crítica de flambagem oriundas da análise e o previsto pela norma em algumas regiões da estrutura, tais como: longitudinais dos conveses, chapa dos conveses, longitudinais do costado, chapa do costado, quilha e quilhas laterais.

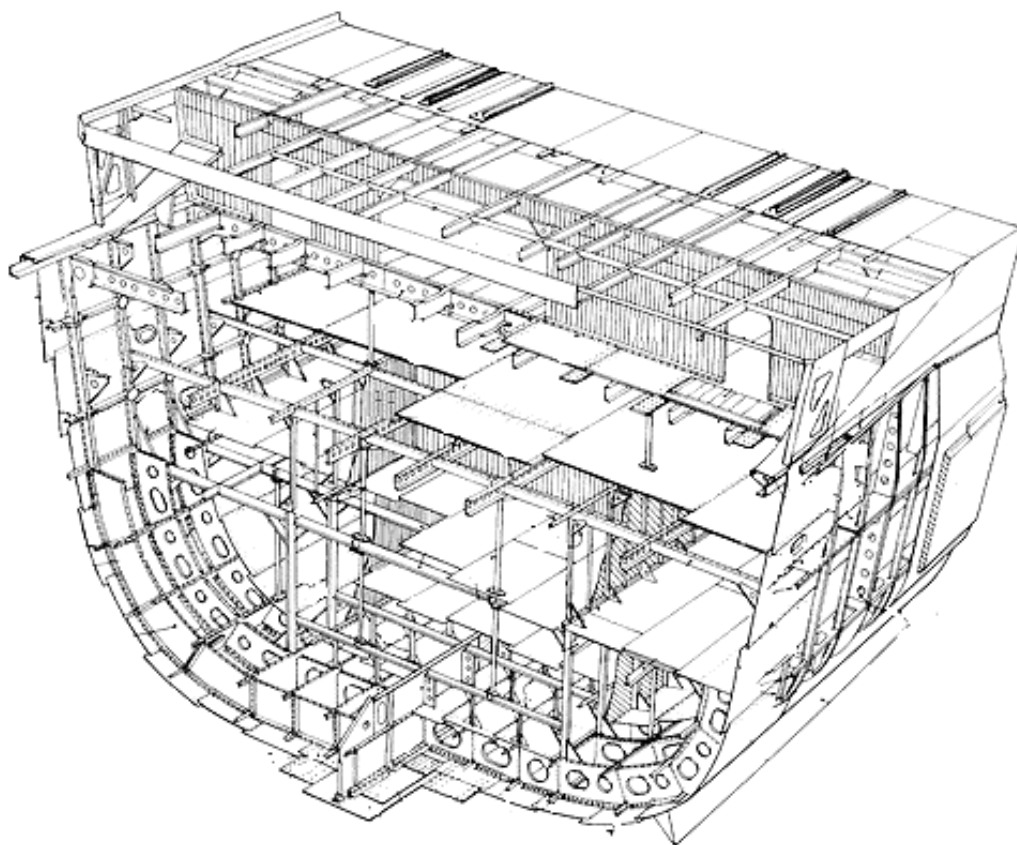


Figura 1-4 - Exemplo de seção mestra de navio militar tipo escolta¹¹.

1.3. Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo apresenta os aspectos políticos e econômicos do Brasil no uso do mar, a importância da Amazônia Azul, sua estratégia de defesa e os programas de reestruturação do poder naval brasileiro, além de apresentar a importância de um navio do porte de uma corveta no cenário político atual do país e descrever os objetivos desta dissertação.

O segundo capítulo apresenta alguns autores que, recentemente, pesquisaram assuntos semelhantes ao proposto neste trabalho, tais como Paik, Van-Vu, Fujikubo e Yao os quais se dedicaram e ainda têm se dedicado ao estudo mais aprofundado sobre o

¹¹ Imagem disponível em: <http://www.flickrriver.com/photos/27417638@N07/3782388291/>. Acesso em: 06 outubro 2017 às 13:55.

comportamento de painéis enrijecidos de estruturas metálicas e o conseqüente impacto sobre a estrutura do navio no caso de uma falha global. O terceiro apresenta os fundamentos teóricos básicos sobre os esforços agentes na estrutura de um navio e suas origens, além de apresentar os três tipos de falhas básicas que podem ocorrer em uma estrutura.

O quarto capítulo descreve a metodologia desenvolvida neste trabalho, desde os programas usados passando pelas premissas adotadas, até a descrição do procedimento para a validação e conseqüente análise, além de mostrar o tipo de malha e o elemento, com suas características, utilizado nas análises neste trabalho. O quinto apresenta o modelo de validação, a malha usada, as condições de contorno consideradas, as imperfeições geométricas inseridas no modelo, o resultado da análise, seus resultados e discussões.

O sexto capítulo desenvolve a metodologia usada na análise do modelo de seção mestra, alvo dos objetivos deste trabalho, caracteriza o material usado, estuda a convergência de malha, descreve a forma de obtenção das imperfeições geométricas e sua inserção no modelo, condições de contorno, método de solução usado na análise, resultados obtidos através de figuras e tabelas e os compara com a norma de projeto. Por fim, o sétimo a conclusão do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estrutura do navio

A estrutura do navio é, essencialmente, constituída de perfis longitudinais, tais como: sicordas, longitudinais leves e escoas; e transversais, tais como vaus, hastilhas e cavernas, conectados através de solda. Os perfis são montados de forma similar a uma grelha e soldados a chapas de aço que são conformadas de acordo com a necessidade da geometria local para dar forma ao navio.

A estrutura formada pela chapa com os perfis soldados é denominada painel enrijecido, Figura 2-1.

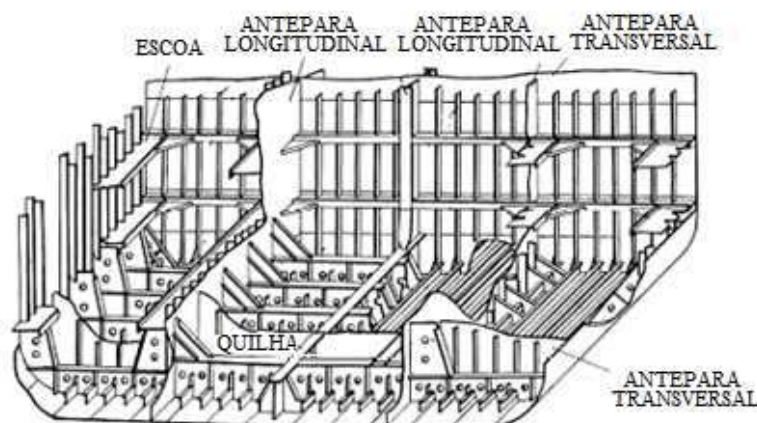


Figura 2-1 Estrutura retangular de um navio, tipo grelha. FONSECA (1989)

2.2. Painéis enrijecidos

Toda a estrutura do navio é importante, porém, a estrutura terciária requer uma atenção maior por ser menos robusta, e sofrer esforços diferenciados tais como forças transversais, longitudinais, de membrana, pressão hidrostática e momentos de flexão.

Nos navios, a estrutura terciária é engastada ou apoiada na secundária que, em geral, está montada sob a forma de grelha, ou seja, os elementos longitudinais e os transversais estão dispostos perpendicularmente entre si, Figura 2-2b. Toda esta

estrutura deve ser dimensionada para suportar a superposição das três tensões, LEWIS (1998), além de incluir a margem de corrosão. A falha local de algum destes elementos pode acarretar no comprometimento dos outros adjacentes e, em última análise, ao colapso global progressivo da estrutura.

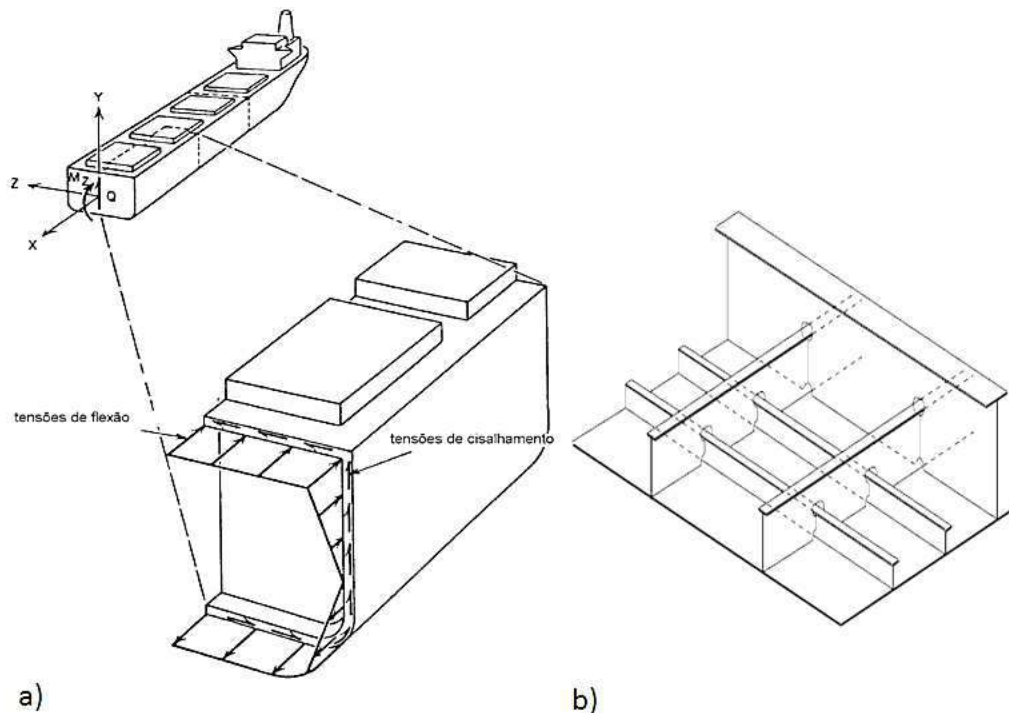


Figura 2-2 – A imagem da direita (b) mostra um chapeamento estruturado na forma de grelha e a da esquerda (a), tensões de membrana atuando no chapeamento do navio. BRITTO (2004)

Localmente, costado, fundo e conveses, as estruturas do navio que são mais suscetíveis às deformações e, conseqüentemente, às falhas são as terciárias. Estas são compostas pelas placas do costado e são enrijecidas pelas estruturas secundárias, longitudinalmente, e cavernas, transversalmente disposta em relação ao navio. As estruturas terciárias estão sujeitas a sofrerem falhas por flambagem devido às dimensões das placas serem muito maiores que as suas espessuras.

YAO (2003) descreveu os métodos apresentados por Caldwell e Smith. O primeiro idealizou a seção transversal de um navio composto por painéis enrijecidos com uma espessura equivalente. Calculou, também, a flexão com o momento plástico

da seção e considerou a influência da curvatura. Na parte flambada, a tensão de escoamento foi multiplicada por um fator de redução.

O segundo, idealizou um método mais simplificado o qual permite calcular o colapso progressivo da seção transversal do navio quando submetido à flexão longitudinal. Neste método, a seção transversal, também, é dividida em painéis enrijecidos; neles são aplicadas uma tensão média e em sua deformação é considerado a influência do fator de redução e da flambagem. Seguidamente, é feita uma análise de colapso progressivo e assume-se que uma seção transversal plana, da parte considerada, permanece plana durante a deformação.

Após Smith muitos trabalhos têm sido publicados propondo métodos para obter a relação tensão média x deformação média de placas enrijecidas.

Dois destes são o *Idealised structural unit method*¹²(ISUM) e o *Finite element method* (FEM), ambos, hoje, bem difundidos e usados. O primeiro foi idealizado por UEDA *et al* (1984), para analisar o colapso progressivo de estruturas e propõe a divisão da estrutura em unidades, as maiores possíveis, além de considerar os comportamentos geométrico e material como não lineares. Pode ser idealizado e descrito de forma analítica e numérica, após, a estrutura é remontada e uma carga incremental aplicada a ela.

O segundo método é um procedimento numérico para determinação de campos em sistemas contínuos, no caso do colapso progressivo de uma estrutura, calcula-se os campos de deslocamento e tensões. Basicamente, em FEM, método dos elementos finitos (MEF), em português. Por este método pode-se calcular os comportamentos lineares e não lineares tanto do material quanto da geometria.

Recentemente, muitos pesquisadores, tais como Paik, Van-Vu, Fujikubo e Yao os quais se dedicaram e ainda têm se dedicado ao estudo mais aprofundado do comportamento de painéis enrijecidos de estruturas metálicas e do conseqüente impacto na estrutura global do navio. Em particular, os dois primeiros citados, os quais usam exemplos de painéis enrijecido de estruturas oceânicas.

¹² Este método utiliza uma forma de superelemento.

PAIK *et al* (2007) descrevem os resultados obtidos no estudo de um método para avaliação do estado limite último de estruturas em forma de navios. Para tanto usou como exemplo a estrutura de um navio tanque AFRAMAX com duplo casco. O aço usado foi o AH32 com o σ_Y (limite de escoamento) = 315 MPa, E (módulo de Young) = 205,8 GPa e ν (coeficiente de Poisson) = 0,3.

Tabela 2-1 - Dimensões do navio usado como referência no estudo. PAIK *et al* (2007)

DIMENSÕES PRINCIPAIS DO AFRAMAX DUPLO CASCO

Comprimento total	250 m
Comprimento entre perpendiculares	239 m
Boca	43,8 m
Pontal	21 m
Calado	13,6 m
Coeficiente de bloco	0,87

As simulações foram realizadas no programa comercial de Elementos Finitos ANSYS, usando análise não linear, DNV PULS e ALPS/ULSAP. Este último não utiliza o método dos elementos finitos para seus cálculos, e foi desenvolvido por Paik baseado na teoria do ISUM.

PAIK *et al* (2007a) em seu artigo, fizeram as simulações em placas não reforçadas, delimitada pelos longitudinais e transversais do fundo. A dimensão da placa é $a = 4300$ mm, $b = 815$ mm e $t = 17,8$ mm, sendo t a espessura da placa e o β (razão de aspecto) = $(a/b) (\sigma_Y/E)^{1/2}$. A extremidade da placa foi considerada engastada nos quatro lados. A Figura 2-4 mostra a simulação quando a razão compressiva do carregamento axial é $\sigma_x:\sigma_y = 0,79:0,21$ e a pressão $p = 0,16$ MPa, sendo σ_x a tensão na direção x (longitudinal) e σ_y na direção y (transversal).

Resumidamente, os casos estudados por PAIK *et al* (2007a) têm condições iniciais de deflexão e restrições nas extremidades da placa, ou seja:

- (a) Imperfeição inicial da placa (deflexões);
- (b) Forma determinada pela análise do autovalor sob compressão uniaxial nas direções longitudinais, independente da compressão biaxial ou transversal das forças de compressão, isto é, com 'm' (número de meias ondas na flambagem) = 5, para o presente caso;
- (c) Variação da forma determinada pelo 'm' aplicado a forças de compressão biaxial e uniaxial;
- (d) Bordas livres, equivalente a simplesmente apoiadas;
- (e) Comportamento elástico, considerando os efeitos das ações das compressões e da pressão normal ao plano da placa; e
- (f) Fixa, equivalente a engastada em todas as bordas.

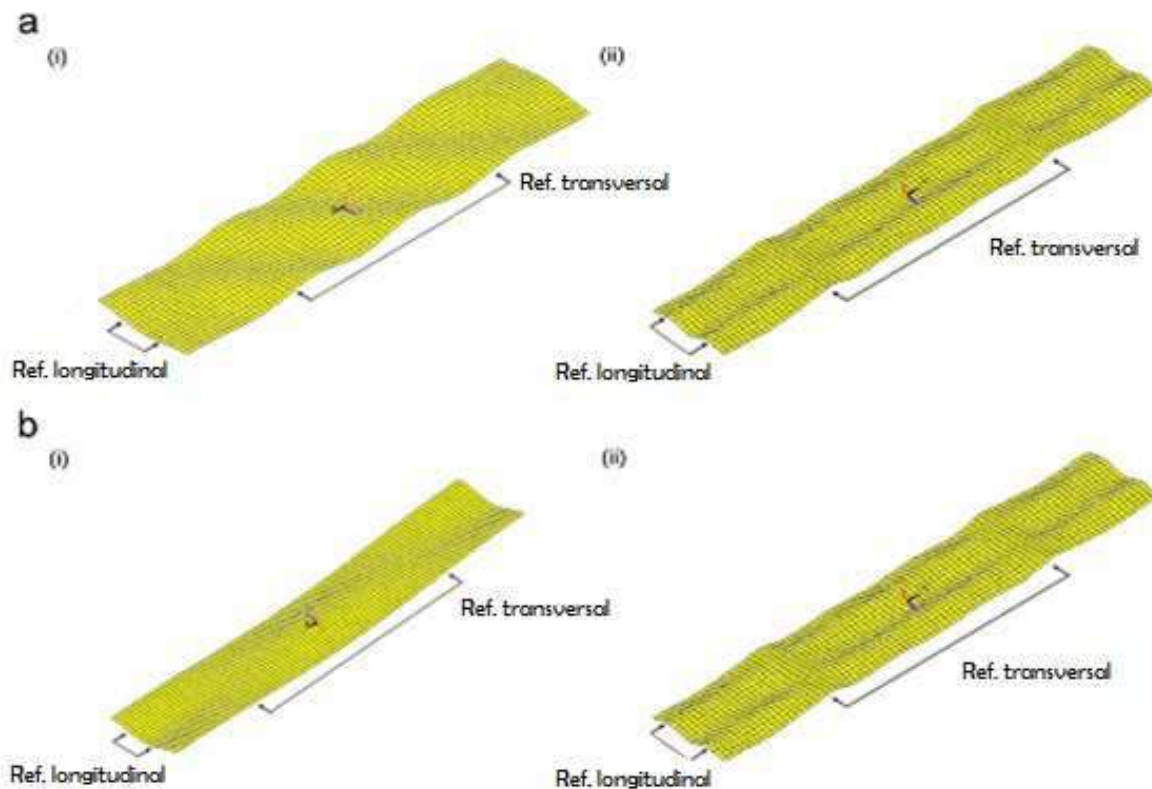


Figura 2-3 - (a) Deflexão inicial da placa: (i) Antes da ação da pressão lateral e (ii) sofrendo a ação da pressão (ampliado 30 vezes). (b) Placa sofrendo deformação predominantemente de compressão transversal: (i) Antes da ação da pressão lateral e (ii) sofrendo a ação da pressão (ampliado 30 vezes). PAIK *et al* (2007a)

Um dos resultados obtidos da análise pode ser visto na Figura 2-4. Os outros resultados estão descritos na referência PAIK *et al* (2007a)

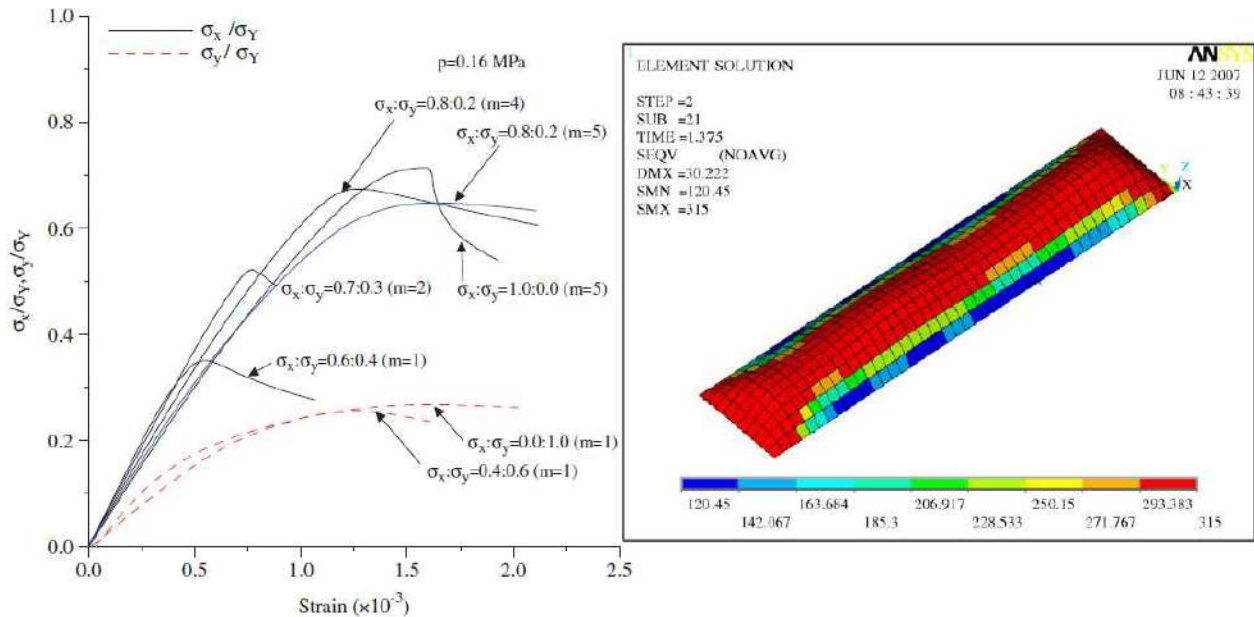


Figura 2-4 - A esquerda mostra o gráfico representativo da variação da deflexão com as bordas restritas e no regime elástico. A direita mostra, com ampliação de 10 vezes, a distribuição de tensão von Mises no estado limite sob compressão biaxial ($\sigma_x : \sigma_y = 0,8 : 0,2$) e pressão lateral ($p = 0,16$ MPa), placa simplesmente apoiada. PAIK *et al* (2007a)

Em continuidade, no segundo artigo PAIK *et al* (2007b) analisaram os painéis enrijecidos propriamente dito, Figura 2-5 e Figura 2-6. Nestes casos foram introduzidas deformações iniciais, também, nos reforçadores verticais ($w_{oc}=a/1000$), horizontais ($w_{os}=a/1000$), nas placas entre enrijecedores ($w_{opl}=b/200$) e nas almas dos perfis ($w_{ow}=h_w/200$), sendo b a largura da placa entre longitudinais e h_w a altura do perfil, não considerando a espessura do flange. Não foi considerada a tensão residual oriunda do processo de soldagem, mesmo tendo alguma influência sobre tensão última. Mais resultados estão descritos na referência PAIK *et al* (2007b).

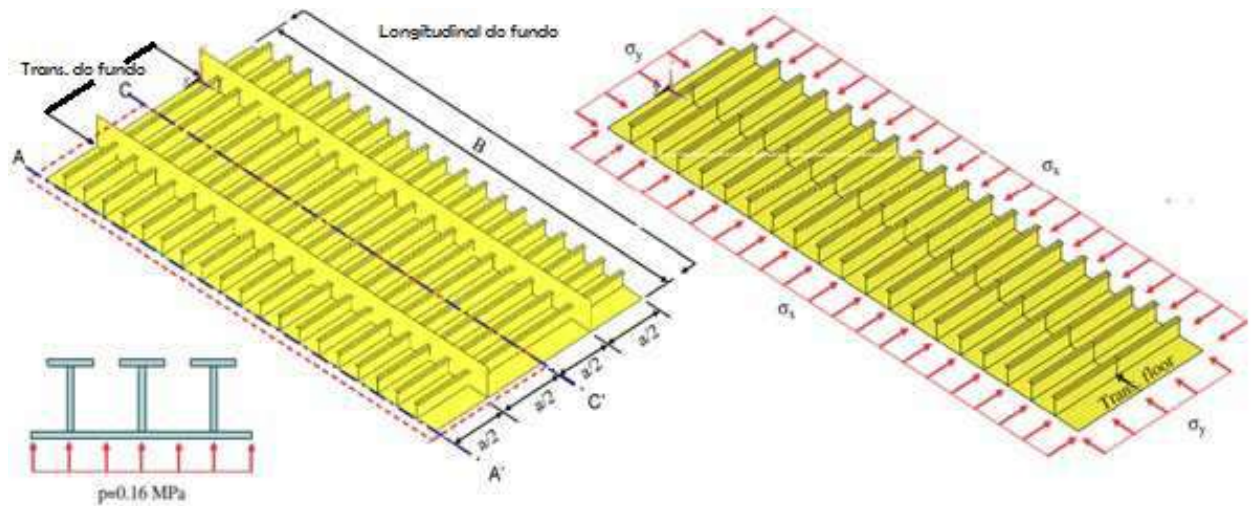


Figura 2-5 - A direita painel enrijecido idealizado e a esquerda modelo de elementos finitos não-linear alvo da análise. PAIK *et al* (2007b)

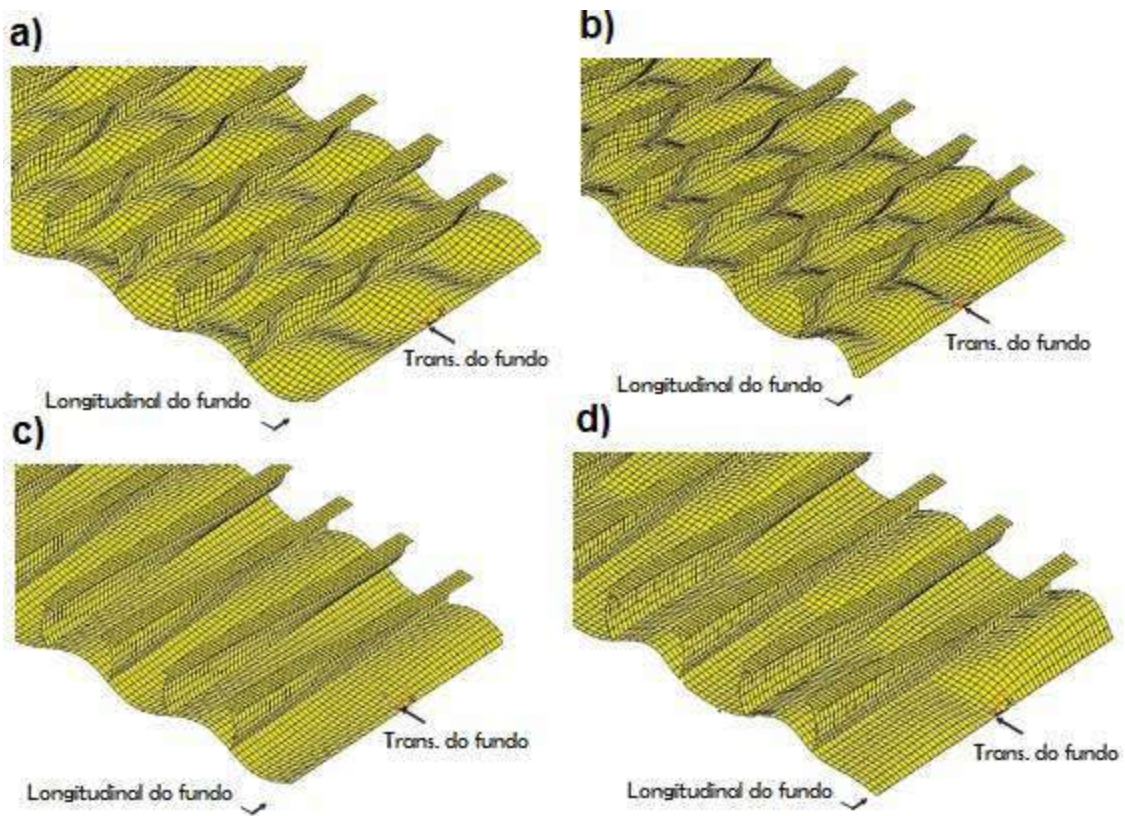


Figura 2-6 - Forma da distorção inicial do painel enrijecedor do fundo, amplificação em 10 vezes: (a) sob compressão, predominantemente longitudinal (com $m = 5$) antes da carga de pressão lateral, (b) sob compressão, predominantemente longitudinal, após o carregamento da carga de pressão lateral, (c) sob compressão, predominantemente, transversal ($m = 1$) antes da carga de pressão lateral e (d) sob compressão, predominantemente longitudinal, após o carregamento da carga de pressão lateral PAIK *et al* (2007b)

Como resultado das análises feitas nos seus trabalhos, PAIK *et al* (2007) concluíram a acurácia e a aplicabilidade dos métodos aplicados para calcular a tensão última da estrutura.

Concluindo, no terceiro artigo PAIK *et al* (2007c) focaram no colapso progressivo da seção mestra do navio, diferente dos dois artigos anteriores que apresentam uma análise compartimentada da placa de aço e do painel enrijecido em seu estado de tensão última. Neste artigo, os pesquisadores analisaram o colapso da estrutura utilizando os programas ANSYS, ALPS/HULL¹³, e pela IACS CSR¹⁴ e comparam seus resultados computacionais e estão melhor representados na referência PAIK *et al* (2007c).

Os parâmetros usados nas simulações foram os mesmos do artigo anterior PAIK *et al* (2007c) e também não usaram os parâmetros para definir a tensão residual. O corte transversal da seção mestra e a seção mestra modelada no ANSYS são mostrados na Figura 2-7.

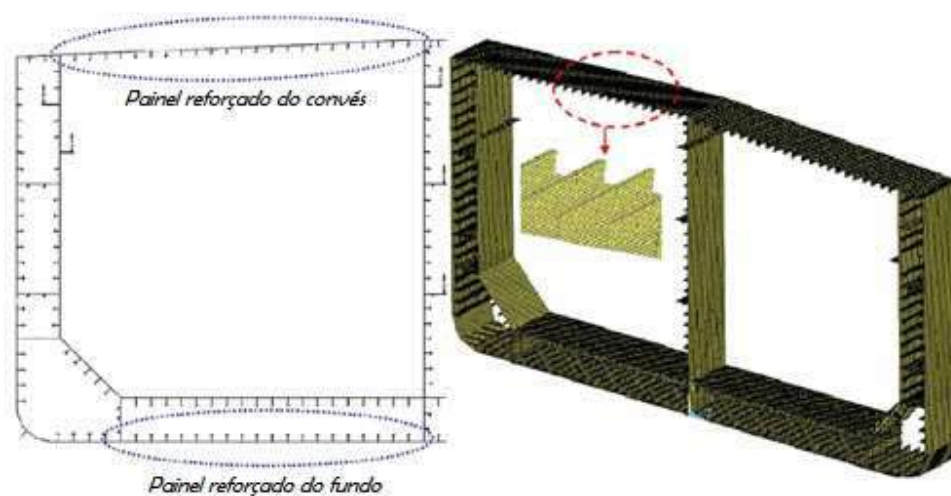


Figura 2-7 - A esquerda corte transversal da seção mestra do AFRAMAX com o convés e o fundo marcados e a direita a mesma seção mestra modelada no ANSYS. PAIK *et al* (2007c)

¹³Programa de análise de colapso progressivo de navios usando um método simplificado não linear de elementos finitos (ISUM).

¹⁴ IACS CSR é a sigla em inglês para Regra Estrutural Comum da Associação Internacional de Sociedades Classificadoras. www.iacs.org.uk.

As simulações foram realizadas excluindo 50% da margem de corrosão de cada um dos elementos estruturais, como especificado pela IACS, dado que o casco foi concebido para satisfazer as regras da IACS CSR. A seção mestra da estrutura modelada tem as seguintes propriedades:

- Área da seção mestra = 5,4982 m².
- Momento de inércia na direção vertical = 378,4787 m⁴.
- Módulo de seção = 40,7442 m³ no fundo e 29,9172 m³ no convés.
- Momento plástico máximo = 12742,76 MNm.

Observa-se que a Figura 2-8 mostra a estrutura da seção mestra deformada devido à tensão última oriunda do momento de tosamento atuante sobre a estrutura. A figura mostra a distribuição sobre a estrutura das tensões equivalentes de von Mises

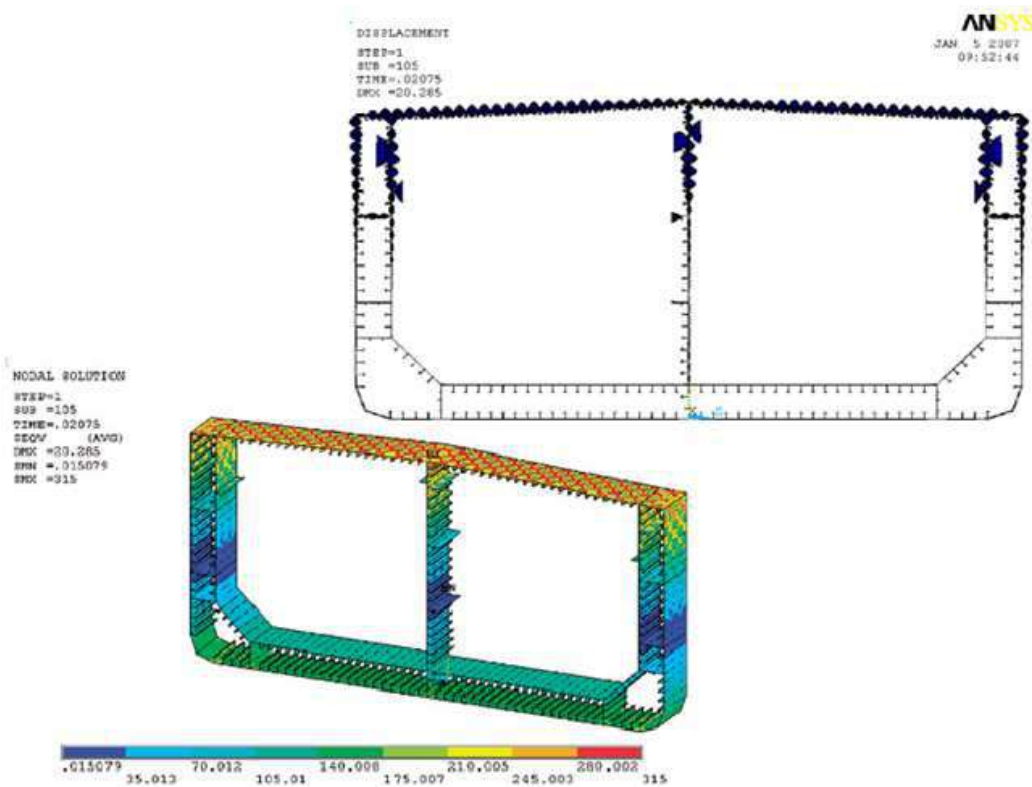


Figura 2-8 - A esquerda mostra o corte transversal da seção mestra do AFRAMAX deformada após a simulação do colapso progressivo e a direita a mesma seção mestra mostrando as tensões equivalentes de von Mises. PAIK *et al* (2007c)

A Figura 2-9 mostra o gráfico do momento de flexão do navio pelo raio de curvatura do navio. Os autores compararam os três métodos o do ANSYS, do ALPS/HULL e da IACS CSR e constataram que o ALPS/HULL é muito bom comparando com o ANSYS não-linear numa malha refinada.

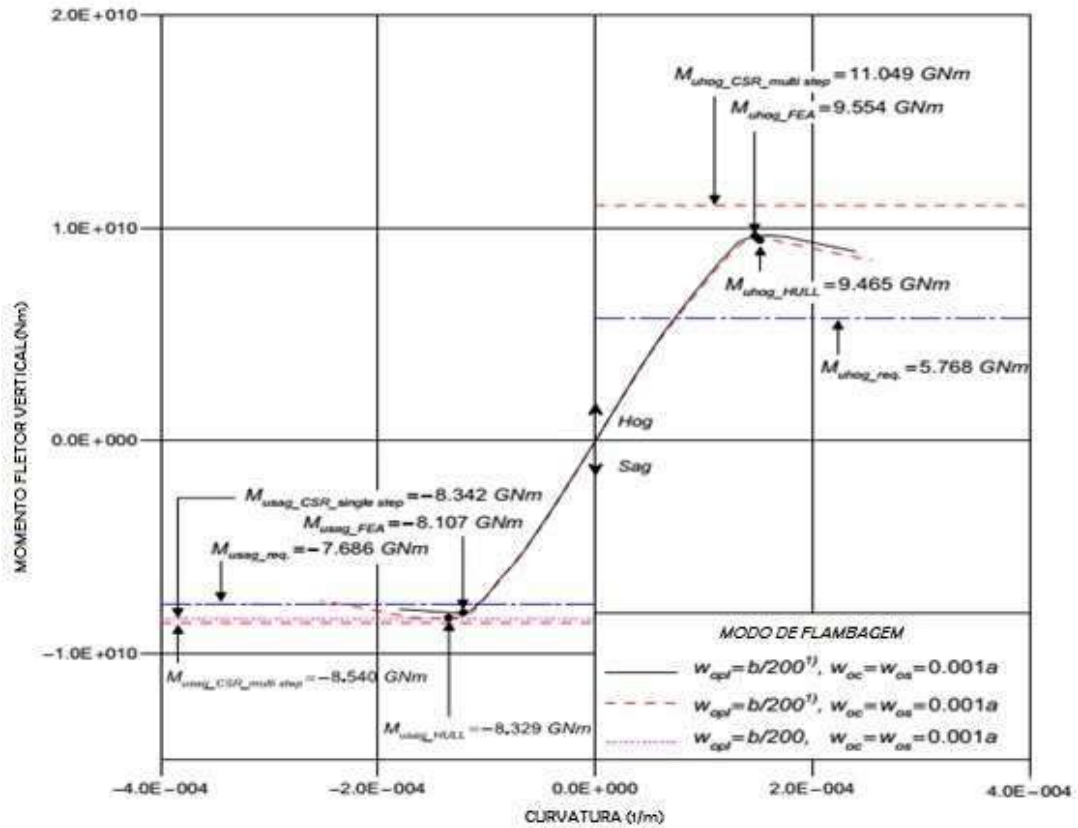


Figura 2-9 - Gráfico representativo da simulação nos diversos programas do colapso progressivo da seção mestra do AFRAMAX, mostra a curva de crescimento do momento em relação à curvatura do casco, tanto em tosamento quanto em alquebramento. PAIK *et al* (2007c)

Van-Vu (2015) descreve um procedimento para obter a tensão última longitudinal de um navio através de elementos finitos, o autor diz que é razoável, pelo menos, estender o modelo em elementos finitos três espaçamentos de cavernas, contendo a seção mestra. A Figura 2-10 mostra as regiões estendidas e a região central, que é a válida para a análise.

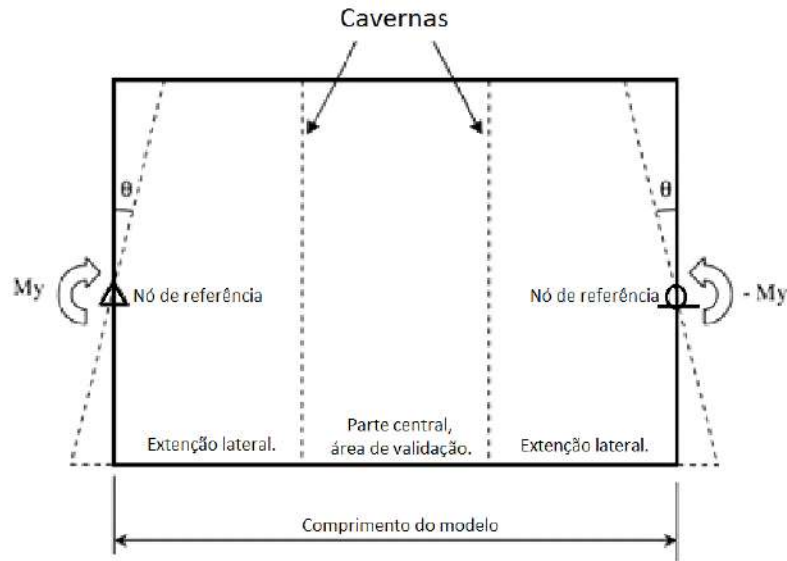


Figura 2-10 - Modelo em elementos finitos estudados. VAN-VU (2015)

As condições de contorno impostas ao modelo à direita e à esquerda foi de deslocamento e foram usados pontos remotos para tal, Figura 2-10. Estes pontos foram localizados na região da linha neutra da secção mestra do navio, mais precisamente no centroide.

Localização do nó de referência	Translação			Rotação		
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Proa do modelo	fixo	fixo	fixo	fixo	-	fixo
Popa do modelo	-	fixo	fixo	fixo	-	fixo

Figura 2-11 - A figura mostra as condições de contorno imposta nos pontos remotos. VAN-VU (2015)

O carregamento, o momento de flexão vertical, foi imposto ao ponto remoto. O modelo foi simulado em ABAQUS e usou o método RIKS, que é baseado no método do comprimento do arco. Com este método pôde-se obter melhor representação gráfica das respostas no gráfico momento x curvatura ou momento x rotação, principalmente após o colapso. O Elemento usado foi do tipo “shell” com quatro nós e cinco graus de liberdade por nó.

Van-Vu considerou em sua análise uma deformação (deflexão) inicial de acordo com o modo de flambagem e obedecendo à equação:

$$w_i = A_0 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (2.1)$$

onde 'm' é a metade do comprimento de onda entre os perfis. A_0 , B_0 e C_0 são as flechas de máxima deformação inicial das placas. 'a' e 'b' são as dimensões do painel, Figura 2-12.

Para as tensões residuais oriundas do processo de soldagem, o autor considerou o modelo descrito pelas equações 2.2 e 2.3.

$$\sigma_r = \frac{2\eta}{\frac{s}{t} - 2\eta} \sigma_Y \quad (2.2)$$

$$\eta = \frac{1}{t_p} \left[\frac{t_w}{2} + 0,26 \frac{\Delta Q}{t_w + 2t_p} \right] \quad (2.3)$$

t_w = espessura do perfil, t_p = espessura da placa, $\Delta Q = 78,8l^2$, $l = 0,7t_w$ quando $0,7t_w < 7,0$ mm, $l = 0,7$ quando $0,7t_w \geq 7,0$ mm.

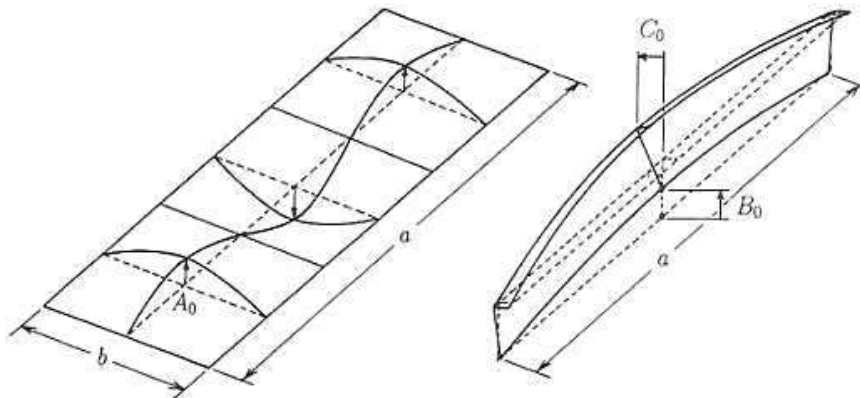


Figura 2-12 - Deflexões iniciais na placa e nos reforçadores. VAN-VU (2015)

Van-Vu analisou as pesquisas de Nishihara (MST-3 e em MSD) e a Fragata em escala de 1/3 de Dow. Os primeiros, os modelos de NISHIHARA(1983), foram reproduzidos em elementos finitos, Figura 2-13. Os resultados obtidos para o tosamento (MST-3 e MSD) e alquebramento (MSD) da estrutura apresentaram diferenças de

2%(MST-3) e 3%(MSD) dos resultados dos experimentos de Nishihara, Figura 2-14, mostrando que a predição da tensão última por elementos finitos tem uma boa acurácia.

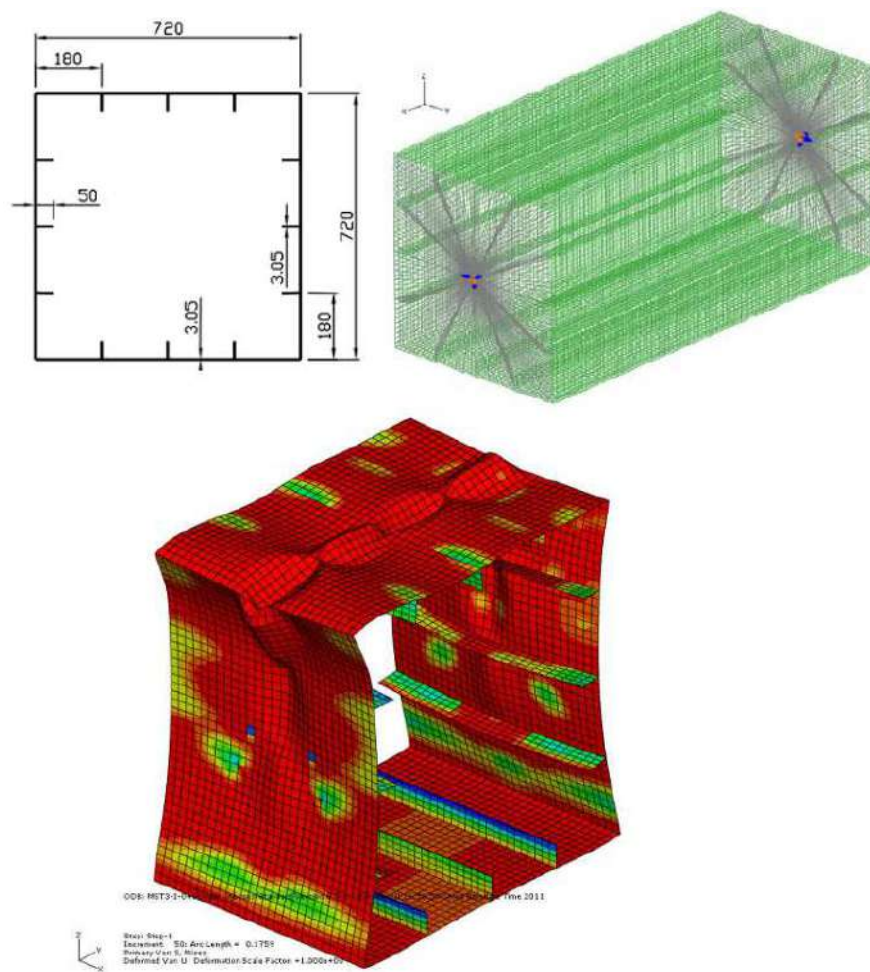
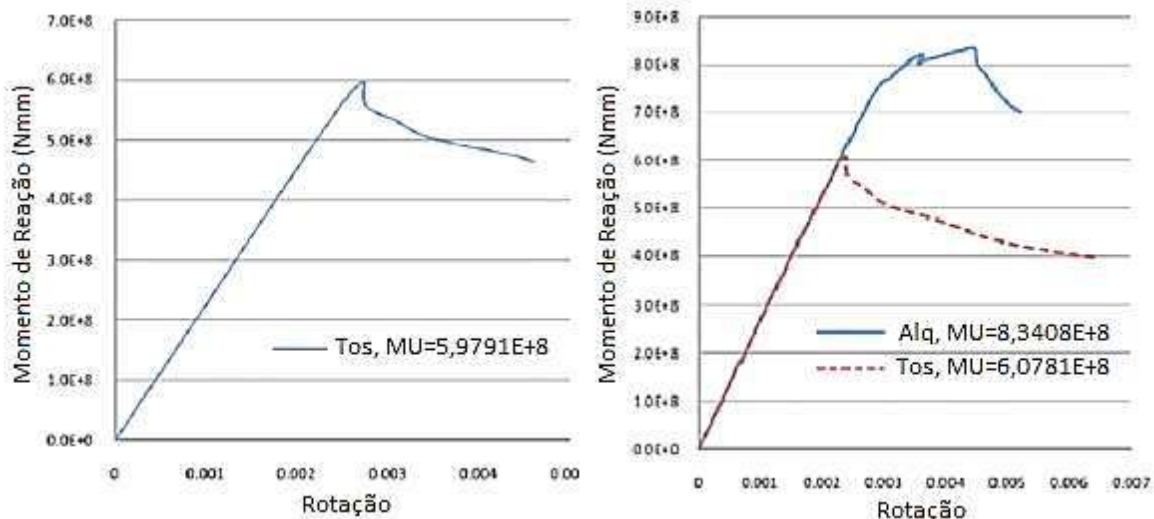


Figura 2-13 - Modelo em MEF da experiência de Nishihara (MST-3). VAN-VU (2015)



				MEF	
		MU (E+8 Nmm)	Experimento	Somente com deformação inicial	Deformação inicial e tensão residual
		Tosamento	5,8840	5,9791	5,7611
		Diferença		1,6%	-2,09%
		Tosamento (E+8 Nmm)		Alquebramento (E+8 Nmm)	
		MEF		MEF	
	Experimento	Somente com deformação inicial	Deformação inicial e tensão residual	Experimento	Deformação inicial e tensão residual
MU	5,9330	6,0781	5,9028	8,3847	8,3117
Diferença		2,4%	-0,51%		-0,87%

Figura 2-14 - Resultados das simulações dos modelos de Nishihara, a esquerda MST-3 e tabela superior, a direita MSD e tabela inferior. VAN-VU (2015)

O segundo modelo simulado foi o da Fragata de Dow, Figura 2-15; os resultados obtidos estão representados na Figura 2-16 e esta, mostra os pontos vermelhos que representam os dados obtidos no experimento de Dow e a linha preta que é o resultado obtido por MEF. Observa-se uma grande proximidade dos resultados, mostrando uma que o MEF é um bom instrumento para análise do gênero.

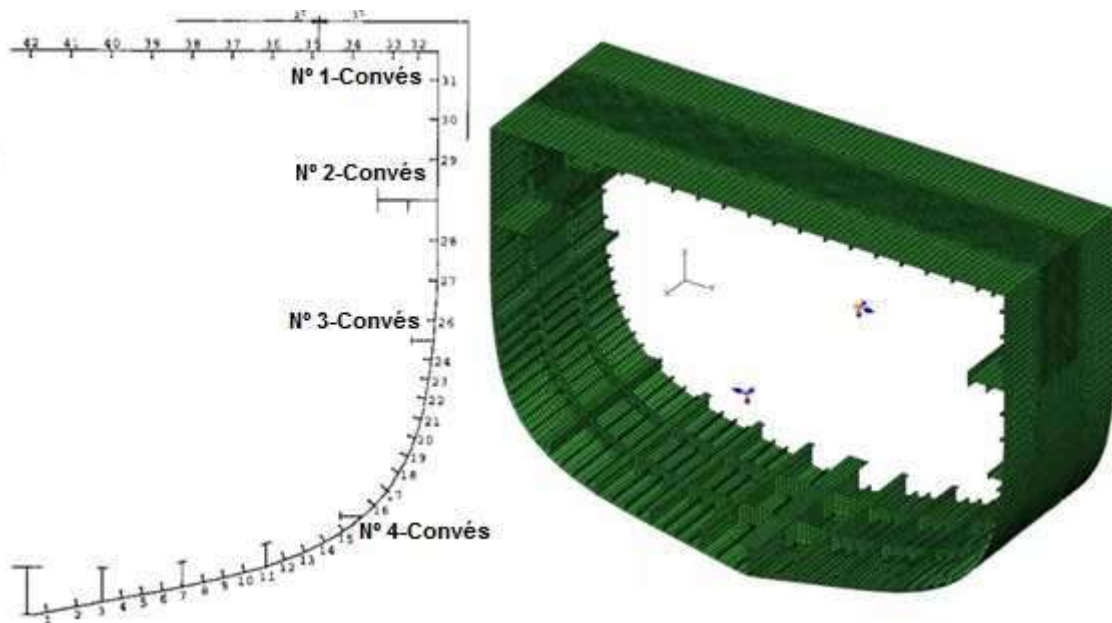


Figura 2-15 - Modelo em MEF da experiência de Dow. VAN-VU (2015)

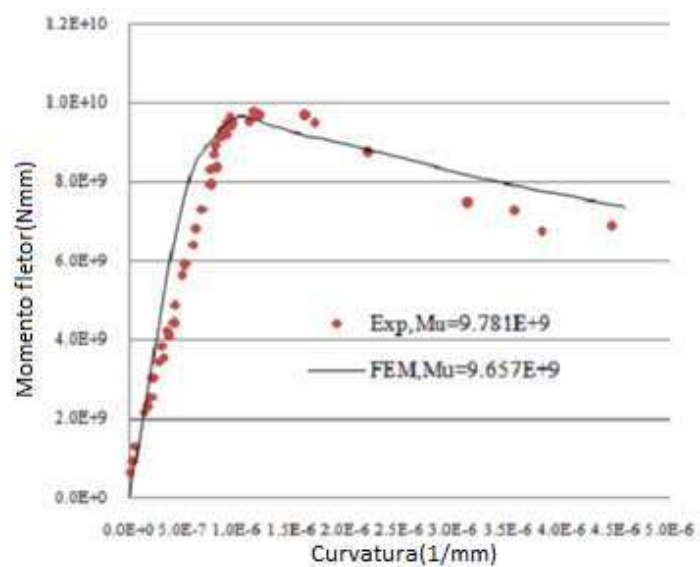


Figura 2-16 - Resultado da análise do modelo de Dow em MEF, na condição de tosamento. VAN-VU (2015)

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS

Em uma breve observação de uma estrutura flutuante, não é difícil notar que esta sofre com as ações dos carregamentos impostos pela natureza e pelo meio no qual a estrutura (navio e submarino) transita ou ancora (plataforma) por isso é importantíssimo que estes sejam analisados. O navio sofre carregamentos oriundos das ações dos ventos, correntezas e ondas, além de suportar o seu peso próprio (*lightweight* - peso leve) e de sua carga.

Observa-se que os ventos são importantes por influenciarem no estudo da estabilidade da embarcação, as correntes marinhas para a manobrabilidade e as ondas além da estabilidade também são importantíssimas para o projeto estrutural juntamente com o peso próprio e a carga do navio.

3.1. Carregamentos Verticais

Os carregamentos que influenciam verticalmente a estrutura de um navio são gerados pelos seus: peso próprio, cargas e flutuação do casco, Figura 3-1, de onde se obtém as forças cortantes verticais. As posições, consideradas como extremas, das cristas das ondas, sob o navio, geram juntamente com as cortantes os momentos de flexão vertical chamados de alquebramento e tosamento Figura 3-3 e Figura 3-4.

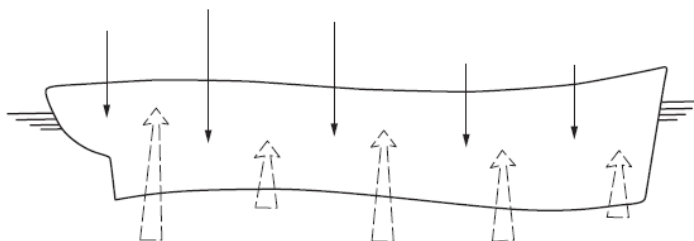


Figura 3-1 - Carregamentos atuantes no casco de um navio. RAWSON, TUPPER (2001)

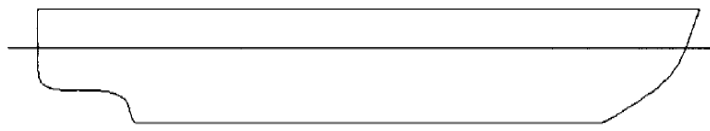


Figura 3-2 - Navio em águas tranquilas. RAWSON, TUPPER (2001)



Figura 3-3 - Navio em tosamento do casco devido à influência da onda. RAWSON, TUPPER (2001)

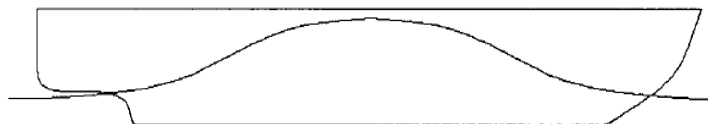


Figura 3-4 - Navio em alquebramento do casco devido à influência da onda. RAWSON, TUPPER (2001)

A flexão do navio gera tensões nos elementos estruturais do casco e conveses, dependendo das dimensões dos elementos e da intensidade dos esforços, podem gerar deformações permanentes e em alguns casos, até ao colapso global da estrutura.

3.2. **Análise das cargas atuantes sobre um navio**

A análise de uma estrutura poder feita de maneira global ou local, e em um navio não é diferente. A análise global é chamada de primária e a local é dividida em secundária e terciária. A global é feita considerando o navio como uma viga “caixão”, originando assim a ideia da viga-navio. Esta consideração pode ser feita devido ao navio ter sua estrutura peculiar, tendo o comprimento (L) muito maior, em geral, que a boca (B) e o pontal (D). Também devido a esta peculiaridade a Teoria Simples de Viga fornece bons resultados se as proporções L/B e L/D forem maiores que oito. No caso de as proporções serem menores o comportamento estrutural começa a sofrer influências das deflexões em B e D não produzindo assim resultados coerentes pela Teoria.

- *Tensões Primárias*

As tensões primárias, agentes na estrutura de um navio, são induzidas pelas deformações longitudinais originada da ação do momento fletor de alquebramento ou tosamento atuante na viga navio. Considerando o navio em flexão pura e flutuando sem vínculos, Figura 3-5, observa-se que os momentos têm suas origens nas cortantes que, por sua vez, resulta das diferenças entre a flutuação, $b(x)$, e o peso, $w(x)$, Figura 3-5.

Cabe salientar que $b(x)$ e $w(x)$ estão relacionados à seção x do navio. A partir da equação 3.2 pode-se avaliar as cortantes atuantes na estrutura do navio e conseqüentemente com a equação 3.3 avaliam-se os momentos fletores agentes sobre a estrutura do navio.

$$f(x) = b(x) - w(x) \quad (3.1)$$

$$V(x) = \int_0^x f(x)dx \quad (3.2)$$

$$M(x) = \int_0^x V(x)dx \quad (3.3)$$

$V(x)$ = Força cortante vertical atuante na seção x .

$M(x)$ = Momento fletor atuante na seção x .

Nas integrações, as constantes são nulas devido à consideração da viga navio estar apoiada livre-livre e ter as forças cortantes nulas nas extremidades.

Para a obtenção da tensão atuante na estrutura primária do navio leva-se em consideração todos os elementos contínuos e significantes na direção do comprimento, tais como: quilha, sicordas, longitudinais leves e pesados entre outros. De posse da rigidez da viga navio e conhecendo o momento atuante, pode-se calcular a tensão primária sobre a estrutura.

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (3.4)$$

$$W = \frac{I}{y} \quad (3.5)$$

σ = Tensão atuante na viga navio.

W = Módulo de rigidez da seção da viga navio

I = Momento de inércia da seção.

y = Maior distância entre a linha neutra e a região onde a tensão atua.

- *Tensões Secundárias*

São as tensões originadas pelas deformações dos elementos estruturais engastados entre duas anteparas ou cavernas gigantes adjacentes na estrutura do navio.

- *Tensões Terciárias*

As tensões terciárias são decorrentes das deformações ocorridas no chapeamento do navio devido às cargas normais e axiais atuantes sobre este elemento estrutural,

Figura 3-6.

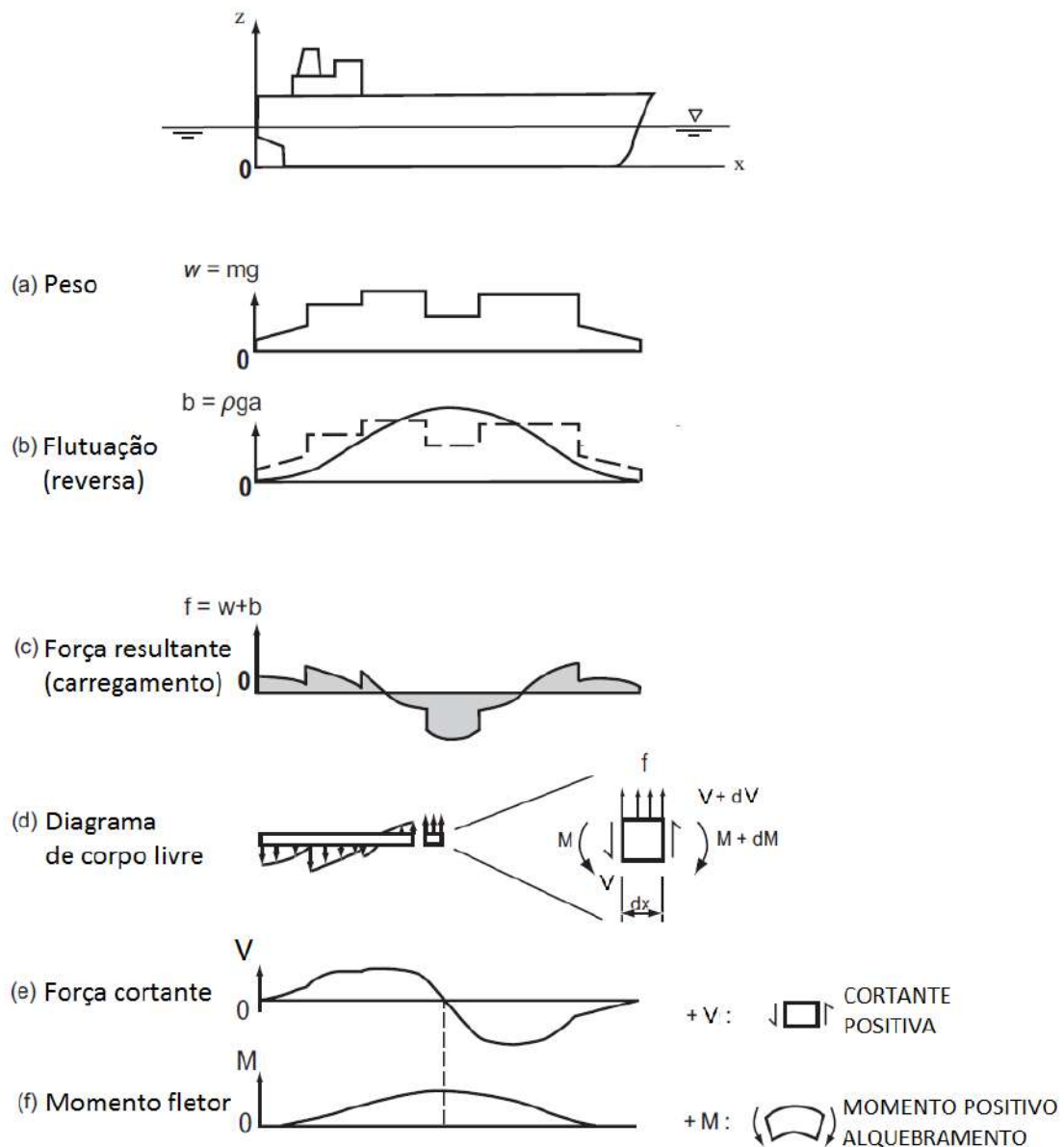


Figura 3-5 - Resumo gráfico da flexão da viga navio. HUGHES, PAIK (2010)

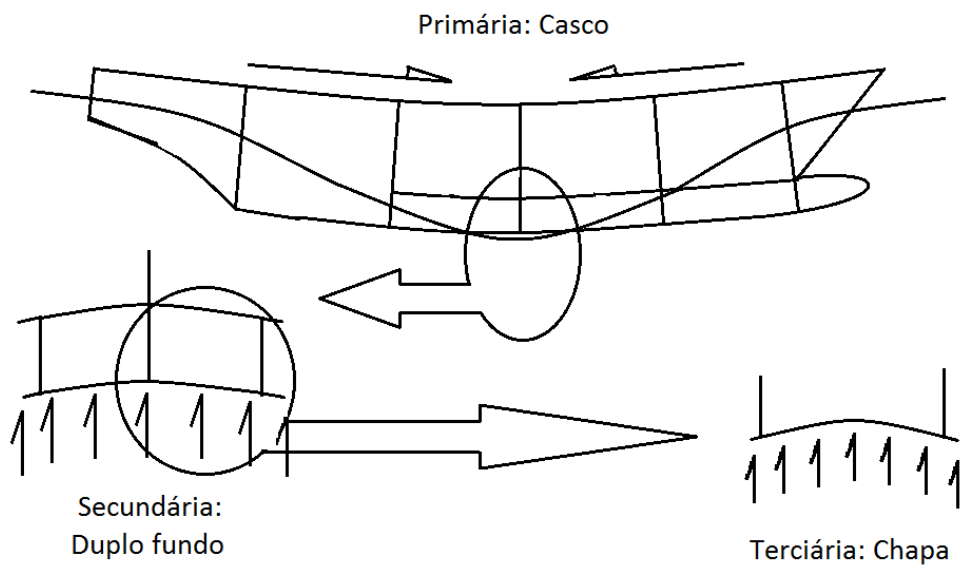


Figura 3-6 - Tensões primária, secundária e terciária.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO

Foram gerados dois tipos de modelos para serem analisados. O primeiro refere-se a uma caixa estruturada semelhante à ensaiada por NISHIHARA (1983) e, posteriormente, simulada em MEF (Método dos Elementos Finitos) por VAN-VU (2015); e o segundo modelo, o da seção mestra do navio militar, dimensionado através da RINAMIL (2011). A simulação da caixa tem o propósito de validar as condições de contorno assumidas na análise da seção mestra do navio militar.

Os modelos em 3D, tanto o de validação como o da seção mestra, foram desenvolvidos em um programa CAD (*Computer-Aided Design*) e exportado para uma ferramenta CAE (*Computer-Aided Engineering*) na forma de *SHELL*.

Tomou-se por premissa neste trabalho adotar os perfis bulbos que compõem os longitudinais leves da seção mestra em análise como chapa face, simplificando a estrutura original. Foram mantidas as alturas e espessuras, as quais foram inseridas após a exportação do modelo para o ANSYS17.1® WORKBENCH. Com isso, os perfis leves têm suas área seccional e momento de inércia reduzidos perdendo um pouco de sua rigidez e conseqüentemente se tornando mais suscetíveis a flambar localmente. Este comportamento, de certa forma, faz com que os resultados sejam mais favoráveis à segurança, tendo em vista que as estruturas analisadas deformam antes em comparação com os perfis bulbos originais, aumentando assim, a diferença percentual entre o analisado e a norma, e o coeficiente de segurança do modelo, isto porque a flambagem ocorre com tensões menores que as reais.

Devido à necessidade de se observar o colapso da estrutura, o tipo de análise realizada neste trabalho foi a não linear. Em MEF, para se obter os resultados relativos ao colapso da estrutura faz-se necessário a inserção de imperfeições geométricas e neste caso as empregadas foram obtidas através dos modos naturais de flambagem calculados no ANSYS17.1® WORKBENCH. Não foram consideradas as tensões residuais oriundas do processo de soldagem nos modelos.

Foram aplicadas rotações nos pontos remotos, posicionados nos centróides das extremidades do modelo sobre a linha neutra, a fim de flexionar longitudinalmente a estrutura analisada.

4.1. Malha dos modelos

As malhas utilizadas nos modelos deste trabalho contêm em sua composição elementos, predominantemente, da forma quadrada e do tipo casca, isto porque, este tipo de elemento apresenta melhores resultados na análise por MEF que os triangulares, e do tipo casca por ter sua espessura muito menor que a largura e o comprimento. Da biblioteca do ANSYS®, o elemento escolhido para compor a malha foi o SHELL 181 e este se faz adequado para análises de estruturas de cascas finas, por ser constituído por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, três de translações e três de rotações nos eixos x , y e z , além de ser indicado na biblioteca do programa como adequado para análises lineares, não lineares e com grandes rotações e deformações, Figura 4-1.

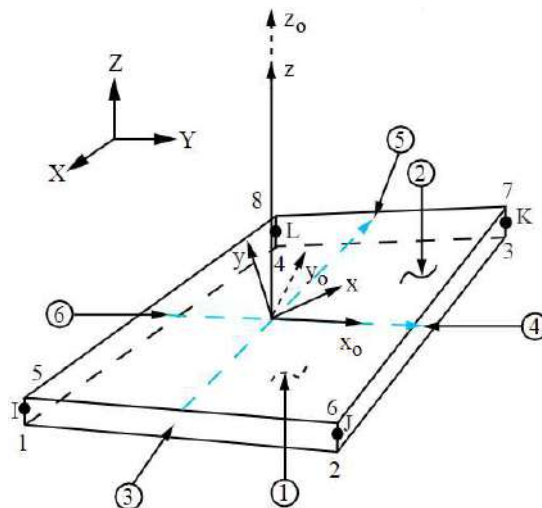


Figura 4-1 - Elemento SHELL181. Fonte: ANSYS.

VAN-VU (2015) obteve bons resultados na simulação do colapso progressivo usando uma análise não linear. O fator tempo se torna um problema em uma análise deste tipo, pois dependendo da discretização da malha o tempo de processamento torna-se muito elevado. Isto se deve ao aumento da quantidade de equações diferenciais que o computador necessita solucionar. Cabe ressaltar que o tamanho do modelo e a quantidade de elementos também interferem diretamente no tipo de simulação.

5. VALIDAÇÃO NUMÉRICA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

A validação das condições de contorno usadas neste trabalho foi obtida através das comparações dos resultados alcançados na simulação do modelo MST-3 de NISHIHARA (1983), e na validação feita por VAN-VU (2015), do mesmo modelo. O MST-3 é uma viga caixão estruturada com as dimensões de sua seção reta de 720x720 e 12 perfis face de 50x3,05, ambas as medidas estão em milímetros.

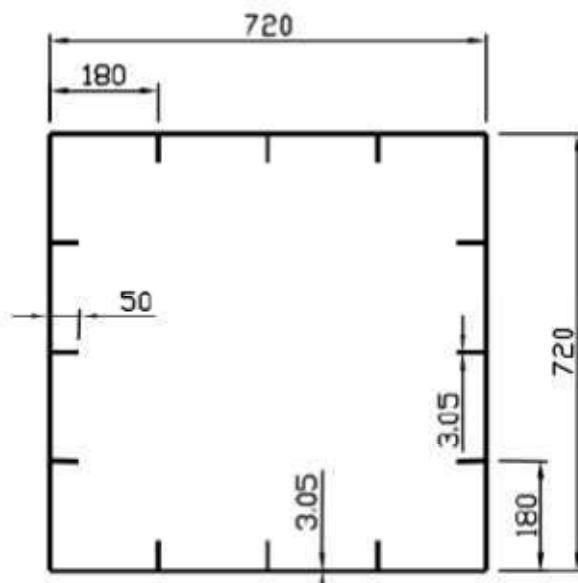


Figura 5-1 - Seção reta da viga caixão, MST-3, construída e experimentada por Nishihara. NISHIHARA (1983)

Nishihara analisou vários corpos de prova a fim de estudar o comportamento da tensão última das vigas, inclusive o MST-3. As vigas foram construídas com o comprimento total de 900 mm, porém a parte observada no experimento foi de 540 mm de comprimento e localizado entre dois anéis reforçadores. A estrutura construída foi submetida a flexões em alquebramento e tosamento no equipamento mostrado na Figura 5-2

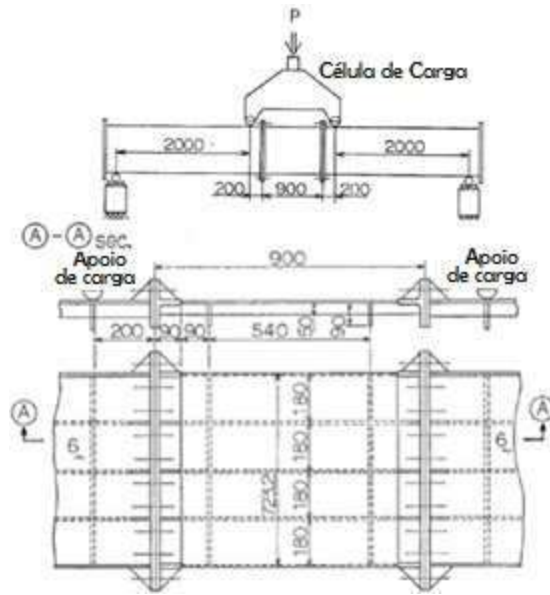
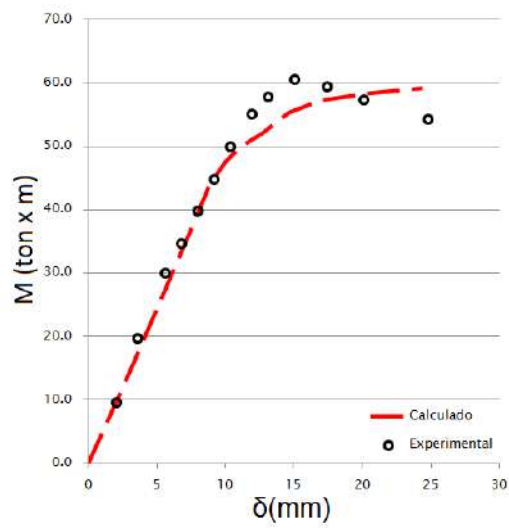


Figura 5-2 - Experimento de Nishihara. NISHIHARA (1983)

A Figura 5-3 mostra os resultados obtidos no experimento. O gráfico é de Momento x Deslocamento, sendo o momento em tonelada por metro e o deslocamento em milímetros.



Modelo	Experimental M _{máx}	M _u	M _{máx} /M _u
MST-3	57,5 ton x m	59,1 ton x m	0,973
	60,0 ton x m		1,015
	5,64 E+8 Nmm	5,80 E+8 Nmm	0,973
	5,89 E+8 Nmm		1,015

Figura 5-3 - Resultados obtidos por Nishihara. NISHIHARA (1983)

5.1. Material considerado na validação

O material considerado é isotrópico e com o comportamento elástico-perfeitamente plástico, Figura 5-4, as propriedades do material constam da Tabela 5-1. Não foram consideradas as tensões residuais resultantes do processo de fabricação.

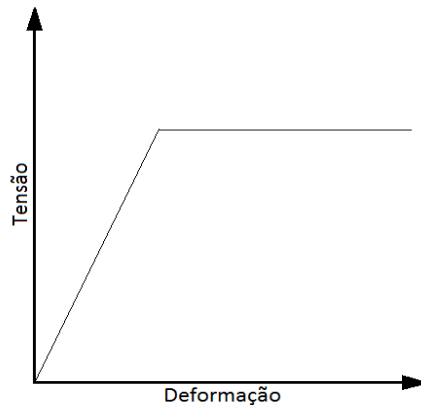


Figura 5-4 - Material elástico-perfeitamente plástico

Tabela 5-1 – Propriedades do material usado no modelo de Nishihara

$\sigma_y =$	293	MPa
$E =$	211	GPa
$\nu =$	0,277	

Adaptação de Ultimate Longitudinal Strength of Mid-Ship Cross Section. NISHIHARA (1983)

5.2. Malha de validação

Van-Vu¹⁵ também trabalhou com o modelo MST-3 de Nishihara; seu objetivo era reproduzir os resultados em elementos finitos, para tanto, fez uso do ABAQUS e usou o método RIKS. O tipo de elemento usado por ele foi o S4R5 que aceita comportamento não linear, possui 4 nós e 5 graus de liberdade por nó.

No modelo de validação desenvolvido neste trabalho, foi utilizada a mesma geometria que Van-Vu, ou seja, a MST-3 de Nishihara, igual tamanho de elementos, porém com 4 nós e 6 graus de liberdade por nó, como descrito no capítulo 4.1. A Tabela 5-2 mostra a quantidade de nós e elementos usados no modelo de validação, que possui 540mm de comprimento.

¹⁵ Experimento descrito na revisão bibliográfica.

Tabela 5-2 – Quantidade de nós e elementos no modelo de validação

Tipo	Nós	Elementos
Quantidade	6448	6240

5.3. Imperfeições geométricas do modelo de validação

As imperfeições geométricas no modelo MST-3 simulado por Van-Vu foram inseridas através da equação 2.1 descrita no capítulo 2.2. Neste trabalho, para inserir as imperfeições, foi utilizado o *Linear Buckling* do ANSYS17.1® WORKBENCH. O procedimento adotado foi o seguinte:

- Fez-se uma análise estrutural do modelo aplicando um deslocamento de módulo muito pequeno, neste caso, dois deslocamentos de 0,0005 mm na direção do eixo X, um em cada face paralela ao plano YZ e opostas ao corpo e sentidos contrários proporcionando, assim, a compressão do corpo, Figura 5-5;

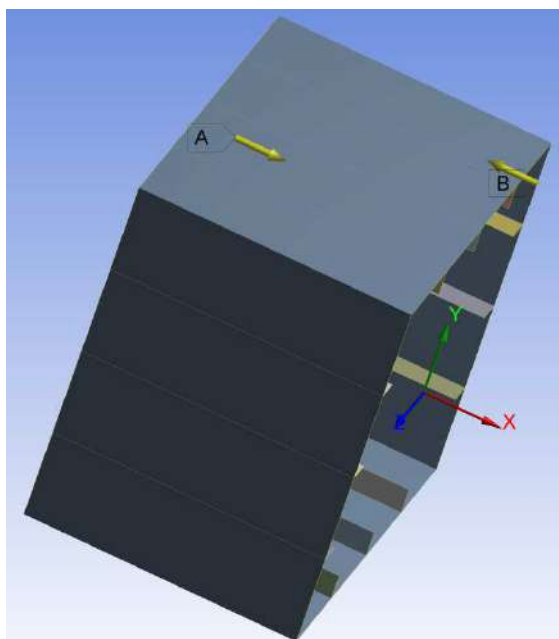


Figura 5-5 - Deslocamentos aplicados no modelo de validação para o *Linear Buckling*.

- A solução da análise estrutural foi inserida na ferramenta *Linear Buckling* a fim de obter os modos naturais de flambagem do modelo, neste caso foi usado o 1º modo natural de flambagem, Figura 5-6;

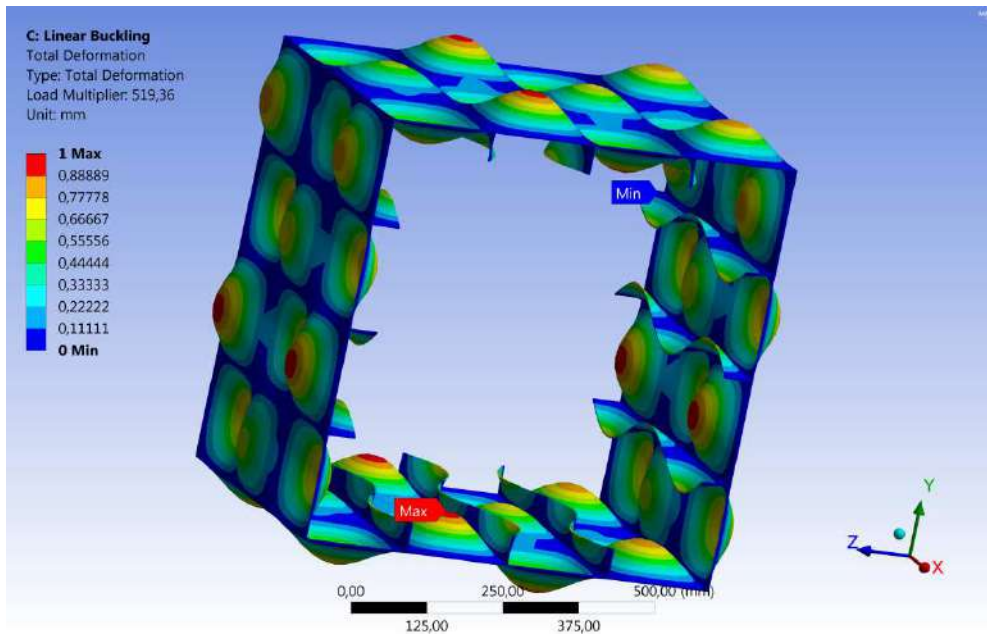


Figura 5-6 - 1º modo de flambagem natural, aumentado em 54 vezes.

- A solução do *Linear Buckling*, no modo de flambagem escolhido, foi inserida no comando UPGEOM que tem a função de aplicar e ampliar as deformações na geometria. Neste caso, o coeficiente, **0,9**, aplicado para ampliar as imperfeições geométricas foi obtido através da equação 5.1, DNV-OS-C401 Ch2. Sec 2E, Figura 5-7.

$$w_{max} = 0,005b \quad (5.1)$$

w_{max} = máxima amplitude recomendada.

b = espaçamento entre longitudinais.

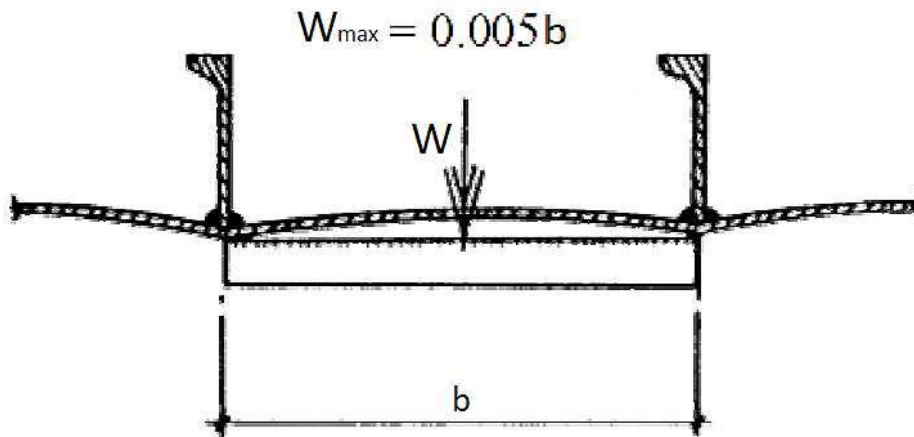


Figura 5-7 - Máxima amplitude recomendada. DNV (2010)

Na Figura 5-8, os valores **1** e **1** seguintes ao **0,9** são, respectivamente, o passo e o sub passo a ser considerado. Neste caso, o sub passo significa o primeiro modo natural de flambagem da geometria; e

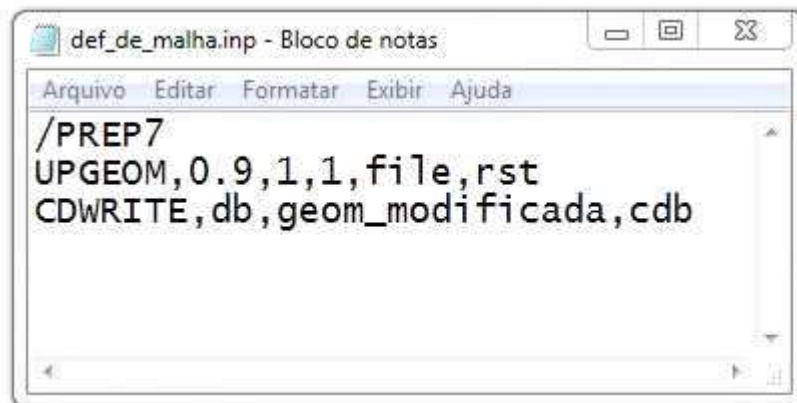


Figura 5-8 - Comando UPGEOM

- Após a deformação da geometria na amplitude desejada, a função UPGEOM gerou um arquivo **.CDB**, banco de dados com as informações de malha e do material, que foi inserido na ferramenta *Infinite Element Modeler* que tem, dentre outras, a função de gerar um arquivo de

geometria capaz de ser lido pela ferramenta *Model* do *Static Structural* para análise não linear do modelo.

O APÊNDICE-A mostra os passos anteriormente descritos.

5.4. Condições de contorno

A validação das condições de contorno usadas neste trabalho tomou por base as apresentadas por VAN-VU (2015) que são mostradas na Figura 5-9.

A e B representam os pontos remotos, e estes estão acoplados aos nós das bordas rigidamente se mantendo sempre no mesmo plano, porém estão livres nos demais graus de liberdade. Deste modo, os nós das bordas têm liberdade para deslocar nas direções x e y , além da rotação em z .

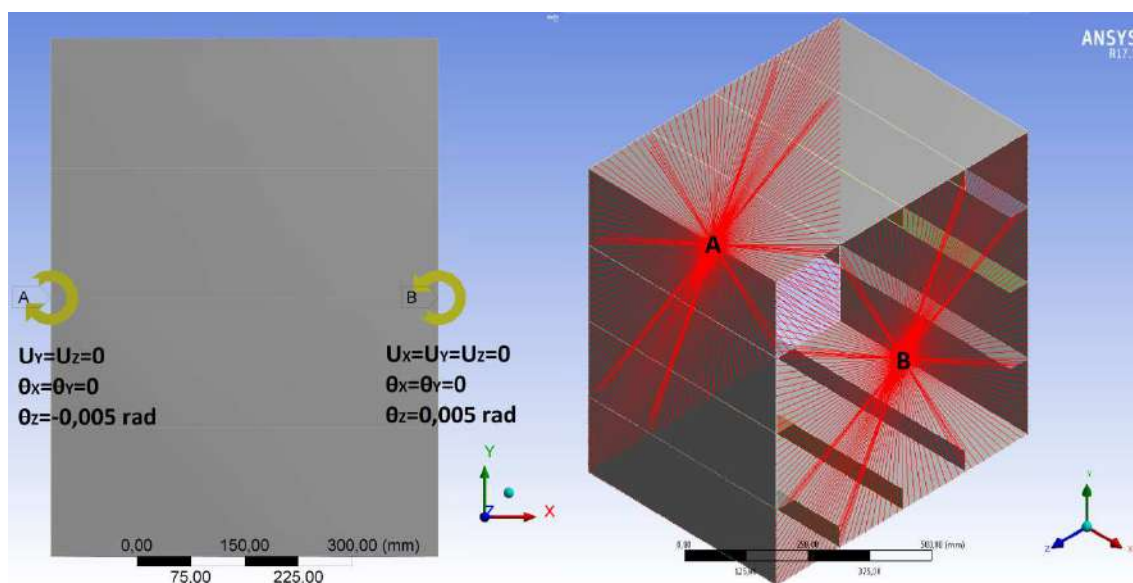


Figura 5-9 - À esquerda a figura mostra as condições de contorno, à direita, mostra os pontos remotos e os acoplamentos rígidos.

Os pontos remotos estão conectados aos nós das bordas das extremidades da seção e giram com a mesma rotação aplicada a estes pontos. A imagem à direita da Figura 5-9 mostra os graus de liberdade dos pontos remotos A com deslocamento livre

em x e rotação z de -0,005 rad, e B com rotação de 0,005 rad em z. Os demais graus de liberdade de ambos os pontos estão restritos.

5.5. Modelo para validação e resultados

O modelo foi simulado assumindo características semelhantes ao realizado por VAN-VU (2015). O programa usado para a análise foi o ANSYS17.1[®] WORKBENCH, o computador HP Z600 que possui a seguinte configuração: processador Intel[®] Xeon[®] X5650 2,67GHz e memória de 12GB de RAM. O tempo computacional total da simulação do modelo foi de 814 segundos e engloba todas as fases da análise, a linear, a obtenção dos modos de flambagem, a alteração da geometria e a análise não linear, processo descrito no item anterior e descrito no *Project Schematic* do ANSYS17.1[®] WORKBENCH apresentado no APÊNDICE-A. Observa-se que a última análise, a não linear, consumiu a maior quantidade de tempo, 790 segundos, cerca de 97% do tempo total, devido à sua complexidade numérica.

VAN-VU (2015) usou o método de RITZ no ABAQUS, função ARCLLEN no ANSYS, porém nesta análise optou-se por utilizar o método de Newton Raphson tendo em vista ser o método padrão do ANSYS, ser de mais rápida solução e produzir arquivo de solução menor, ou seja, menor custo computacional no que tange ao tempo e ao espaço em disco rígido. Além de ter por objetivo validar as condições de contorno não necessitando verificar com exatidão o comportamento de pós-flambagem e sim, somente, até o colapso da estrutura obtendo o momento máximo para comparação com os resultados obtidos pela literatura referência.

5.5.1. Resultados da validação e discussão

O momento máximo obtido após a flexão do modelo foi de $5,9603 \times 10^8$ Nmm, Figura 5-10, cabe salientar que nesta análise não se levou em consideração as tensões residuais referentes ao processo de fabricação, mesmo sem este importante fator, o resultado obtido teve 1,30% de diferença comparado com o experimento de Nishihara. Van-Vu obteve 1,62% de diferença quando comparado com o mesmo experimento, Tabela 5-3. Observa-se que o resultado obtido neste trabalho tem uma aderência maior

ao resultado original, e consequentemente valida as condições de contorno consideradas.

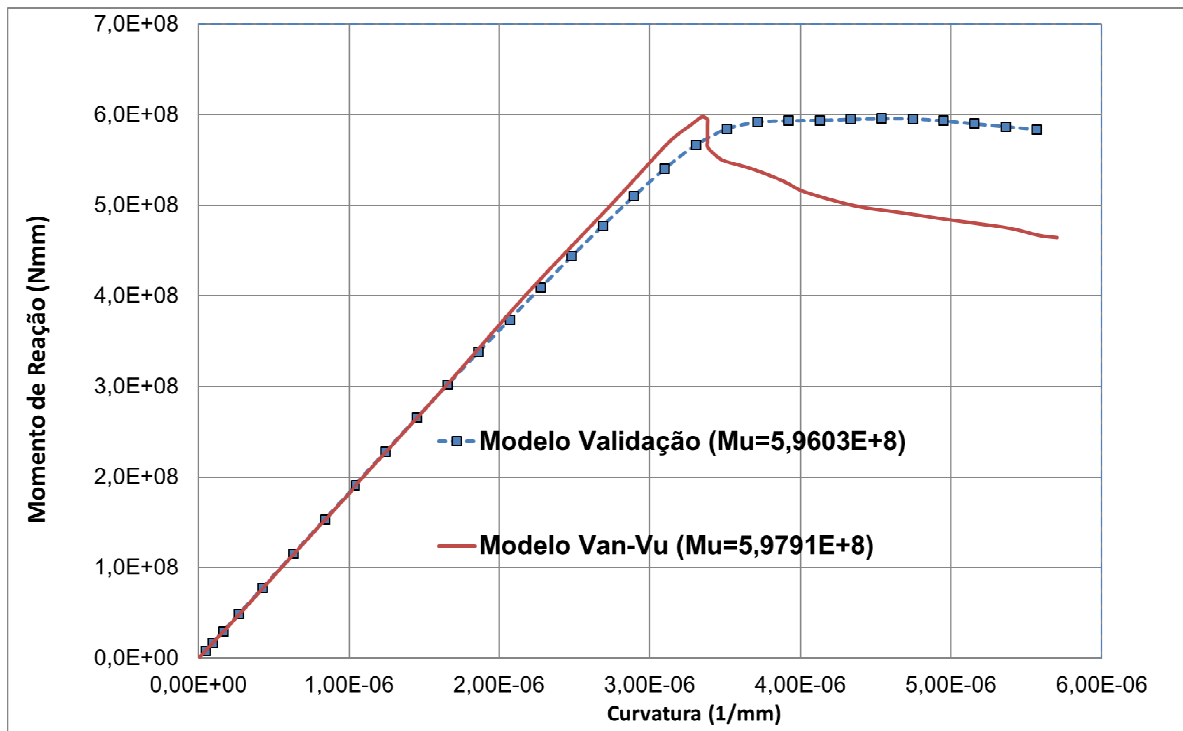


Figura 5-10 – Gráfico comparativo entre o resultado de Van-Vu e a caixa simulada

Tabela 5-3 - Tabela comparativa do resultado obtido com a literatura referência

Momento Último (E+8 Nmm)	MEF		
	Nishihara	Van-Vu	Validação
Tos./Alq.	5,884	5,9791	5,9603
Diferença		1,62%	1,30%

Observa-se uma diferença de inclinação e no topo das curvas obtidas por Van-Vu e no presente trabalho. A diferença de inclinação se deve ao comprimento do modelo que neste trabalho foi de 540mm e no de referência foi de 1620mm, TROVOADO (2010). A redução do modelo teve por propósito mitigar o tempo computacional da solução. Quanto à diferença no topo das curvas, isto ocorreu devido

ao método de solução utilizado no problema, Van-Vu trabalhou com o método dos arcos que tem maior sensibilidade na obtenção do comportamento no pós colapso, já no presente trabalho, optou-se pelo método de Newton Raphson que apresenta resultado menos custoso e satisfatório até o início do colapso global da estrutura.

6. ANÁLISE E RESULTADOS

Como dito anteriormente, no capítulo 1, esta análise tem por objetivo analisar e observar o colapso progressivo da estrutura de um navio militar. O dimensionamento desta estrutura marítima foi feito de acordo com as regras da RINAMIL (2011), e validado no *Leonard Hull*¹⁶, semelhantemente à Corveta Tamandaré (V35). As espessuras do chapeamento e dos perfis foram selecionados de acordo com os disponíveis no mercado nacional. O navio possui quatro conveses, sendo três contínuos de boreste (BE) a bombordo (BB) e um interrompido na parte central no sentido transversal ao navio. Um convés principal, ou seja, contínuo de proa à popa, dois intermediários e um no fundo sobre os a região do tanque que perfaz mais que 50% do fundo do navio e compõe a seção mestra. A Tabela 6-1 apresenta as principais dimensões do navio modelo.

Tabela 6-1 - Dimensões Principais do modelo idealizado.

Deslocamento (Δ) =	2650	Toneladas
Comprimento total (L_{OA}) =	104	Metros
Comprimento na Linha d'água (L_{WL}) =	94,9	Metros
Comprimento entre perpendiculares (L_{BP}) =	94,2	Metros
Boca máxima (B_W) =	11,47	Metros
Coefficiente de Bloco (C_b)=	0,55	-
Calado (T) =	4,3	Metros
Pontal (D) =	9,3	Metros
Velocidade Máxima Mantida (VMM) =	20	Nós

O arranjo estrutural foi dimensionado com os espaçamentos entre as cavernas de 1,05m e a cada dois espaços entre cavernas consecutivos foi posto uma caverna gigante, logo distando 2,1m entre gigantes. Já os espaçamentos entre longitudinais perfazem uma média de 350mm de distância entre si.

As alturas dos conveses em relação à linha de base são de 9,30m, 5,73m, 4,1m e 1m. As dimensões dos perfis longitudinais leves nos conveses, costados e fundo são HP 80x5, HP 100x6 e HP 120x7, respectivamente, as das sicordas são T 220x6-100x8 e T

¹⁶ Programa de apoio ao dimensionamento e validação da RINA.

250x6-140x8, e as dos chapeamentos do navio na região da seção mestra são de 8mm, 6mm, 8mm e 9,5mm, respectivamente, e estão representados na Figura 6-1, informações retiradas do *Leonard Hull*.

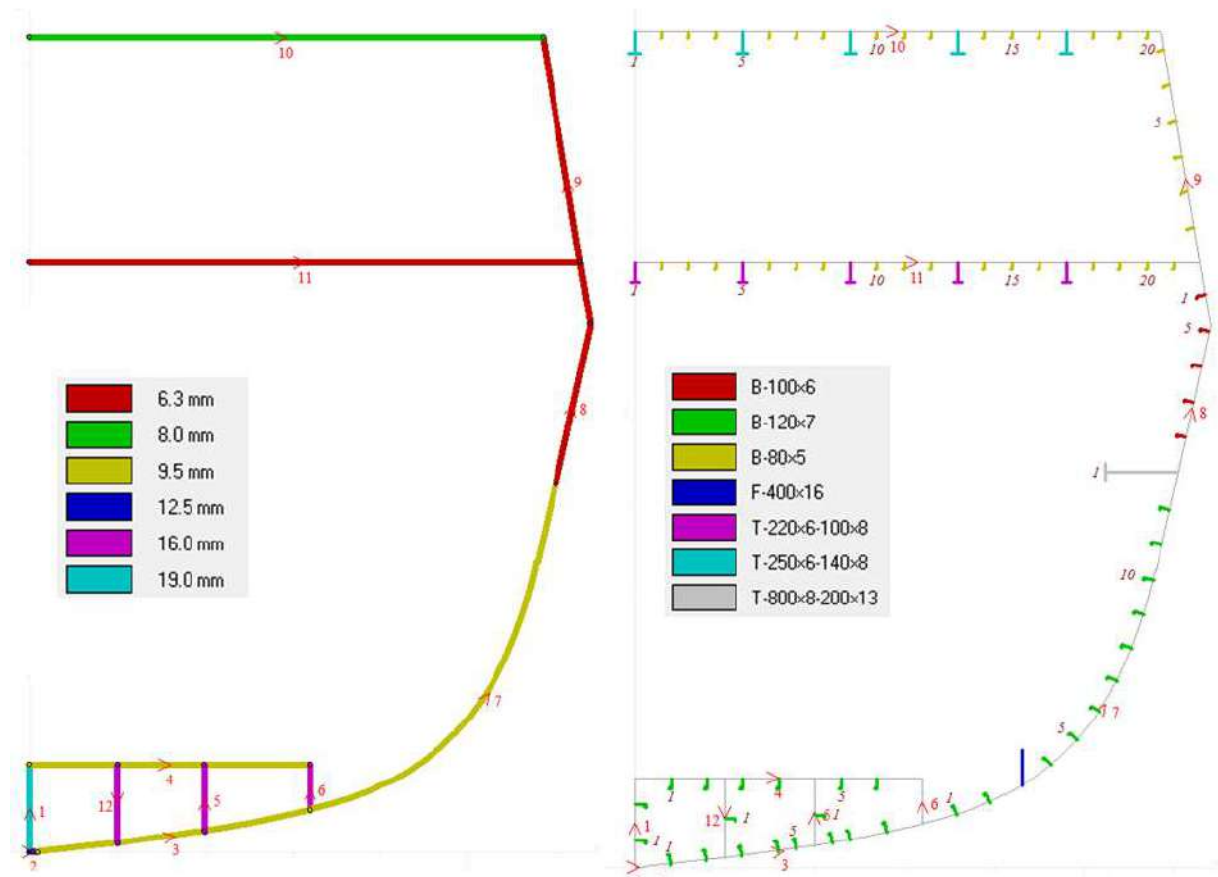


Figura 6-1 - Topologia do modelo de navio militar idealizado.

A metodologia empregada nesta análise foi semelhante ao desenvolvido no modelo de validação demonstrado no capítulo 5, porém devido ao tamanho do modelo, simulado em escala real, foi necessário aplicar algumas simplificações com o intuito de otimizar a análise sem perder qualidade de resposta.

Uma importante simplificação imposta ao modelo foi o da substituição dos perfis bulbo por chapa face de mesmo tamanho e espessura dos bulbos. A Figura 6-2 mostra os perfis e a Figura 6-3 mostra as duas seções mestras, composta por perfis bulbos e a com chapa face.

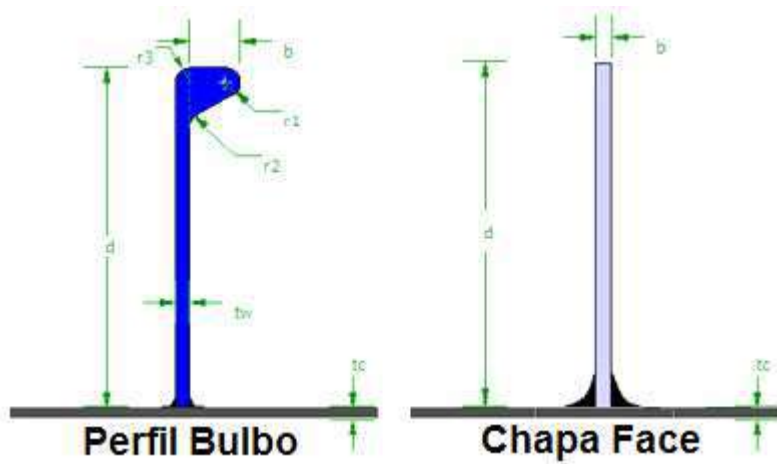


Figura 6-2 - À esquerda tem-se o perfil bulbo que foi substituído pela chapa face no modelo analisado.

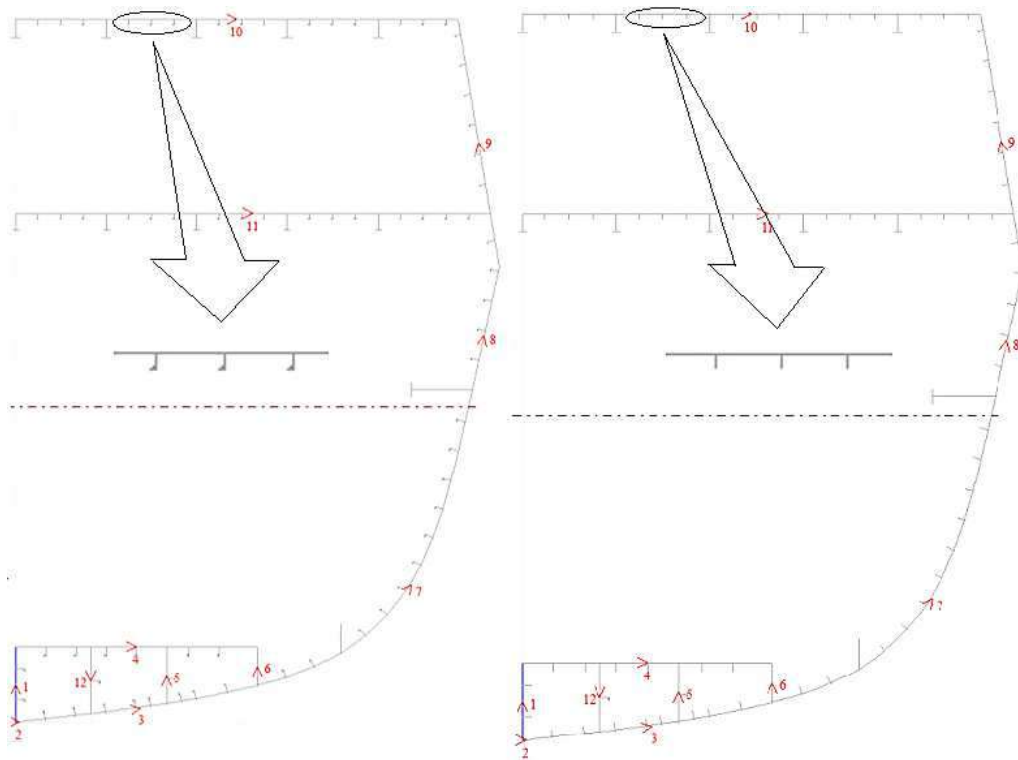


Figura 6-3 - À esquerda seção mestra do navio idealizado e, à direita, o simulado.

A mudança dos perfis de bulbo para chapa face tem como consequência direta o enfraquecimento do painel enrijecido, tendo em vista que a rigidez do reforçador diminui. A redução da rigidez do perfil é de 23%, Tabela 6-2, isto implica em maior

tendência de falha por flambagem no painel reforçado com a chapa face do que no com perfil bulbo.

Ainda, como consequência da substituição do perfil bulbo, observou-se que a linha neutra da seção mestra desceu, aproximadamente, 0,6% em relação à posição anterior que era de 4,165m, passando a ser de 4,141m na configuração com chapa face. Diante desta pequena modificação na posição da linha neutra, optou-se em considerar a altura da linha neutra do modelo simulado igual à do modelo idealizado que é de 4,165m.

Tabela 6-2 - Tabela comparativa dos módulos de rigidez

	w (cm ³)	W _{SM} (m ³)	LN (m)
Perfil CF 80x5	5,33	1,750	4,141
Perfil Bulbo 80x5	6,91	1,835	4,165
Diferença relativa	22,9%	4,7%	0,6%

W_{SM} – Módulo de rigidez da seção mestra em relação a convés principal

CF – Chapa face

W – Módulo de rigidez

LN_{SM} – Linha neutra

Cabe ressaltar que a consideração de substituir o perfil bulbo por chapa face no modelo simulado foi motivada pelo objetivo do trabalho que é o de observar o comportamento da estrutura da seção mestra até o colapso. Algo que não seria possível se fosse modelado como bulbo, pois em MEF ter-se-ia que representar por elemento de viga, que não mostraria o comportamento do perfil, ou por sólido que permitiria observar o comportamento, porém implicaria no aumento do custo computacional da solução.

A consequência direta desta substituição é a redução da rigidez global da estrutura do modelo simulado em relação ao idealizado, aproximadamente 4,7%, chegando ao colapso antes do esperado e com um momento atuante menor que o real, contribuindo, desta forma, diretamente com a segurança quando comparado com o real, no ponto de vista de projeto.

Outra simplificação importante aplicada ao modelo foi que se levou em consideração a simetria da estrutura no sentido boreste-bombordo, ou seja, transversal à

seção mestra, tendo em vista que diminui a quantidade de elementos e nós da malha e, conseqüentemente, a quantidade de equações necessárias a serem resolvidas pelo programa. Quanto ao comprimento do modelo, HUGHES, PAIK (2010) em sua obra *Ship structural analysis and design* considera seis técnicas de modelagem possíveis na representação do navio, quais sejam:

- Modelo do casco inteiro;
- Modelo de três compartimentos estanques adjacentes na região que compreenda a seção mestra;
- Modelo de dois compartimentos estanques adjacentes na região que compreenda a seção mestra;
- Modelo de um único compartimento estanque que contenha a seção mestra;
- Modelo de meio $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$ espaço de cavernas gigantes; e
- Modelo de um espaço entre cavernas gigantes.

Ressalta-se que ambos os modelos devem estar na região da seção mestra e contê-la, Figura 6-4. À medida que o modelo diminui, a eficiência computacional aumenta, em contrapartida o resultado perde um pouco em precisão. Logo, a escolha do modelo a ser simulado vai depender da confiabilidade necessária ao resultado.

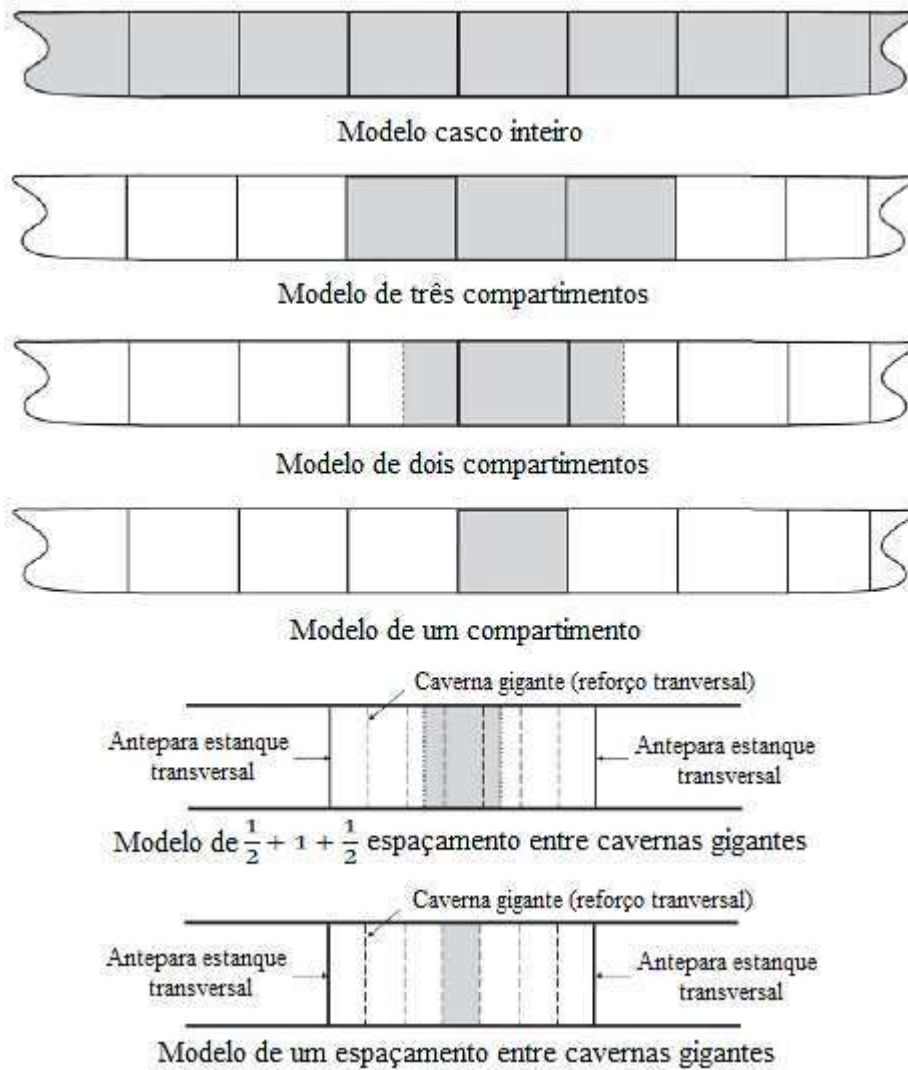


Figura 6-4 - Tipos de modelo para análise progressiva do colapso do casco pelo não-linear. HUGHES, PAIK (2010)

Neste caso, diferentemente do sugerido por VAN-VU (2015) optou-se por considerar somente um espaçamento de caverna gigante, última modelagem proposta por HUGHES, PAIK (2010) entendendo que o resultado pretendido na análise global seria alcançado mesmo com a redução do comprimento do modelo, de acordo com a referência.

6.1. Metodologia

A metodologia usada nesta parte do trabalho foi semelhante a apresentada nos capítulos 4,5 e 6, e representado, no diagrama de blocos, descrito na Figura 6-5.

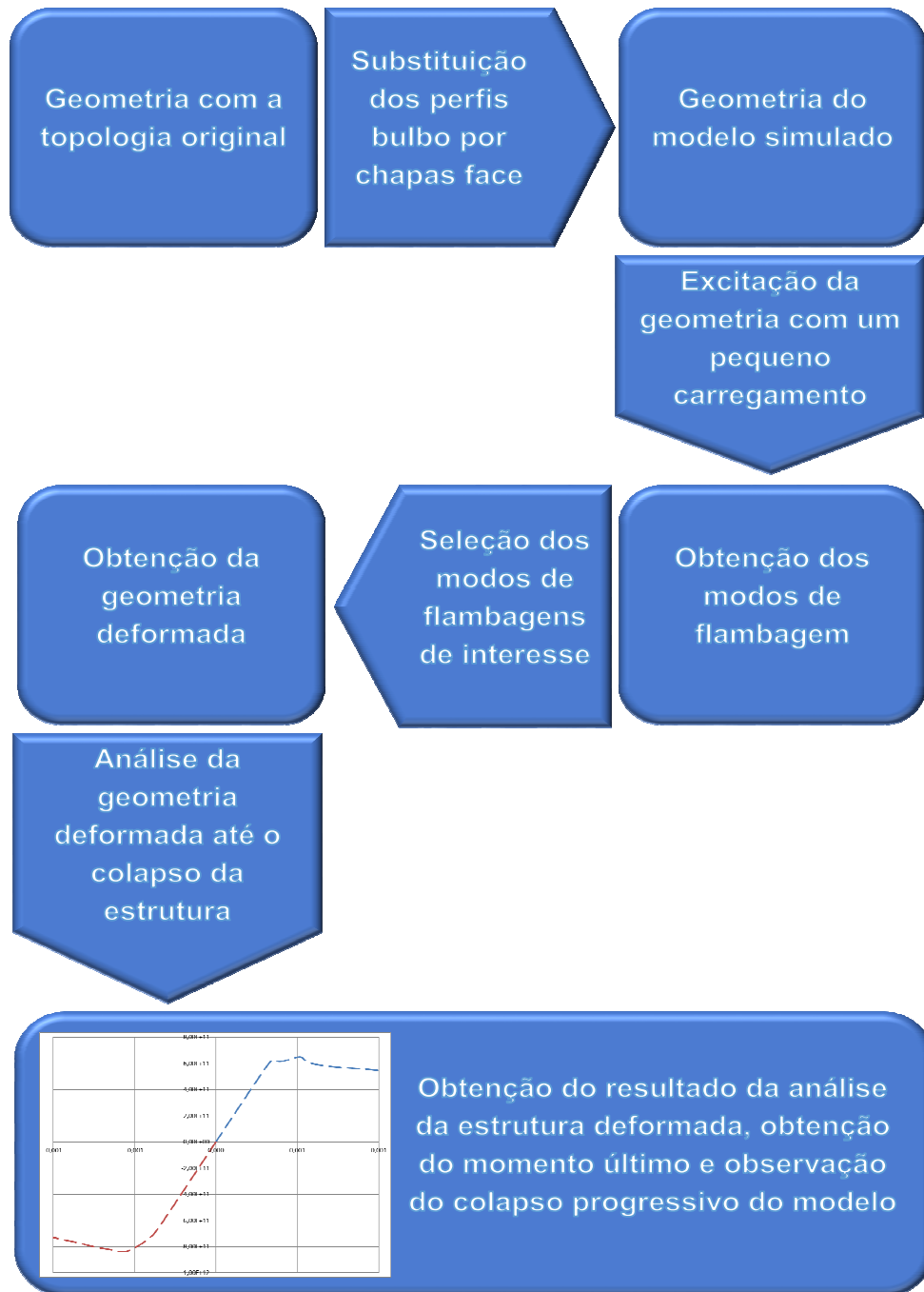


Figura 6-5 – Fluxograma metodológico

A partir da geometria do navio idealizado, ou seja, real, modelou-se na ferramenta CAD nativa do ANSYS®, o SPACECLAIM, a seção mestra que foi usada na simulação. Para tanto, como descrito anteriormente, assumiu-se a substituição dos perfis bulbo por perfis chapa face com o intuito de melhor mostrar os efeitos do colapso na estrutura. Seguidamente, com a geometria e usando a ferramenta *Linear Buckling*, obteve-se os modos naturais de flambagem da estrutura.

Foram selecionados alguns modos de flambagem para fazer parte da composição dos modos que amplificadas, no limite da norma, equação 5.1, foram inseridos na geometria através da ferramenta UPGEOM, dando origem, assim, à geometria que usada na simulação. Ressalta-se que não foram consideradas as imperfeições decorrentes do processo de solda de fabricação.

O passo seguinte foi a simulação na qual adotou-se uma abordagem não linear na análise devido às diversas instabilidades locais previstas até o colapso da estrutura. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho é observar o colapso progressivo da estrutura até o global que se dá, do ponto de vista gráfico, na região de mudança de comportamento da curva, de ascendente para descendente, de momento x curvatura, ou seja, quando a estrutura global perde rigidez.

6.2. Caracterização do Material considerado no modelo

O material do casco da embarcação foi considerado em aço ASTM A131 Gr AH36, aço semelhante aos usados nos Navios Patrulha Oceânico Classe Amazonas, recentemente adquiridos pela Marinha do Brasil numa compra de oportunidade da Inglaterra, o qual possui seguintes propriedades fornecidas pela norma RINAMIL (2011), Tabela 6-3.

Tabela 6-3 - Propriedades mecânicas do material do navio. Fonte: CPN

Tensão de escoamento	355 N/mm ²
Tensão máxima de ruptura	490 N/mm ²
Módulo de elasticidade	206000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3

Porém, para as análises foram utilizadas as propriedades mecânicas resultantes do experimento feito pela AIMEN¹⁷, SHI (2014), do qual foi obtida a curva tensão x deformação de engenharia do material mostrado na Figura 6-6 e transformada na curva tensão x deformação verdadeira, através das equações 6.1 e 6.2, e apresentada na mesma figura, distinguida pela curva de cor vermelha.

$$\sigma_{verd} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_{verd} = \ln (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (6.2)$$

A curva mostrada na Figura 6-7 foi inserida no ANSYS® através do *Engineering Data*; esta representa no gráfico de tensão verdadeira x deformação plástica. Ressalta-se que é mandatório para a análise que os dados de tensão e deformação sejam os verdadeiros para o cálculo dos efeitos decorrentes da plasticidade do material. Foi assumido como hipótese simplificadora que o aço utilizado na análise apresenta um comportamento elastoplástico, isotrópico e homogêneo.

¹⁷ *Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste*, instituto de pesquisa metalúrgica localizado em Madri, Espanha.

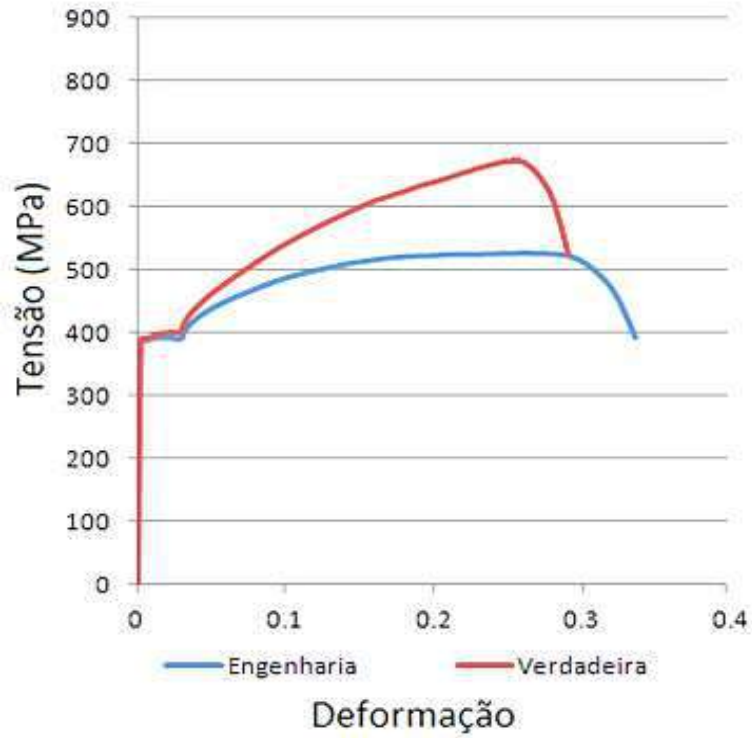


Figura 6-6 - Curva Tensão X Deformação de engenharia e verdadeira

	B	C
1	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (Pa)
2	0	3,8762E+08
3	0,047875	4,6158E+08
4	0,068207	4,9574E+08
5	0,087454	5,2595E+08
6	0,10433	5,4886E+08
7	0,12618	5,7525E+08
8	0,14049	5,9077E+08
9	0,15777	6,0843E+08
10	0,176	6,2212E+08
11	0,18777	6,3201E+08
12	0,20244	6,4136E+08
13	0,22643	6,5955E+08
14	0,24869	6,7171E+08
*		

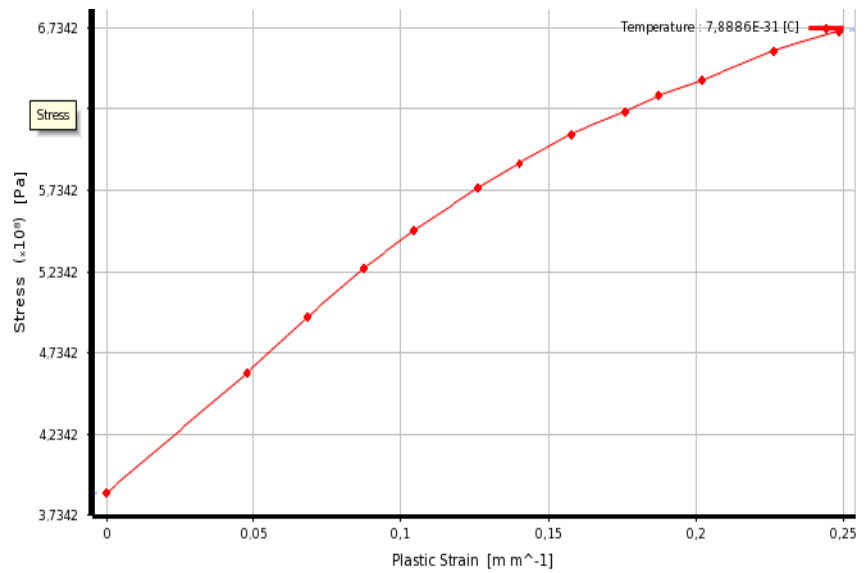


Figura 6-7 - Curva Tensão Verdadeira x Deformação Plástica, curva inserida no ANSYS como característica do material.

O material foi considerado elastoplástico, isotrópico, considerando que o material apresenta as mesmas propriedades físicas independente da direção considerada, e homogêneo, assumindo que o material possui um aspecto uniforme em sua composição.

O critério de falha de von Mises o de Máxima Energia de Distorção, foi adotado neste trabalho devido ao aço ser um material dúctil, ou seja, sua ruptura ocorrer após o surgimento de deformações plásticas irreversíveis no corpo. A equação 6.3 representa o critério num estado triplo de tensão em função das tensões principais.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6.3)$$

σ_e = Tensão de escoamento do material

σ_k = Tensão principal, sendo k=1,2 e 3

As propriedades mecânicas obtidas pela AIMEN estão representadas na Tabela 6-4 e os valores são as tensão e deformação de engenharia:

Tabela 6-4 - Propriedades mecânicas do material do navio. SHI (2014)

Tensão de escoamento	387 N/mm ²
Tensão máxima de ruptura	524 N/mm ²
Módulo de elasticidade	206000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3

A superestrutura desta embarção militar foi considerada ser de alumínio liga 5083-H116, a mais usada pela Marinha Brasileira em seus navios. Sua influência não foi considerada sobre o esforço longitudinal, tendo em vista que o comprimento de projeto é menor que 40% do comprimento de regra especificado pela norma RINAMIL

(2011). Além do mais, por hipótese, este navio contempla na superestrutura uma “mola mestra”¹⁸ na região mais solicitada pela flexão longitudinal do navio.

6.3. Estudo de convergência de malha do modelo

A malha deste modelo de seção mestra é composta de elementos SHELL 181, adequados para análises de estruturas de cascas finas, por serem constituídos por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, três de translações e três de rotações nos eixos x, y e z, além de ser adequado para análises lineares, não lineares e com grandes rotações e deformações tal como descrito no capítulo 4.1.

6.3.1. Convergência de malha

Para o dimensionamento da malha, com o intuito de obter o melhor resultado com o menor custo computacional empregado, foi feito um estudo de convergência de malha. O estudo foi realizado em uma parte com extensão de 1500mm da estrutura do convés 1 da seção mestra.

Foi imposto um deslocamento ao modelo, em ambos os lados e em sentidos contrários, de 3,5mm, totalizando 7mm. O modelo possui imperfeições iniciais inseridas a partir dos modos de flambagem da estrutura e a simulação foi procedida até o colapso do painel reforçado, Figura 6-8. As condições de contorno empregadas foram as de continuidade, Figura 6-9.

¹⁸ Junta de expansão composta por material elástico.

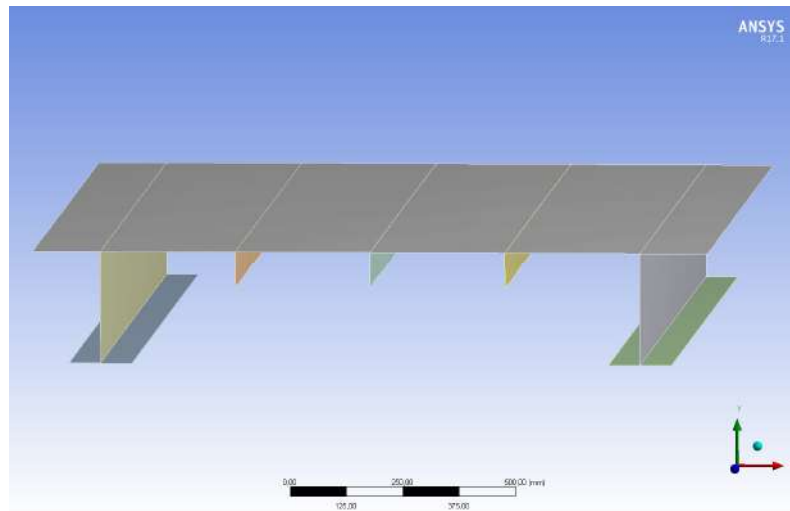


Figura 6-8 - Modelo da placa enrijecida

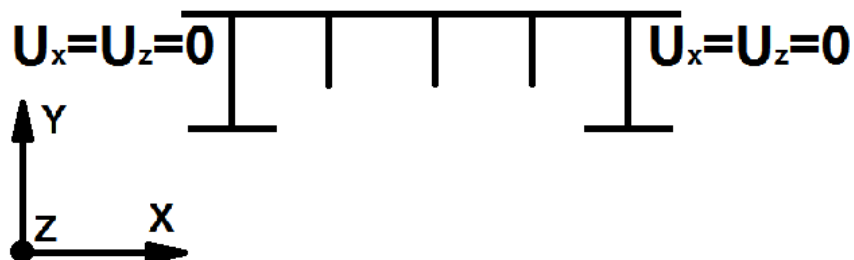


Figura 6-9 - condições de contorno da placa enrijecida

A convergência foi feita analisando as diferenças relativas das tensões de von Mises da estrutura para as malhas de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm e 70mm, APÊNDICE-C. Observou-se que a variação da resposta estava na ordem de 2%, no máximo, para o pior caso. A Figura 6-10 apresenta dois gráficos; o da esquerda mostra a variação de tensão von Mises pelo tamanho do elemento e o da direita mostra a porcentagem da diferença relativa das tensões.

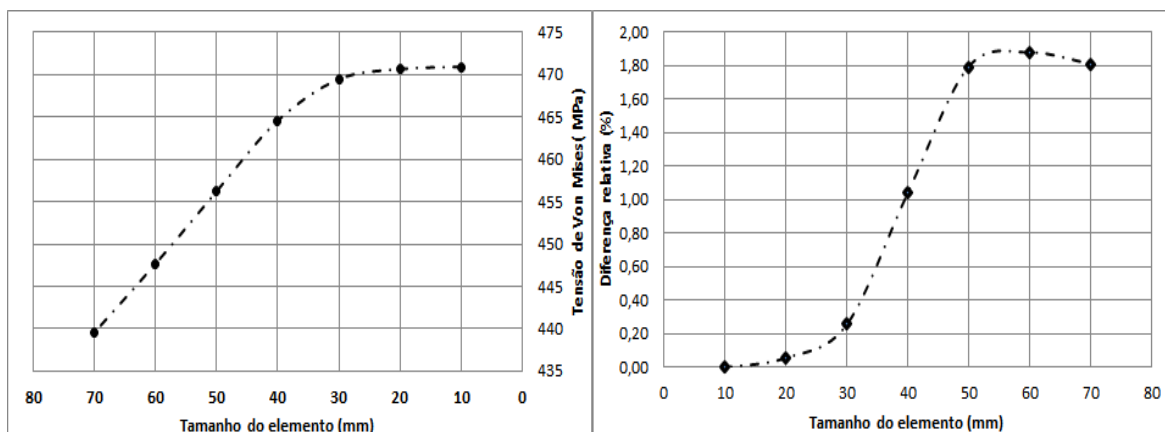


Figura 6-10 - Análise de convergência

Observando a diferença relativa pôde-se observar que a variação da resposta foi muito pequena, logo seria possível usar qualquer uma das dimensões de elemento apresentadas. Porém, HUGHES, PAIK (2010) dizem que para se obter a flambagem em um perfil seria necessário ter no mínimo três nós na alma, para que seja observado o fenômeno da flambagem. Com isso, o elemento utilizado nesta simulação foi de 40mm por ser a menor dimensão que proporciona a melhor divisão do perfil 80x5 e com razão de aspecto do elemento próxima de 1.

6.3.2. Malha do modelo simulado

A seção simulada teve sua malha composta de elementos triangulares e quadriláteros. Os triangulares estão localizados nas cavernas gigantes, isto porque seus resultados não têm tanta relevância para este trabalho. Já os quadriláteros permeiam todo o resto do modelo, a forma geral desejada foi o quadrado ou o retângulo com a razão de aspecto mais próxima de 1, pelo menos nas regiões de interesse, que são os conveses, os perfis e constado, Figura 6-11 a Figura 6-14. Segundo a ESSS (2014), a razão de aspecto influencia diretamente na qualidade da resposta.

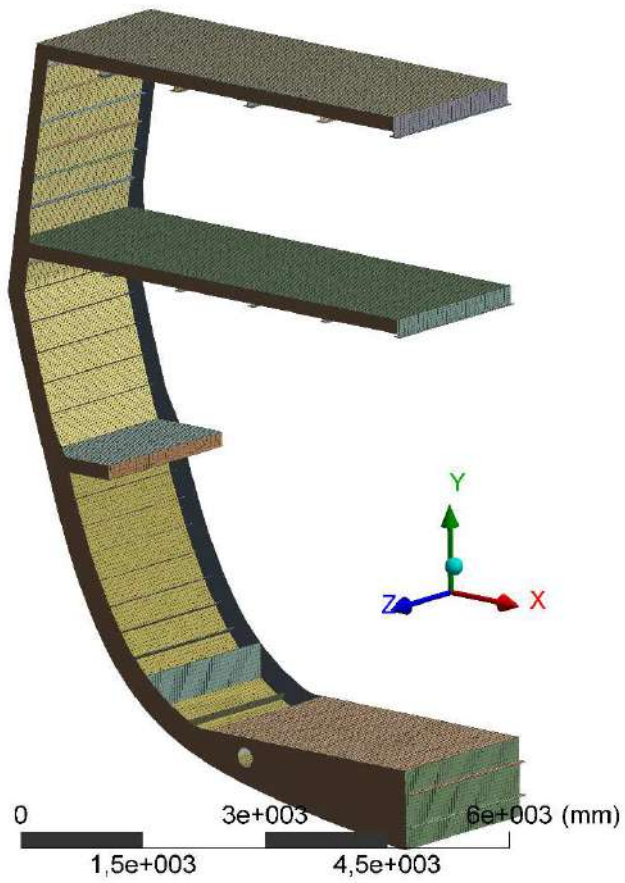


Figura 6-11 - Malha da seção mestra

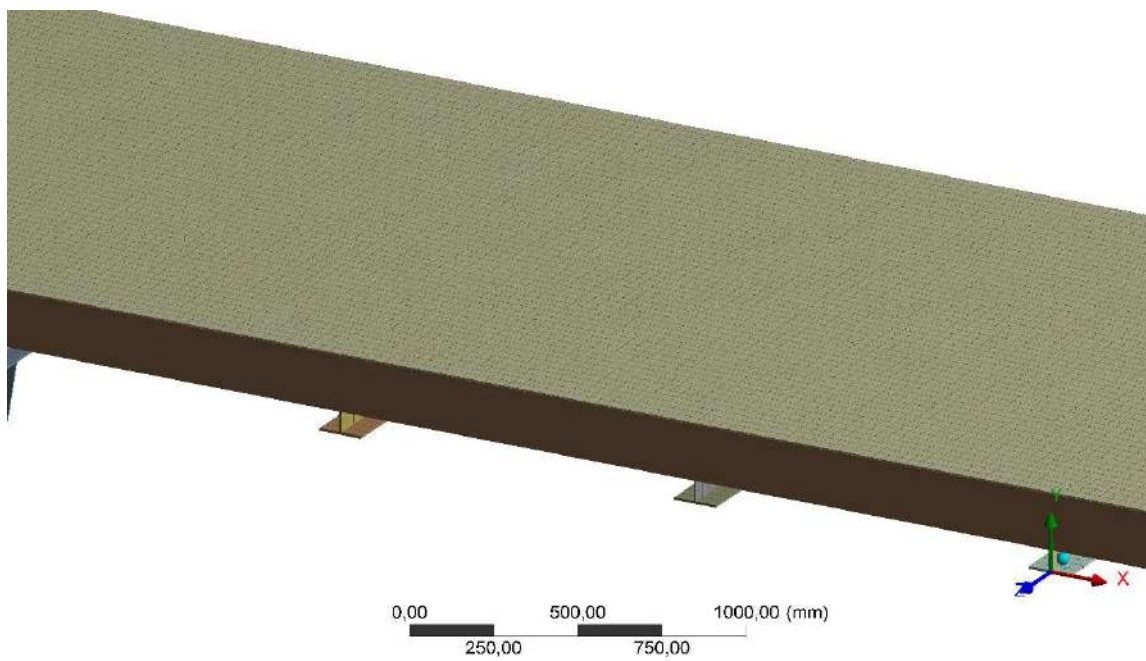


Figura 6-12 - Malha dos conveses

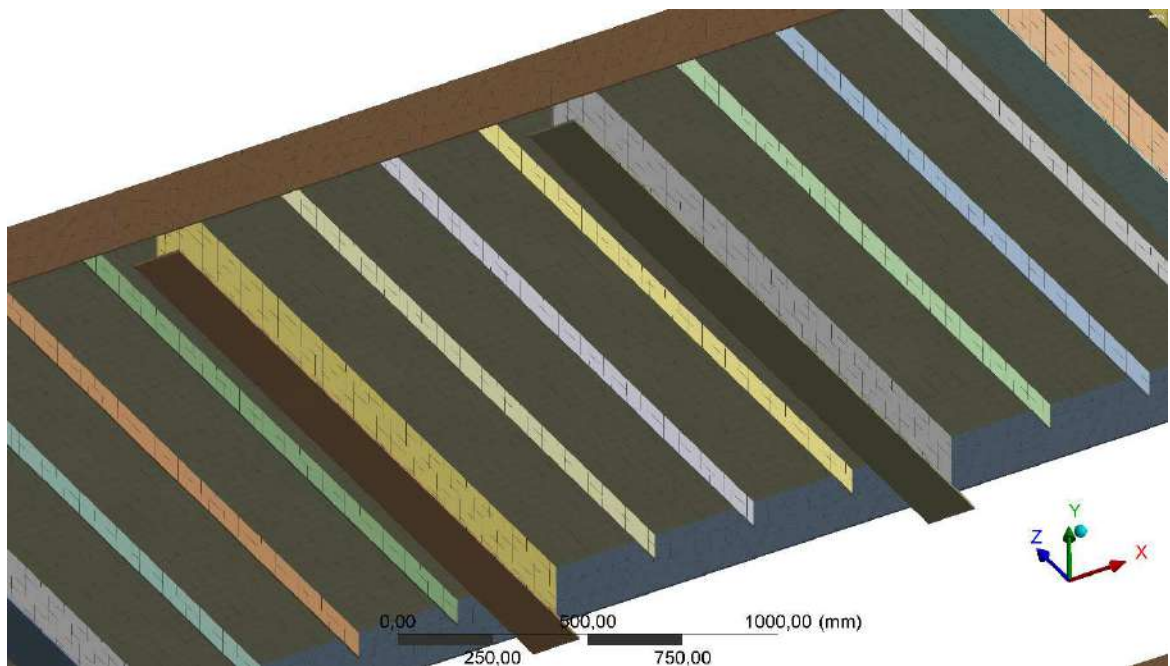


Figura 6-13 - Malha do convés e dos perfis

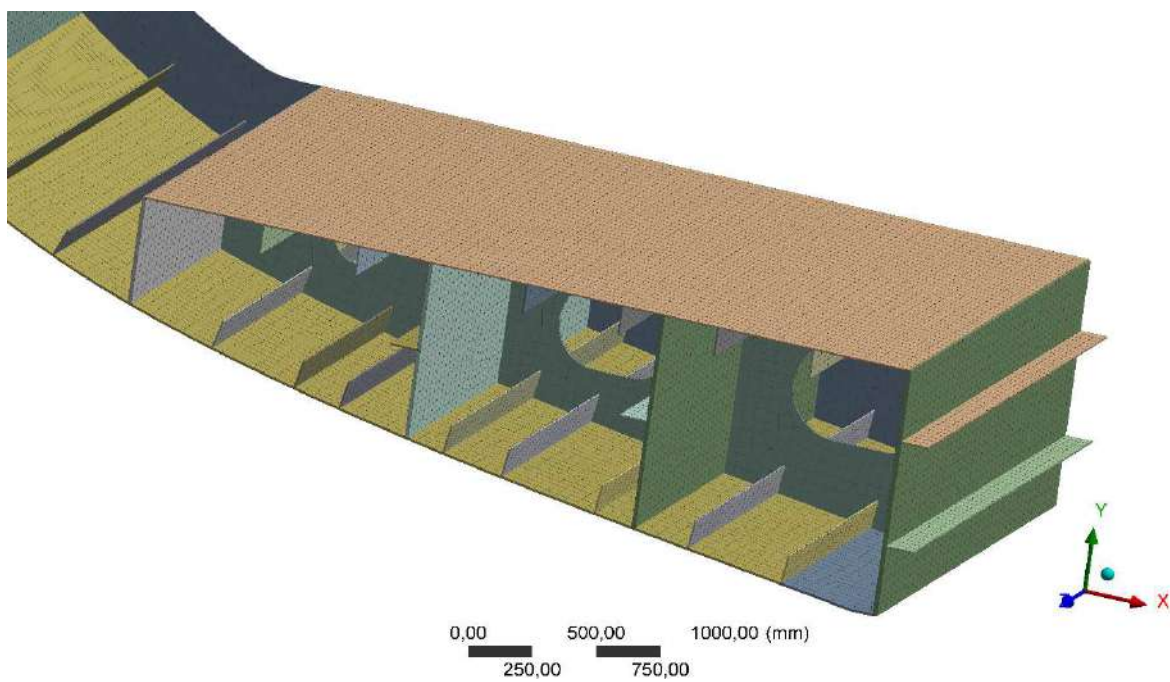


Figura 6-14 - Malha do fundo e de seus perfis

A Figura 6-15 mostra a estatística de elementos no que tange à qualidade da malha. Salienta-se que a qualidade da malha é fundamental para a acurácia do resultado além de facilitar a convergência. As colunas em amarelo representam os elementos de quatro lados (QUAD4) e as em azul, representam os elementos de três lados (TRI3). Cabe ressaltar que os elementos SHELL 181 apresentam melhores resultados quando forem quadriláteros, logo observe-se que a malha do modelo é constituída, predominantemente, de elementos QUAD4. A Tabela 6-5 mostra a quantidade, qualidade e razão de aspecto dos elementos usados no modelo de simulação.

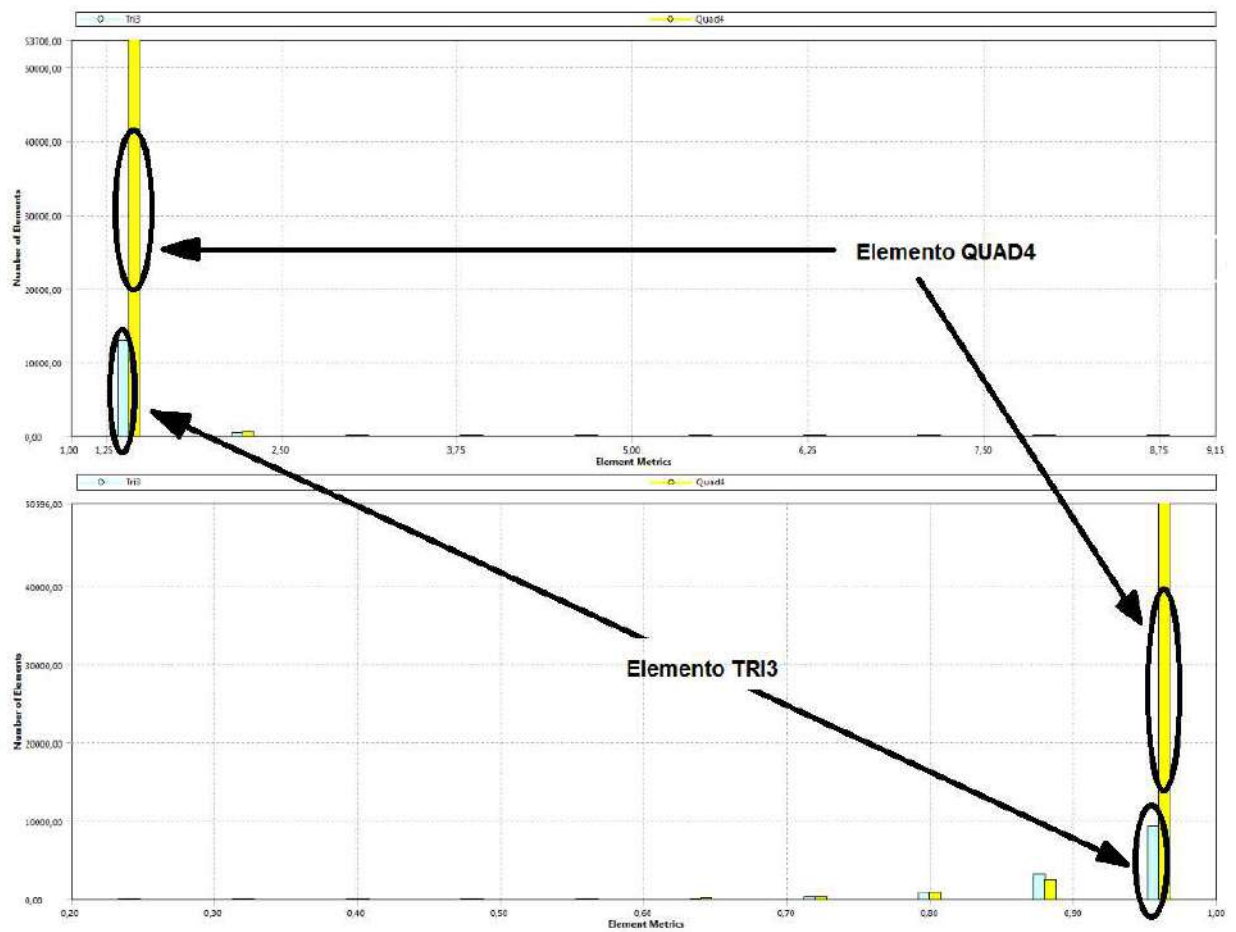


Figura 6-15 - Estatística de malha

Tabela 6-5 - Quantidade, qualidade e razão de aspecto dos elementos

Tipo	Nós	Elementos
Quantidade	67588	60934
	Qualidade	Razão de Aspecto
Mínimo	0,2004	1
Máximo	0,9999	9,1503
Média	0,9711	1,1337
Desvio Padrão	0,0478	0,1775

Observa-se, na Tabela 6-5, que a razão de aspecto, que representa o quociente entre a base do elemento e a altura, tem o valor mínimo igual a 1 e a média está muito próxima de 1, significando a pouca existência de elementos discrepantes. Quanto à qualidade do elemento, observa-se que o valor máximo é 0,9999 e que a média é 0,9711, devido a qualidade do elemento ser a razão entre a área do elemento pelo seu volume, e este ser um elemento tipo *shell*, entende-se que o melhor valor é o próximo da unidade, segundo ESSS (2014).

6.4. Imperfeições geométricas

Neste modelo, para a análise, foram inseridas imperfeições geométricas na estrutura com o intuito de aproximar da realidade o modelo. O ANSYS oferece, pelo menos, três opções para isso, quais sejam:

- primeiro, inserir as imperfeições na geometria, quando em criação, através de um programa CAD;
- segundo, inserir perturbações com a geometria criada através de função específica do programa, perturbação esta aleatória na superfície. Porém, dificilmente poderá ser reproduzida outra geometria similar; e
- terceira, com a geometria, através do ANSYS, obterá os modos naturais de flambagem e serão selecionados alguns deles para serem inseridos na geometria através da função UPGEOM.

Das três opções, foi implementada neste trabalho a terceira, por oferecer maior vantagem sobre as outras devido à facilidade de implantação, apesar do tamanho da estrutura e dos diversos modos de flambagens possíveis. Além do mais, a primeira demanda conhecimentos profundos no programa CAD escolhido e o segundo, não garante a possibilidade de reproduzir as imperfeições na geometria por ser uma perturbação aleatória.

As imperfeições geométricas foram obtidas através da obtenção dos 300 primeiros modos de flambagem naturais do modelo, dos quais foram selecionados 12 modos (2, 9, 10, 13, 17, 20, 21, 159, 173, 190, 219 e 258) para inserção na geometria, os modos de flambagem natural e suas respectivas imagens estão representadas no APÊNDICE-B. Para a análise não foram consideradas as tensões residuais geradas em decorrência do processo de soldagem na fabricação. De acordo com TROVADO (2010), a perda em capacidade de carga é da ordem de 10%, podendo ser desconsiderados no efeito global.

6.5. Condições de contorno e carregamentos

As condições de contorno utilizadas na análise são semelhantes às aplicadas no modelo de validação. A Tabela 6-6 mostra as condições de contorno da seção mestra.

Tabela 6-6 - Condições de contorno aplicados às extremidades do modelo

Localização do nó de referência	Translação			Rotação		
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Proa do modelo	fixo	fixo	fixo	fixo	fixo	-
Popa do modelo	fixo	fixo	-	fixo	fixo	-

Para a aplicação das condições de contorno foi utilizada a ferramenta *Remote Displacement* que permite aplicar condições de deslocamento e rotações nos diversos eixos em um determinado nó de referência e conectá-lo à estrutura por conexões rígidas, permitindo que as condições impostas ao nó de referência sejam transmitidas aos nós

ligados a ele. Desta forma, foram impostas restrições de deslocamentos e rotações aos nós de referência A e B, respectivamente proa e popa do modelo, posicionados sobre a linha neutra do modelo da seção mestra, Figura 6-16. Através desta mesma ferramenta foi inserido no modelo o carregamento, neste caso, de rotação, que se torna deslocamentos nas posições ao longo dos planos transversais ao modelo e que contêm os nós A e B.

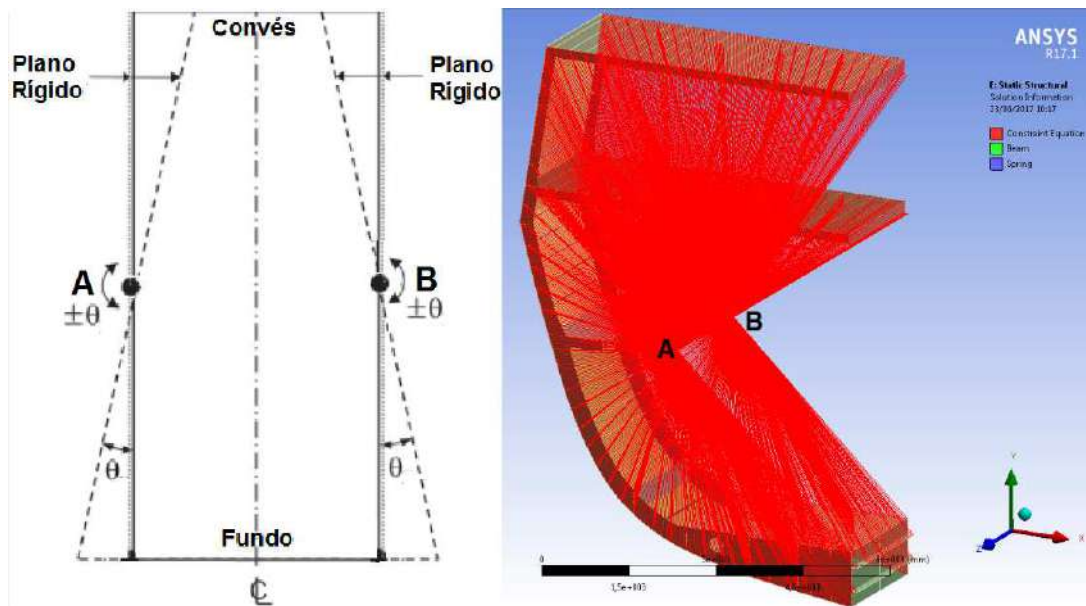


Figura 6-16 - Nós de referência na seção mestra

A rotação imposta nos nós de referência das extremidades do modelo foi dividida em três intervalos e aplicados um a um em cada passo, Tabela 6-7.

Tabela 6-7 - Rotações aplicada nos nós A e B

Passos	1	2	3
$\theta_z \times 10^{-4}$ rad	3,5	7	10,5

6.6. Solução

Segundo BATHE (2006) o problema de uma análise não linear está em encontrar a posição de equilíbrio da estrutura que está sob a influência de forças aplicadas. A análise de flambagem em uma estrutura, principalmente na vizinhança de seu colapso global, se configura em uma análise não linear. Para tanto o ANSYS oferece dois métodos de resolução, o método dos arcos (ARCLEN), também conhecido como método de RITZ, e o Newton Raphson.

Segundo o manual do ANSYS® 17.1 o método dos arcos é a adequado para ser usado em solução de equilíbrio estático não linear de estruturas instáveis. Isto porque o método dos arcos consiste, resumidamente, na geração de arcos com raios proporcionais ao passo de carga empregado para fazer as iterações e atingir a convergência. Os arcos são gerados sucessivamente até a convergência total ou parcial do modelo podendo aumentar ou diminuir dependendo da curva Força x Deslocamento, Figura 6-17. Este método é mais o indicado para analisar o comportamento da estrutura no pós flambagem por seguir mais fielmente as inclinações da curva Força x Deslocamento e a representação do pós colapso, não apresentando dificuldade de convergência quando a curva de carga for composta por regiões com tangentes nulas e negativas.

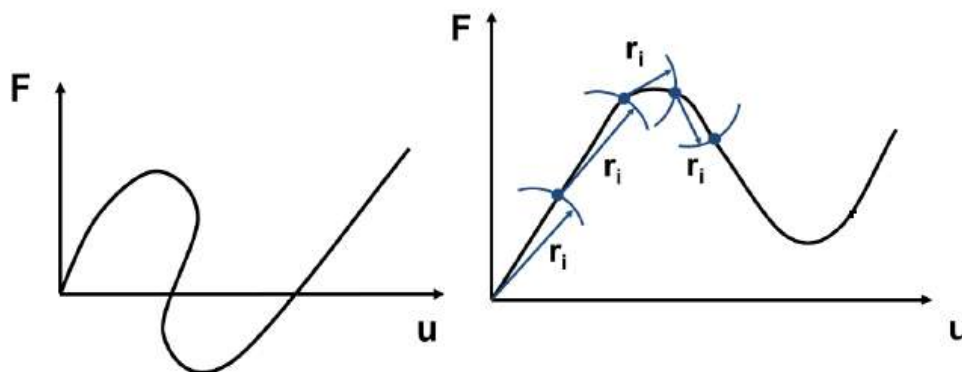


Figura 6-17 -À esquerda, curva com "snap through", estrutura estaticamente instável e à direita mostra uma ideia como método dos Arcos. Fonte: ANSYS

O método de Newton Raphson por sua vez é constituído de uma sequência de iterações lineares, que tem por propósito aproximar o comportamento da curva através de retas tangentes, Figura 6-18. O método é muito usado por ser eficiente e de simples implementação, porém se a curva apresentar pontos de tangente nula o método tende a divergir. Para solucionar tal dificuldade de convergência os programas de MEF, assim como o ANSYS®, oferecem uma ferramenta adicional para ser usada com o método que é a estabilização.

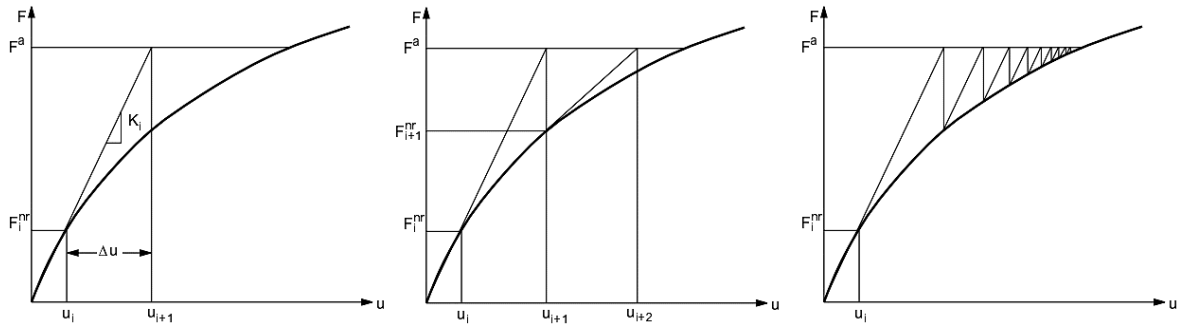


Figura 6-18 - Iterações do Método Newton Raphson. Fonte: ANSYS

A estabilização consiste na utilização de um coeficiente de amortecimento que tem por finalidade diminuir a “velocidade de deformação” da estrutura, simulando a imersão da estrutura em óleo viscoso. O coeficiente usado tem que ser o menor possível, e de preferência somente na região necessária, a fim de não interferir no resultado da análise. O tutorial do ANSYS®17.1 diz que é aconselhável que a razão entre *Stabilization Energy* (energia dissipada pelo método da estabilização) e *Strain Energy* (energia potência de deformação) não ultrapasse de 5% na região de interesse.

Comparando os dois métodos observa-se que o dos arcos apresenta maior capacidade e acurácia na obtenção de soluções de análises não lineares devido à forma que se procede as iterações. Já o com o método de Newton Raphson, apesar de ter maior dificuldade na obtenção da solução em análises deste tipo, pode-se adquirir melhores resultados fazendo uso da estabilização e do aumento de sub passos a de fim diminuir a “velocidade” de deformação e o incremento de carga, resultando em maior obtenção de pontos nas regiões de maiores dificuldades de convergência da curva.

Neste trabalho, optou-se por usar o método Newton Raphson por ser nativo do programa, ter solução mais rápida, produzir arquivos de respostas menores e pelo objetivo do trabalho ser de observar colapso progressivo da estrutura até a perda de rigidez global, não interessando assim, os resultados no pós colapso ou pós flambagem.

6.7. Resultados

Os resultados seguintes foram obtidos através de simulações feitas a partir do hardware e programa descrito no item 5.5 deste trabalho.

A simulação da flexão longitudinal pura em alquebramento e tosamento obteve como resultado o gráfico representado na Figura 6-19.

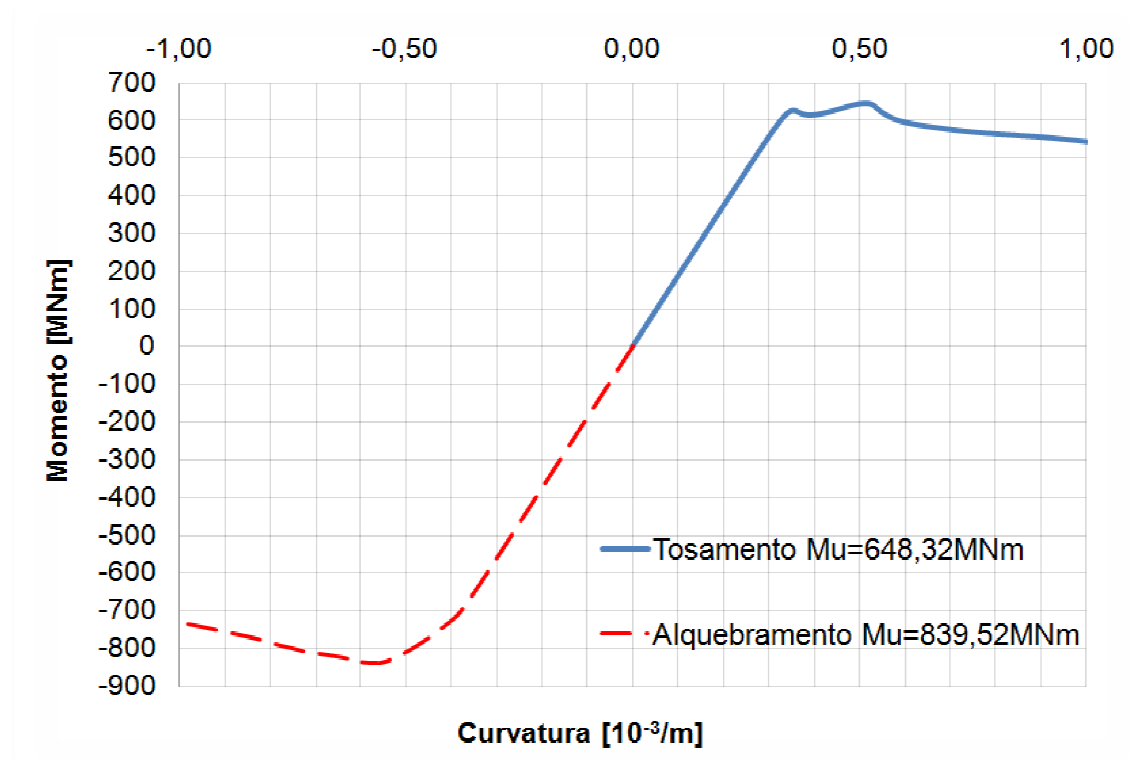


Figura 6-19 - Momento Curvatura

Observa-se no gráfico uma notável diferença no comportamento da curva entre a parte superior, tosamento, e inferior, alquebramento. Em tosamento nota-se que a curva

tem duas ondulações as quais representam duas perdas de rigidez consecutivas, da seção mestra. Esta ocorrência se deve, principalmente, à existência de dois conveses acima da linha neutra. Por serem painéis reforçados plano, por estarem mais distantes da linha neutra, 5135mm, e por, conseqüentemente, sofrerem os maiores esforços compressivos estão mais propícios ao colapso por flambagem.

Já em alquebramento, a curva apresenta somente uma ondulação, com o raio de curvatura bem maior que as ondulações em tosamento. Isto se deve à rigidez estrutural da parte do navio localizado abaixo da linha neutra, 4165 mm acima da linha de base. Esta estrutura do fundo do navio é composta por painéis reforçados curvos, bojo e fundo, com maior resistência a esforços compressivos; um painel reforçado plano, convés 4; e longitudinais robustos tais como quilha e quilhas laterais.

A posição da linha neutra na análise das tensões atuantes na seção mestra é muito importante, pois se a linha neutra estiver mais próxima de um dos conveses o oposto sofrerá maiores tensões na flexão. Neste caso, a linha neutra está mais próxima do fundo. Logo, a tensão no convés 1, para uma mesma curvatura e momento, será maior que a do fundo. Isto ocorre porque considerando a equação 3.5 aplicada na 3.4 obtêm-se:

$$W_{fundo} = \frac{I}{y_{fundo}} \text{ sendo que } y_{convés} > y_{fundo}$$

Logo:

$$W_{fundo} > W_{convés}$$

Módulo de rigidez do fundo é maior que o do convés.

Sabendo que $\sigma = \frac{M}{W}$ tem-se:

$$\frac{M}{W_{fundo}} < \frac{M}{W_{convés}} \text{ conseqüentemente, } \sigma_{fundo} < \sigma_{convés}$$

As Figura 6-20 e Figura 6-21 mostram a estrutura colapsada e o estado de tensão representado pela tensão de von Mises em tosamento e alquebramento.

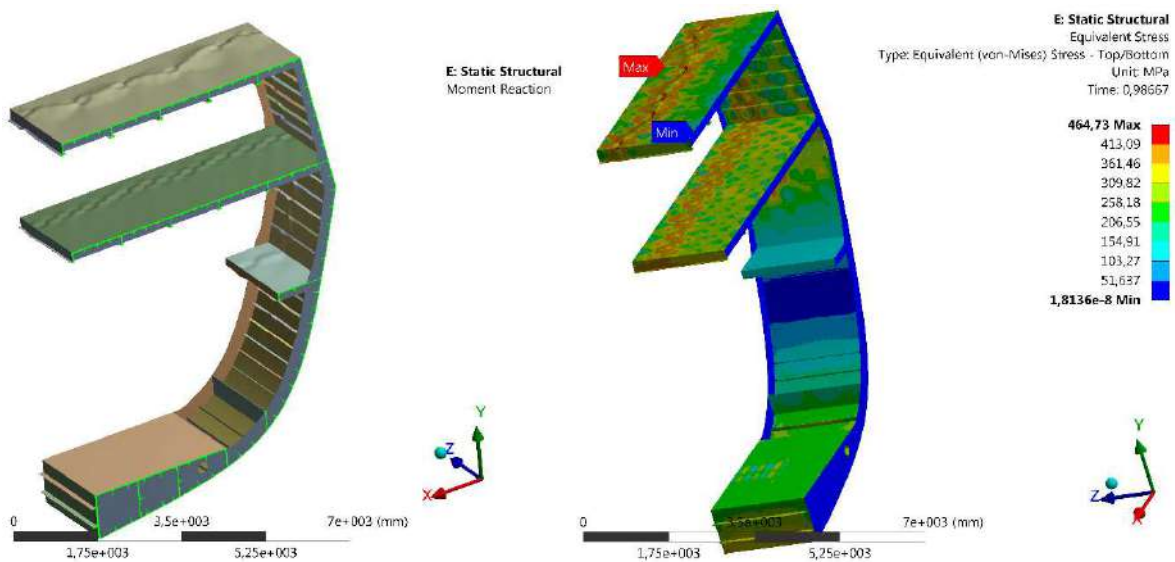


Figura 6-20 - Seção mestra colapsada em tosamento

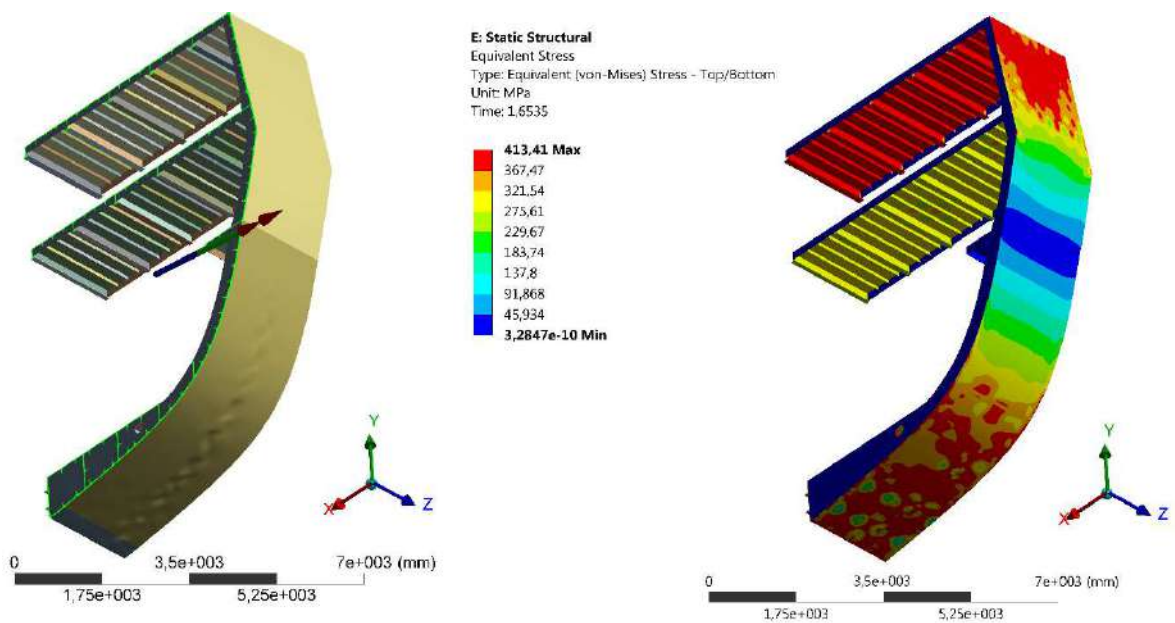


Figura 6-21 - Seção mestra colapsada em alquebramento

As Tabela 6-9 e Tabela 6-9 mostram os valores das tensões nas diversas partes do navio no colapso da estrutura, tais como: conveses, fundo, perfis leves e pesados.

Tabela 6-8 - Tensão de von Mises em locais principais no colapso em tosamento

TOSAMENTO				
Nº	LOCAL	CURVATURA [1/m]10 ³	MOMENTO [MNm]	TENSÃO [MPa]
1	Painel Convés 1-1	0,316	585,22	391,29
2	Painel Convés 1-2	0,323	595,54	391,12
3	Painel Convés 1_3	0,323	595,54	389,19
4	L3-Painel-Convés 1-3	0,329	605,24	327,37
5	L1-Painel Convés 1-1	0,335	614,1	371,03
6	Sicorda Lat.-1 Convés 1	0,348	627,04	366,2
7	Sicorda Lat.-2 Convés 1	0,348	627,04	366,18
8	Sicorda Lat.-3 Convés 1	0,348	627,04	358,78
9	Painel-Convés 1-4	0,348	627,04	388,41
10	Painel-Convés 1-5	0,348	627,04	391,13
11	L1_Painel-Convés 1-5	0,348	627,04	387,68
12	L1-Costado Sup.	0,348	627,04	369,6
13	Sicorda Lat.-4 Convés 1	0,354	629,08	387,63
14	L2_PainelConvés 1_5	0,354	629,08	387,69
15	L3_Painel-Convés 1_4	0,354	629,08	321,65
16	L3_Painel-Convés 1_5	0,354	629,08	377,25
17	Painel-Costado_Sup	0,354	629,08	393,21
18	Sicorda Central Convés 1	0,361	627,96	378,13
19	L2-Costado Sup.	0,361	627,96	377,48
20	L3-Costado Sup.	0,386	616,86	387,89
21	L4-Costado Sup.	0,386	616,86	346,56
22	Sicorda Lat.-3 Convés 2	0,519	648,02	371,45
23	Sicorda Lat.-4 Convés 2	0,519	648,02	380,15
24	Sicorda Central Convés 2	0,526	646,36	355,25
25	Sicorda Lat.-1 Convés 2	0,526	646,36	387,66
26	Sicorda Lat. Convés 2	0,526	646,36	363,16

Tabela 6-9 - Tensão de von Mises em locais principais no colapso em alquebramento

ALQUEBRAMENTO				
Nº	LOCAL	CURVATURA [1/m] 10 ³	MOMENTO [MNm]	TENSÃO [MPa]
1	Chapa Quilha	-0,314	-587,06	394,15
2	Chapa Fundo-1	-0,407	-733,34	391,43
3	L1-Fundo	-0,459	-779,12	376,05
4	L1-Convés 4	-0,471	-788,68	387,85
5	Quilha Lateral-3	-0,474	-791	388,72
6	Chapa Fundo-2	-0,486	-799,92	390,84
7	Chapa Fundo-3	-0,486	-799,92	390,84
8	Chapa Bojo-1	-0,486	-799,92	389,27
9	L5-Convés 4	-0,492	-804,18	388,25
10	L3-Fundo	-0,495	-806,24	334,45
11	L6-Fundo	-0,515	-818,6	371,03
12	L5-Fundo	-0,518	-820,32	370,85
13	L7-Fundo	-0,533	-828,08	377,46
14	Quilha Lateral-2	-0,538	-830	388,27
15	Quilha Lateral-1	-0,542	-831	388,16
16	L5-Convés 4	-0,545	-831,32	388,25
17	L4-Fundo	-0,547	-831,58	342,98
18	L2-Quilha Central	-0,551	-832,34	387,72
19	Quilha Central	-0,551	-832,34	389,11
20	Chapa Bojo-2	-0,559	-832,4	390,24
21	L3-Convés 4	-0,575	-830,96	388,43
22	Chapa Costado-1	-0,644	-817,18	389,48
23	L2-Convés 4	-0,659	-814,84	388,3
24	L4-Convés 4	-0,666	-813,82	389,12
25	L1-Quilha Central	-0,667	-813,68	367,1
26	L1-Quilha Lateral-1	-0,667	-813,68	388,45
27	L1-Quilha Lateral-2	-0,667	-813,68	381,72
28	Chapa Costado-2	-0,667	-813,68	304,93

A Figura 6-22 mostra, na forma de gráfico, a sequência de falhas em tosamento e alquebramento. A parte superior do gráfico mostra o tosamento e a inferior o alquebramento. A Tabela 6-10, que é a fusão das Tabela 6-8 e Tabela 6-9, omitindo a tensão, apresenta os pontos na ordem da ocorrência da falha em cada tipo de flexão. A tabela mostra o local, a curvatura e o momento que ocorre a flambagem.

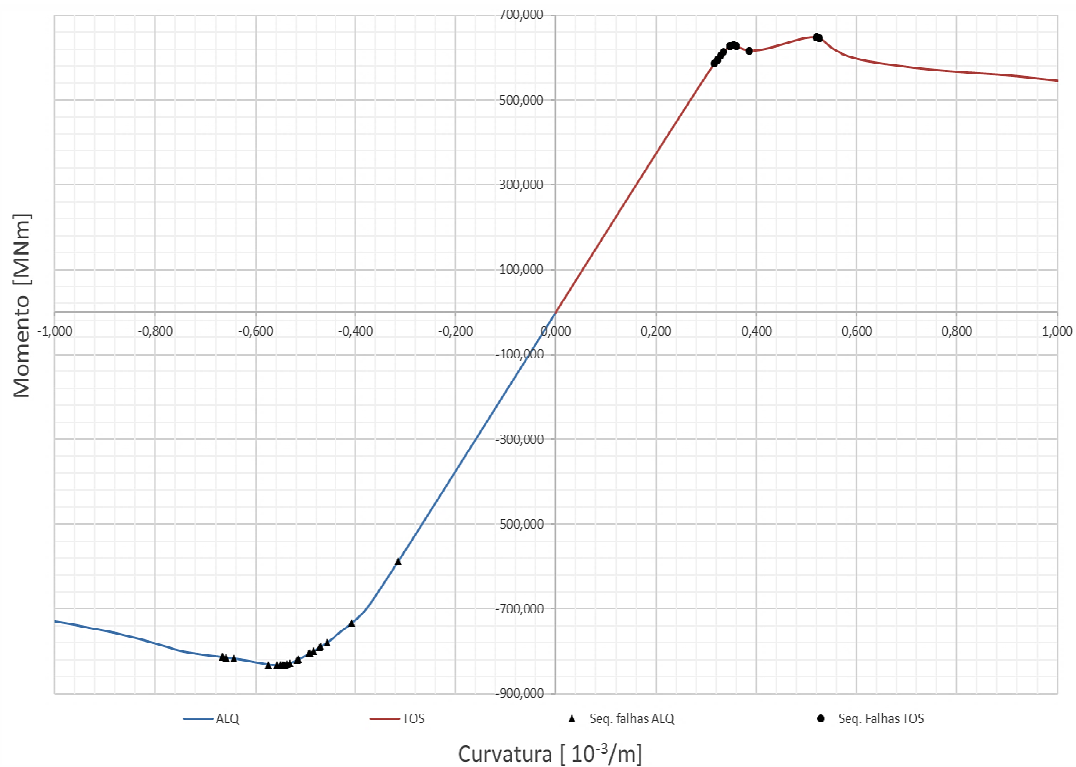


Figura 6-22 - Representação do colapso progressivo no navio

As Figura 6-23 e Figura 6-24 mostram as seqüências de colapso nas curvas. Cabe salientar que conforme foi mencionado no capítulo 6.6, o método de Newton Raphson, o qual foi usado na solução das análises, não apresenta muita confiabilidade nos resultados obtidos no pós colapso, devido ao método ser por aproximação por retas tangentes, porém até o colapso é muito eficiente.

Devido a isto, apesar das tabelas e figuras a seguir mostrarem todos os pontos adquiridos na análise, somente os 17 primeiros pontos em tosamento e os 10 primeiros em tosamento apresentam suficiente confiabilidade.

Tabela 6-10 - Sequência de colapso obtido da seção mestra

Tosamento				Alquebramento		
Nº	Local	Curvatura [1/m] 10 ³	Momento [MNm]	Local	Curvatura [1/m]10 ³	Momento [MNm]
1	Painel Convés 1-1	0,316	585,22	Chapa Quilha	-0,314	-587,06
2	Painel Convés 1-2	0,323	595,54	Chapa Fundo-1	-0,407	-733,34
3	Painel Convés 1_3	0,323	595,54	L1-Fundo	-0,459	-779,12
4	L3-Painel-Convés 1-3	0,329	605,24	L1-Convés 4	-0,471	-788,68
5	L1-Painel Convés 1-1	0,335	614,1	Quilha Lateral-3	-0,474	-791
6	Sicorda Lat.-1 Convés 1	0,348	627,04	Chapa Fundo-2	-0,486	-799,92
7	Sicorda Lat.-2 Convés 1	0,348	627,04	Chapa Fundo-3	-0,486	-799,92
8	Sicorda Lat.-3 Convés 1	0,348	627,04	Chapa Bojo-1	-0,486	-799,92
9	Painel-Convés 1-4	0,348	627,04	L5-Convés 4	-0,492	-804,18
10	Painel-Convés 1-5	0,348	627,04	L3-Fundo	-0,495	-806,24
11	L1_Painel-Convés 1-5	0,348	627,04	L6-Fundo	-0,515	-818,6
12	L1-Costado Sup.	0,348	627,04	L5-Fundo	-0,518	-820,32
13	Sicorda Lat.-4 Convés 1	0,354	629,08	L7-Fundo	-0,533	-828,08
14	L2_PainelConvés 1_5	0,354	629,08	Quilha Lateral-2	-0,538	-830
15	L3_Painel-Convés 1_4	0,354	629,08	Quilha Lateral-1	-0,542	-831
16	L3_Painel-Convés 1_5	0,354	629,08	L5-Convés 4	-0,545	-831,32
17	Painel-Costado_Sup	0,354	629,08	L4-Fundo	-0,547	-831,58
18	Sicorda Central Convés 1	0,361	627,96	L2-Quilha Central	-0,551	-832,34
19	L2-Costado Sup.	0,361	627,96	Quilha Central	-0,551	-832,34
20	L3-Costado Sup.	0,386	616,86	Chapa Bojo-2	-0,559	-832,4
21	L4-Costado Sup.	0,386	616,86	L3-Convés 4	-0,575	-830,96
22	Sicorda Lat.-3 Convés 2	0,519	648,02	Chapa Costado-1	-0,644	-817,18
23	Sicorda Lat.-4 Convés 2	0,519	648,02	L2-Convés 4	-0,659	-814,84
24	Sicorda Central Convés 2	0,526	646,36	L4-Convés 4	-0,666	-813,82
25	Sicorda Lat.-1 Convés 2	0,526	646,36	L1-Quilha Central	-0,667	-813,68
26	Sicorda Lat. Convés 2	0,526	646,36	L1-Quilha Lateral-1	-0,667	-813,68
27	-	-	-	L1-Quilha Lateral-2	-0,667	-813,68
28	-	-	-	Chapa Costado-2	-0,667	-813,68

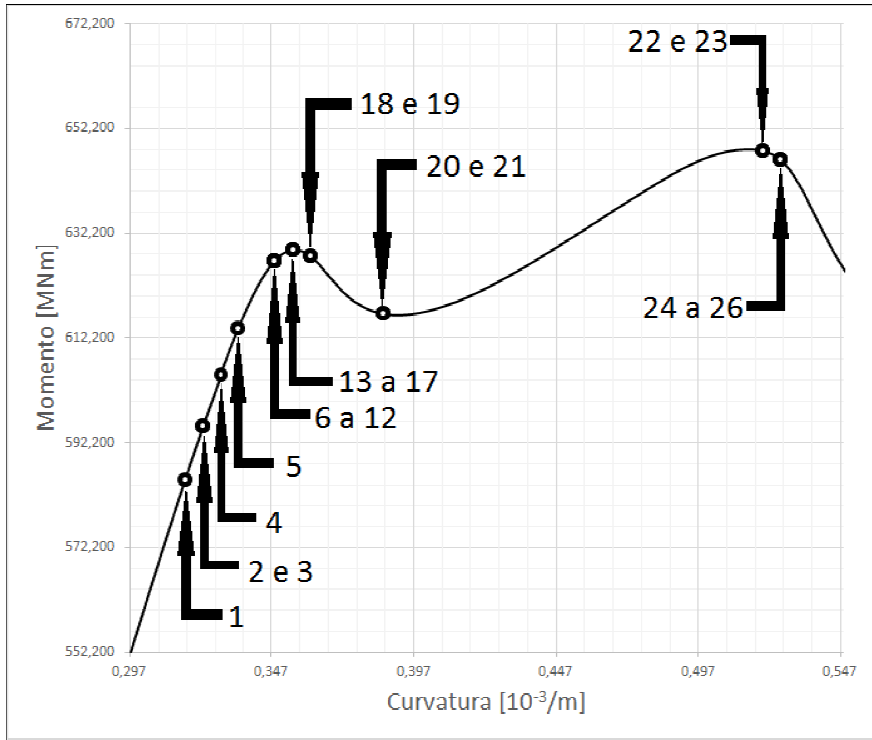


Figura 6-23 - Representação do colapso da estrutura em tosamento

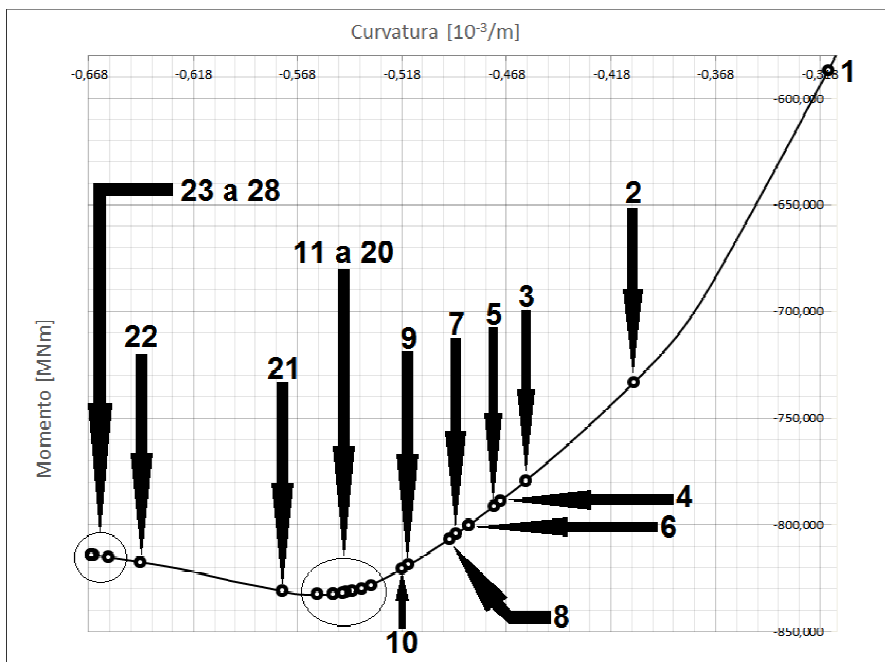


Figura 6-24 - Representação do colapso da estrutura em alquebramento

6.8. Discussão dos resultados e comparação

O gráfico apresentado na Figura 6-25 mostra a comparação entre os valores máximos de momento flexional, obtidos na simulação para tosamento e alquebramento, com os momentos máximos fornecidos pela norma RINAMIL (2011).

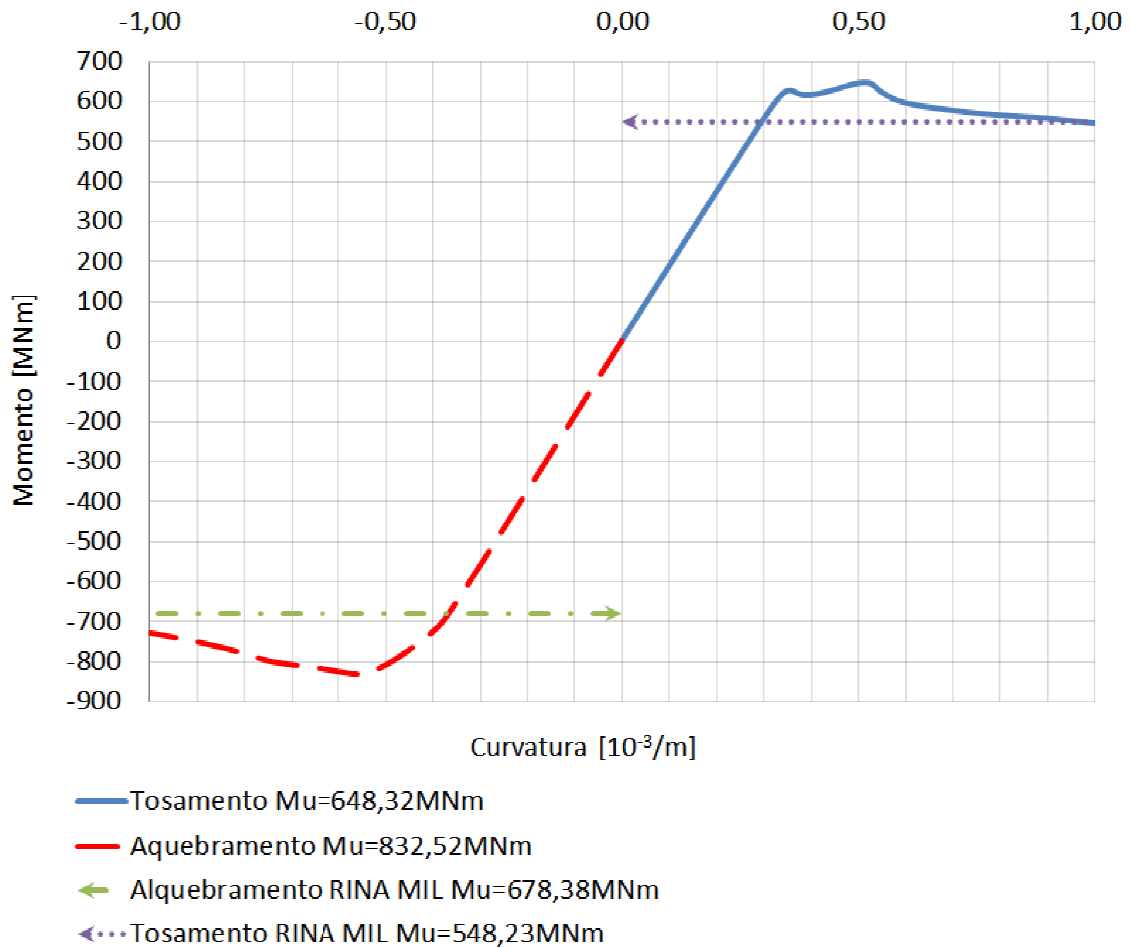


Figura 6-25 - Gráfico representativo da variação do momento pela curvatura do modelo simulado comparado com os limites da Norma (linhas horizontais)

Em valores percentuais, observa-se que a diferença entre o valor máximo para o tosamento encontrado na simulação e o previsto na norma é de 18% maior, já para o alquebramento, o valor é 23% maior.

Observando localmente a sequência de colapso, as Tabela 6-11 e Tabela 6-12 mostram as tensões críticas de flambagem nos diversos elementos estruturais longitudinais. Salienta-se que as tensões críticas de flambagem constantes nas tabelas foram obtidas como resultados da norma e do programa *Leonard Hull*, ferramenta auxiliar da classificadora.

Tabela 6-11 - Tabela representativa dos valores preconizado pela norma como tensão crítica de flambagem do chapeamento

CHAPEAMENTO	Local	Chapas	Tensão Crítica de Flambagem
		mm	MPa
Conveses	Convés 1	8	249
	Convés 2	6,35	187
	Convés 3	6,35	187
	Convés 4	9,5	289
Casco	Chapa Quilha	9,5	287
	Fundo	9,5	287
	Bojo	9,5	287
	Costado	6,35	204
Duplo Fundo	Quilha Central	19	306
	Quilha Lateral 1	16	284
	Quilha Lateral 2	16	296

Tabela 6-12 - Tabela representativa dos valores preconizado pela norma como tensão crítica de flambagem dos perfis leves e pesados

PERFIS LEVES	Local	Perfis Leves	Tensão Crítica de Flambagem
			MPa
Convéses	Convés 1	PERFIL HP 80 x 5	199
	Convés 2	PERFIL HP 80 x 5	210
	Convés 3	PERFIL HP 80 x 5	210
	Convés 4	PERFIL HP 120 x 7	308
Casco	Fundo	PERFIL HP 120 x 7	314
	Quilhas	PERFIL HP 120 x 8	308
	Bojo	PERFIL HP 120 x 7	307
	Costado	PERFIL HP 120 x 7	308
	Costado	PERFIL HP 100 x 6	279
	Costado	PERFIL HP 80 x 5	215

PERFIS PESADOS	Local	Perfis Pesados	Tensão Crítica de Flambagem
			MPa
Convéses	Convés 1	PERFIL T 250 x 6 + 140 x 8	261
	Convés 2	PERFIL T 220 x 6 + 100 x 8	247

As tabelas seguintes relacionam os locais, as tensões críticas e a diferença em percentual entre as duas tensões.

Tabela 6-13 - Tabela comparativa dos valores obtidos de tensão crítica de flambagem em tosamento com os obtidos através da norma e do *Leonard Hull*.

TOSAMENTO				
Nº	LOCAL	Tensão [MPa]	Tensão Crítica RINA [MPa]	Dif(%) RINA-FEA
1	Painel Convés 1-1	391,29	249	57%
2	Painel Convés 1-2	391,12	249	57%
3	Painel Convés 1_3	389,19	249	56%
4	L3-Painel-Convés 1-3	327,37	199	65%
5	L1-Painel Convés 1-1	371,03	199	86%
6	Sicorda Lat.-1 Convés 1	366,2	261	40%
7	Sicorda Lat.-2 Convés 1	366,18	261	40%
8	Sicorda Lat.-3 Convés 1	358,78	261	37%
9	Painel-Convés 1-4	388,41	249	56%
10	Painel-Convés 1-5	391,13	249	57%
11	L1_Painel-Convés 1-5	387,68	199	95%
12	L1-Costado Sup.	369,6	215	72%
13	Sicorda Lat.-4 Convés 1	387,63	261	49%
14	L2_PainelConvés 1_5	387,69	199	95%
15	L3_Painel-Convés 1_4	321,65	199	62%
16	L3_Painel-Convés 1_5	377,25	199	90%
17	Painel-Costado_Sup	393,21	204	93%
18	Sicorda Central Convés 1	378,13	261	45%
19	L2-Costado Sup.	377,48	215	76%
20	L3-Costado Sup.	387,89	215	80%
21	L4-Costado Sup.	346,56	215	61%
22	Sicorda Lat.-3 Convés 2	371,45	247	50%
23	Sicorda Lat.-4 Convés 2	380,15	247	54%
24	Sicorda Central Convés 2	355,25	247	44%
25	Sicorda Lat.-1 Convés 2	387,66	247	57%
26	Sicorda Lat. Convés 2	363,16	247	47%

Tabela 6-14 - Tabela comparativa dos valores obtidos de tensão crítica de flambagem em alquebramento com os obtidos através da norma e do *Leonard Hull*.

ALQUEBRAMENTO				
Nº	LOCAL	Tensão [MPa]	Tensão Crítica RINA [MPa]	Dif(%) RINA-FEA
1	Chapa Quilha	394,15	287	37%
2	Chapa Fundo-1	391,43	287	36%
3	L1-Fundo	376,05	314	20%
4	L1-Convés 4	387,85	308	26%
5	Quilha Lateral-3	388,72	296	31%
6	Chapa Fundo-2	390,84	287	36%
7	Chapa Fundo-3	390,84	287	36%
8	Chapa Bojo-1	389,27	287	36%
9	L5-Convés 4	388,25	308	26%
10	L3-Fundo	334,45	314	7%
11	L6-Fundo	371,03	314	18%
12	L5-Fundo	370,85	314	18%
13	L7-Fundo	377,46	314	20%
14	Quilha Lateral-2	388,27	284	37%
15	Quilha Lateral-1	388,16	284	37%
16	L5-Convés 4	388,25	308	26%
17	L4-Fundo	342,98	314	9%
18	L2-Quilha Central	387,72	308	26%
19	Quilha Central	389,11	306	27%
20	Chapa Bojo-2	390,24	287	36%
21	L3-Convés 4	388,43	308	26%
22	Chapa Costado-1	389,48	287	36%
23	L2-Convés 4	388,3	308	26%
24	L4-Convés 4	389,12	308	26%
25	L1-Quilha Central	367,1	308	19%
26	L1-Quilha Lateral-1	388,45	308	26%
27	L1-Quilha Lateral-2	381,72	308	24%
28	Chapa Costado-2	304,93	204	49%

Observa-se que as tensões críticas obtidas no colapso progressivo da estrutura foram em média, em tosamento, 62% maior que a crítica de flambagem dos elementos estruturais calculados pela norma. Já em alquebramento a diferença cai para 28% em média. Globalmente, a diferença média torna-se 44% maior.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho comparou os resultados obtidos através da simulação numérica em elementos finitos com os limites estabelecidos pela norma RINAMIL (2011). Para tanto, modelou-se a região central do navio, a saber, Seção Mestre, a qual posteriormente, empregadas as devidas condições de contorno, foi simulada no ANSYS®17.2 WORKBENCH. Em seguida, foram implementadas simplificações que permitissem a proximidade dos resultados obtidos com o real e diminuísse o custo computacional.

As condições de contorno empregadas foram similares ao aplicado por Van-Vu (2015) em sua avaliação do colapso progressiva de uma viga enrijecida. Van-Vu comparou os seus resultados com os obtidos por NISHIHARA (1983) num experimento de estrutura similar. Para validação das condições de contorno usadas e do método empregado, foi criado um modelo similar ao analisado por Nishihara e Van-Vu, uma caixa tipo viga reforçada e com imperfeições iniciais inseridas no chapeamento da estrutura. As imperfeições geométricas inseridas foram obtidas através da superposição de alguns modos naturais de flambagem extraídos do ANSYS®. O resultado desta validação foi satisfatório.

Os escantilhões da estrutura foram calculados de acordo com a norma. A malha selecionada foi obtida através de uma análise de sensibilidade feita em um painel enrijecido extraído da geometria da seção mestre. Os perfis bulbos da estrutura foram substituídos por chapa face com o intuito de simplificar o modelamento com elementos do tipo *shell* e de facilitar a observação do comportamento dos perfis na simulação do colapso progressivo. Esta simplificação acarretou numa redução de rigidez do perfil de 23%, conseqüentemente tendem a colapsar com tensões críticas menores que a estrutura real.

O comprimento do modelo foi escolhido visando diminuir o tempo computacional da análise, logo este foi feito dotado somente de um espaçamento de caverna gigante.

O material usado na simulação foi o mesmo selecionado no projeto da Corveta pela Marinha do Brasil, aço AH36. Para a análise foram aplicadas rotações em pontos

remotos, nos centroides das extremidades do modelo, para obter o momento último da estrutura quando flexionada longitudinalmente em alquebramento e tosamento. O método numérico usado pelo programa na análise foi o Newton Raphson estabilizado.

Ao final da simulação, o momento último obtido, em tosamento, foi 18% maior que o previsto em norma, já em alquebramento a diferença aumentou para 23%. No que tange as tensões críticas observadas no colapso progressivo da estrutura, estas foram em média, em tosamento, 62% maior que a crítica de flambagem dos elementos estruturais apresentada pela norma. Já em alquebramento esta diferença caiu para 28% em média. Observando de forma global, em tosamento e alquebramento, a diferença média se tornou 44%.

Os resultados obtidos neste trabalho comprovam a credibilidade de um projeto de uma seção por norma, pois, como foi apresentado, a margem de segurança, quando comparada com a análise em FEM, ficou, em termos globais, 44% superior. O que já era esperado, uma vez que a norma, em sua concepção, leva em consideração fatores de segurança gerados em análises semelhantes, bem com experiências compartilhadas por estaleiros, com o intuito de reproduzir o comportamento estrutural mais próximo possível do real.

A curva de flambagem, obtida no programa comercial ANSYS, revelou também um comportamento diferente da estrutura quando em tosamento, caracterizado por uma maior suscetibilidade dos painéis do convés, que se justifica pelo fato de ser menos reforçado, quando comparado a estrutura do fundo da embarcação.

Cabe salientar que os resultados obtidos foram para elementos estruturais leves com 23% menos rigidez, em média, que o considerado pela norma, ou seja as diferenças para uma estrutura real tornam-se maiores que as apresentadas neste trabalho, contribuindo, assim, para uma a estrutura mais segura em comportamentos extremos.

7.1. Trabalhos futuros

Com o intuito de sempre aperfeiçoar o conhecimento sobre o comportamento estrutural de um navio militar em condições extremas, seria importante que futuramente outros aspectos fossem analisados, tendo em vista não ter sido escopo deste trabalho, quais sejam:

- Analisar o comportamento estrutural do navio militar, no que tange a tensão última, impondo as pressões hidrostáticas no casco;
- Observar o comportamento limite da estrutura quando o navio estiver com o casco avariado devido a explosões submarinas ou colisões;
- Incluir como esforço na análise a torção do navio devido as ondas, isto porque este tipo de navio militar tem sua navegação classificada como irrestrita;
- Analisar fadiga estrutural da embarcação ao longo de sua vida útil;
- Analisar o impacto da mudança da linha neutra nos casos citados acima;
e
- Observar o comportamento estrutural quando o navio estiver em sua condição limite e tiver a necessidade de fazer uso de suas armas orgânicas tal qual um canhão de proa ou o lançamento de mísseis verticais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS 17.1, “**Structural Analysis Guide**”. Release, 2016.

ASTM- A 131/A 131M – 08. **Standard Specification for Structural Steel for Ships**, 2008.

BATHE, KLAUS-JÜRGEN. **Finite Element Procedures**, Second Edition, 2006, Prentice Hall, Pearson Education, Inc.

BENSON, SIMON. **Progressive Collapse Assessment of Lightweight**. Ship Structures. School of Marine Science and Technology. November 2011.

BRASIL. **Estratégia Nacional de Defesa**, República Federativa do Brasil, Palácio do Planalto, 2008.

BRASIL. **Livro Branco de defesa Nacional**, República Federativa do Brasil, Palácio do Planalto, 2012.

BRITTO, O. **Tensões Terciárias**. Notas de Aula de Graduação em Engenharia Naval, USP, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

DET NORSKE VERITAS (DNV). **Fabrication and Testing of Offshore Structures - DNV-OS-C401 Ch.2 Sec.2E**, p41. Outubro 2010.

ESSS. **Apresentação de Introdução ao Método de Elementos Finitos, Características dos Elementos**, 2014.

FERNANDEZ, JORGE L.M. **Investigação dos Efeitos na Resistência Global Durante e após a Colisão de Navios**. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. Dezembro 2010.

FONSECA, MAURÍLIO M, *Arte Naval*, 5ª ed., Rio de Janeiro, Serviço de Documentação da Marinha, 1989.

HUGHES, OWEN F, PAIK, JEOM KEE. **Ship Structural Analysis and Design**. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) 2010.

LEWIS, E.V. **Principles of Naval Architecture, Stability and Strength**, Vol-1, S.N.A.M.E. revised 1988.

NISHIHARA, SCIICHIRO. **Ultimate Longitudinal Strength of Mid-Ship Cross Section**, from J.S.N.A. Japan. Vol. 148, Dec. 1980, Vol. 151, July 1982, Vol. 152, Jan. 1983 and Vol. 154, December 1983.

PAIK, J.K., KIM, B.J., SEO, J.K., 2007a. **Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped Offshore Structures: Part I Unstiffened Panels**. Ocean Engineering, doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.004.

PAIK, J.K., KIM, B.J., SEO, J.K., 2007b. **Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped Offshore Structures: Part II Stiffened Panels.** Ocean Engineering, doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.007.

PAIK, J.K., KIM, B.J., SEO, J.K., 2007b. **Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped Offshore Structures: Part III Hull Girders,** Ocean Engineering, doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.008.

PAIK, J.K., THAYAMBALLI, A.K., 2007. **Ship-Shaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation.** Cambridge University Press, Cambridge, UK.

PONTIN, T, **A Estrutura Primária do Navio,** Notas de Aula de Graduação em Engenharia Naval, USP, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

RAWSON, K.J. AND TUPPER, E.C. **Basic Ship Theory,** Combined Volume, 5th edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK., 2001, Sections 4.1, 4.2,

RINAMIL. **Rules for the Classification of Naval Ships,** REGISTRO ITALIANO NAVALE, 2011, part B.

SHI, SHENGRUN, **Evaluating the Structural Integrity of High Strength Low Alloy Steels Considered for Shipbuilding Using Acoustic Emission,** School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham. September 2014.

TABORDA, L.F. **Placas e cascas.** Notas de Aula de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M. **Theory of Elastic Stability.** 2 ed. New York, NY, USA. McGraw-Hill International Book Company, 1985. 541 p. ISBN 0-07-Y85821-7.

TROVOADO, LEANDRO C. **Influência das Distorções Geométricas Iniciais na Resistência Estrutural de Navios Tanque.** Dissertação de mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, março 2010.

UEDA, YUKIO. RASHED, SHERIF M.H. **The Idealized Structural Unit Method and its Application to Deep Girder Structures,** Computers and Structures, 1984, Vol.18(2), pp.277-293.

YAO, T. **Hull Girder Strength. Review,** Marine Structures, Elsevier, 2003, p1–13.

YAMAGUCHI, E. **Basic Theory of Plates and Elastic Stability,** Structural Engineering Handbook, Ed. Chen Wai-Fah, Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

VAN-VU, H. **Prediction the Ultimate Longitudinal Strength of Intact Ship by Finite Element Method.** International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Special Issue: Transportation Engineering Technology. Vol. 3, No. 1-3, 2015, pp. 18-23.doi: 10.11648/j.ijmea.s.2015030103.13.

VALSGAARD S., JORGENSEN L., BOE A. A., THORKILDSEN H. **Ultimate Hull Girder Strength Margins and Present Class Requirements.** Proceedings of the SNAME Symposium on Marine Structural Inspection, Maintenance and Monitoring, Arlington, USA, 1991. p. B.1–19.

APÊNDICE - A

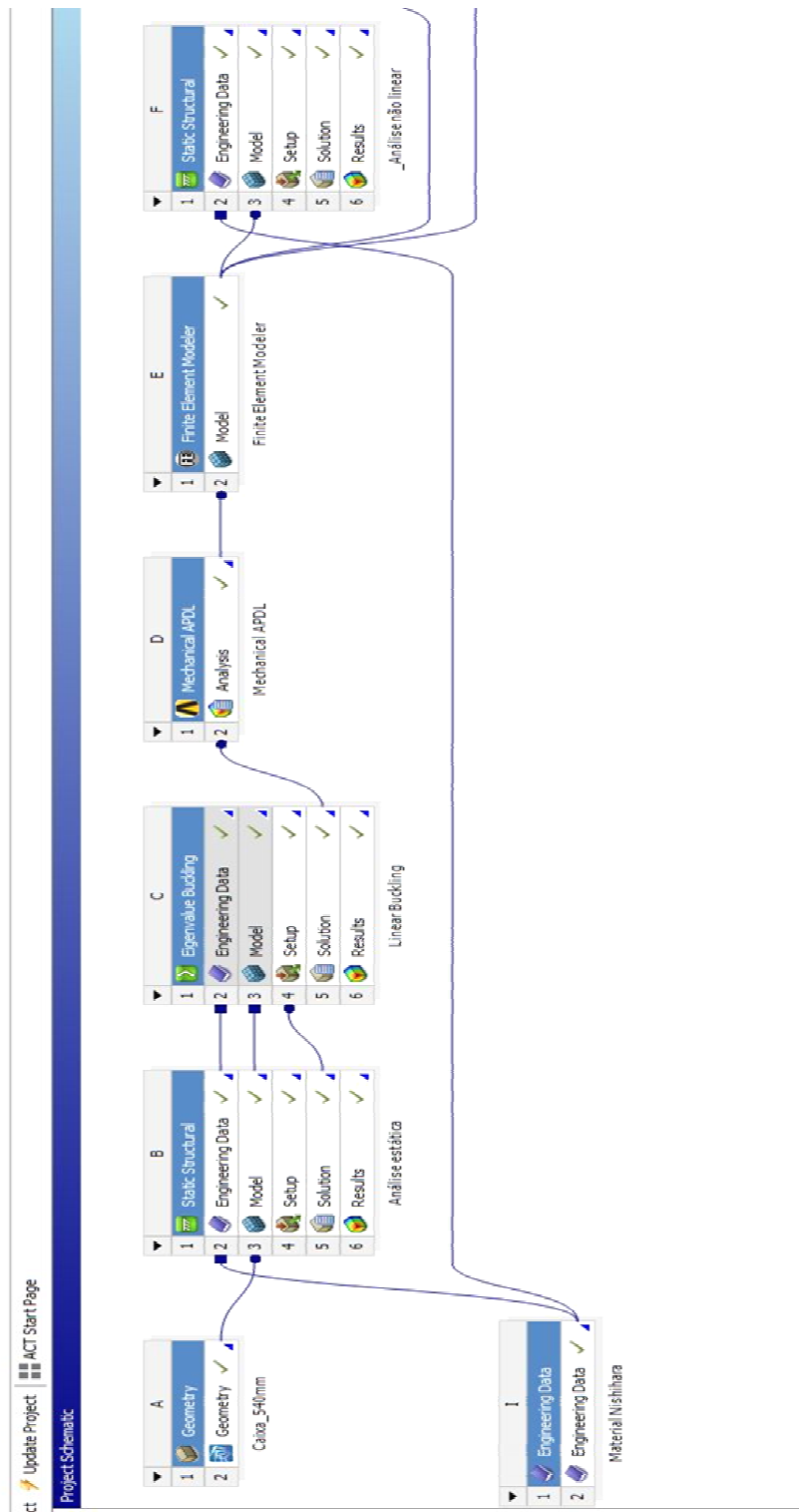


Figura A-1 - Esquema da simulação da validação

APÊNDICE - B

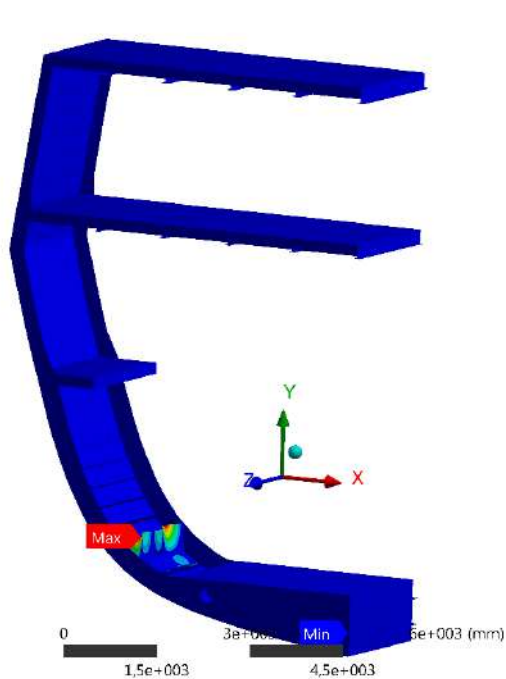


Figura B-1 - Modo natural de flambagem 02

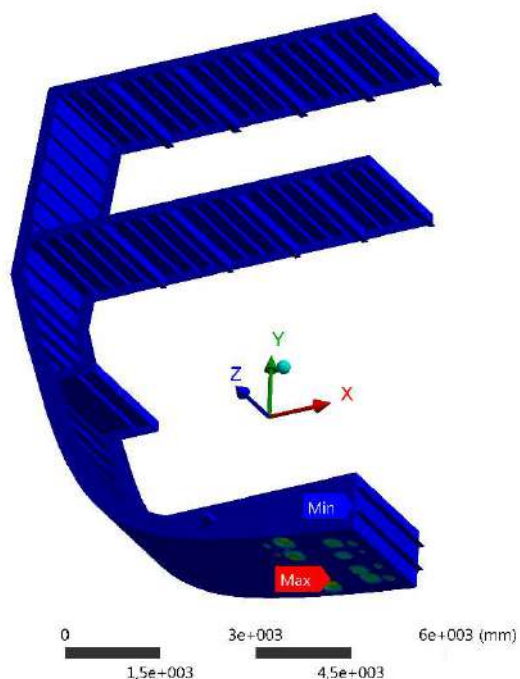


Figura B-2 - Modo natural de flambagem 09

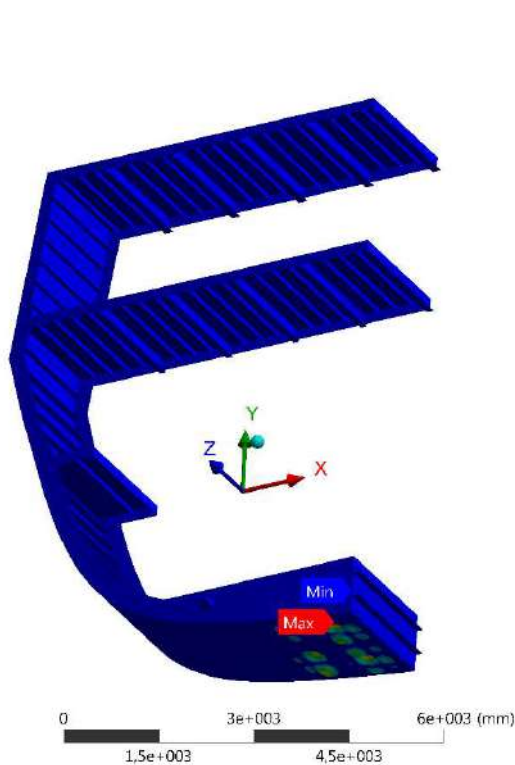


Figura B-3 - Modo natural de flambagem 10

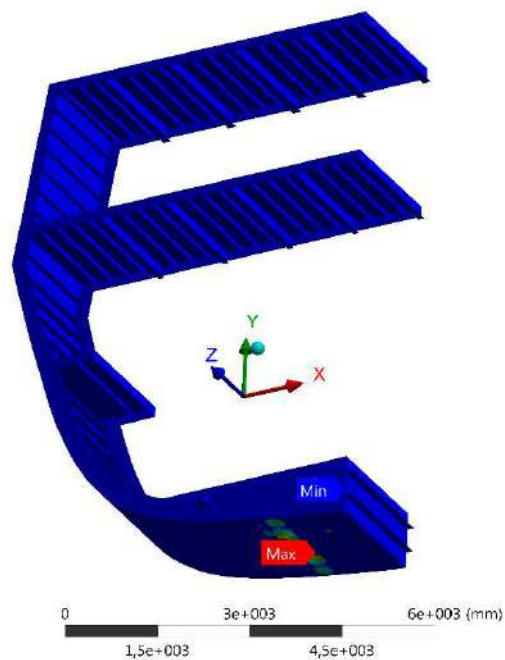


Figura B-4 - Modo natural de flambagem 13

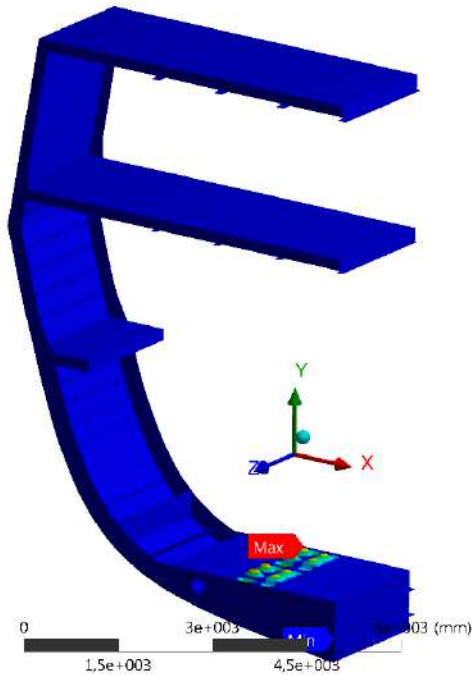


Figura B-5 - Modo natural de flambagem 17

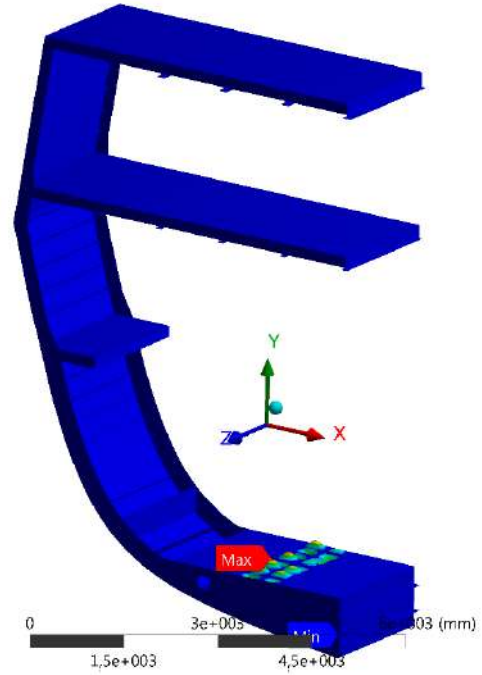


Figura B-6 - Modo natural de flambagem 20

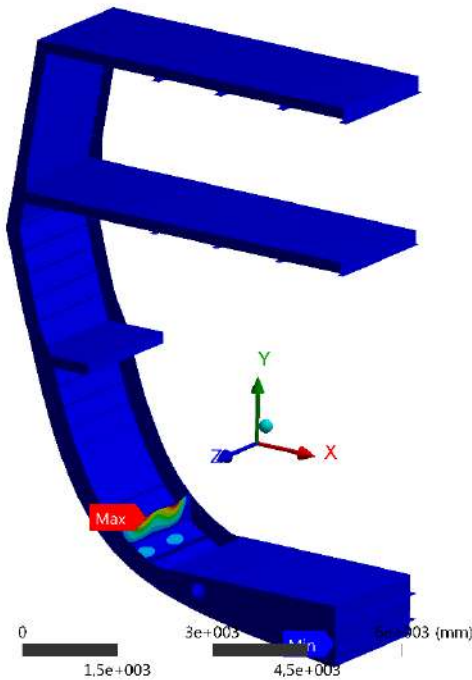


Figura B-7 - Modo natural de flambagem 21

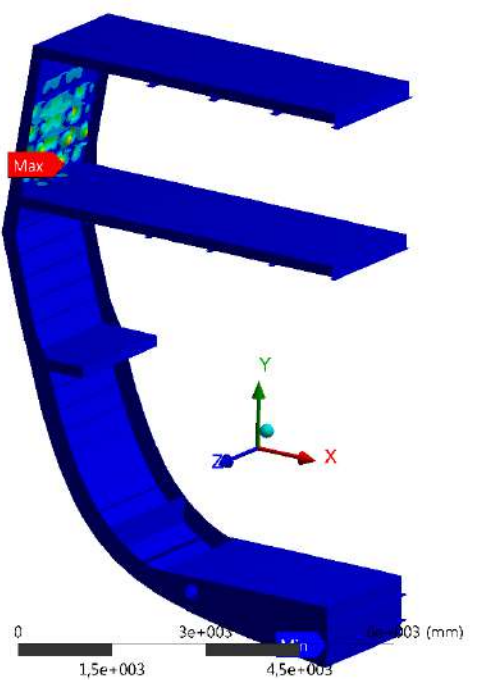


Figura B-8 - Modo natural de flambagem 159

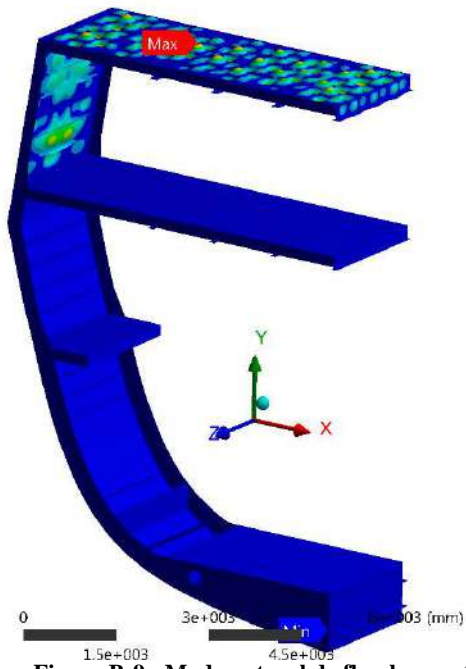


Figura B-9 - Modo natural de flambagem 173

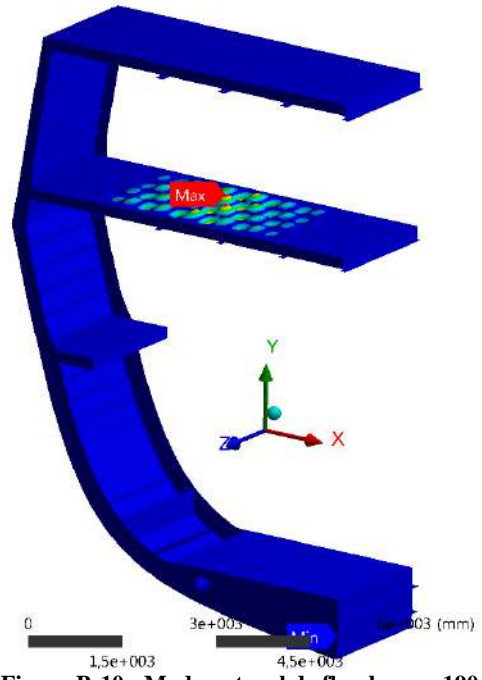


Figura B-10 - Modo natural de flambagem 190

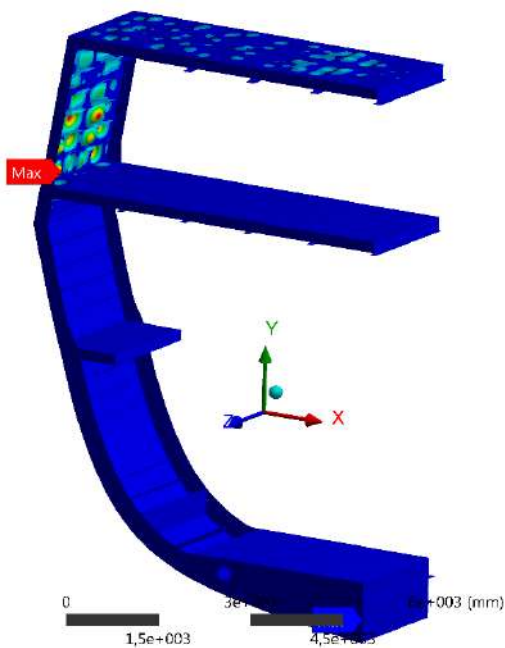


Figura B-11 - Modo natural de flambagem 219

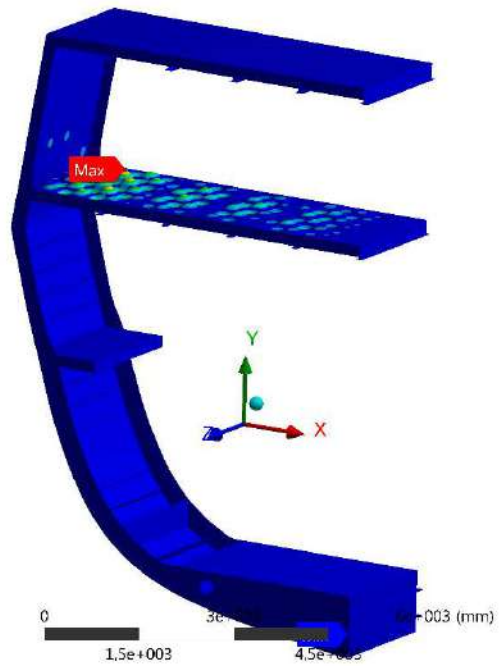


Figura B-12 - Modo natural de flambagem 258

APÊNDICE - C

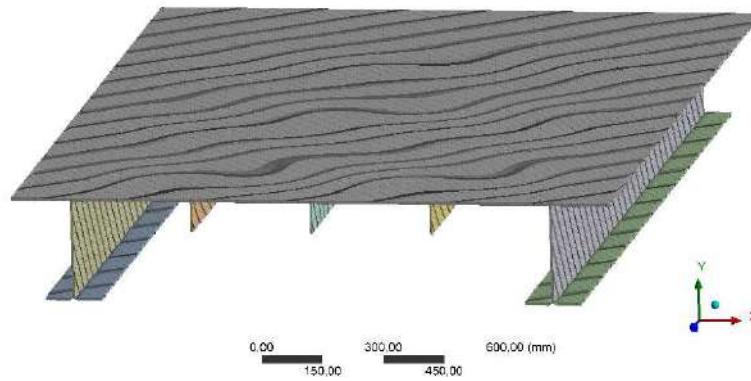


Figura C-1 - Malha de 10mm

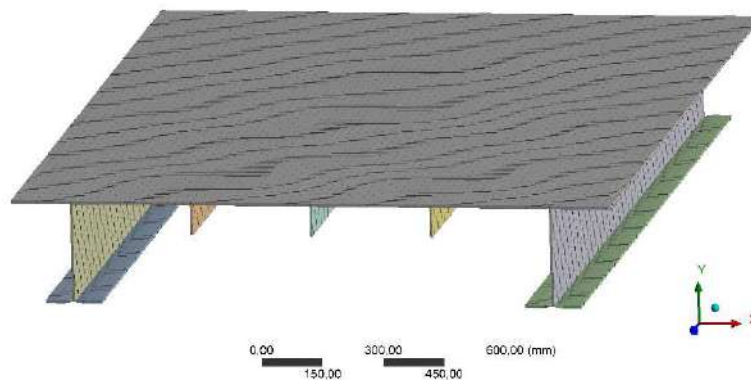


Figura C-2 - Malha de 20mm

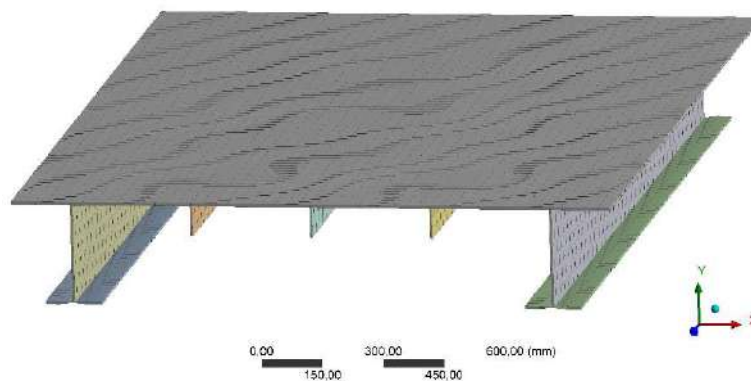


Figura C-3 - Malha de 30mm

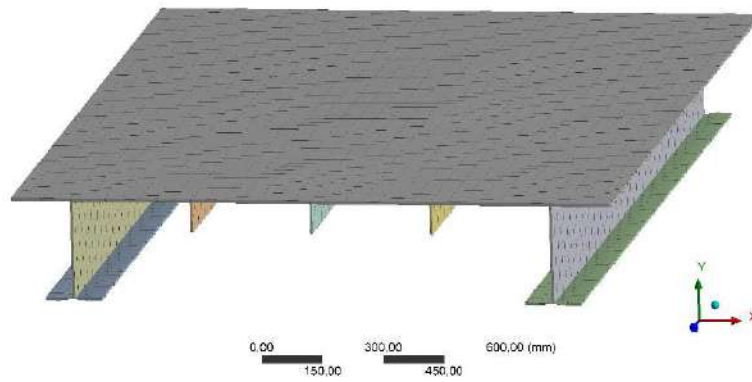


Figura C-4 - Malha de 40mm

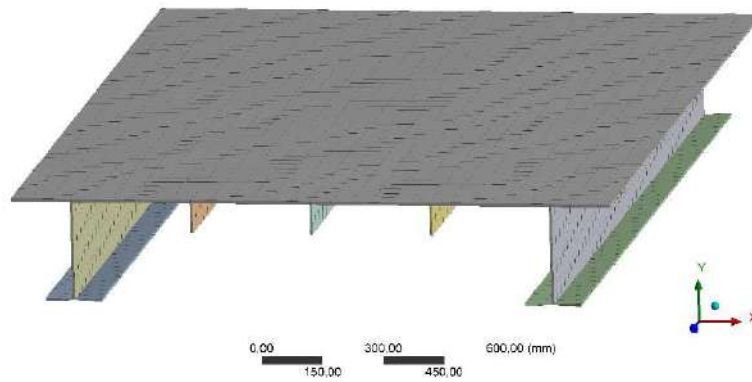


Figura C-5 - Malha de 50mm

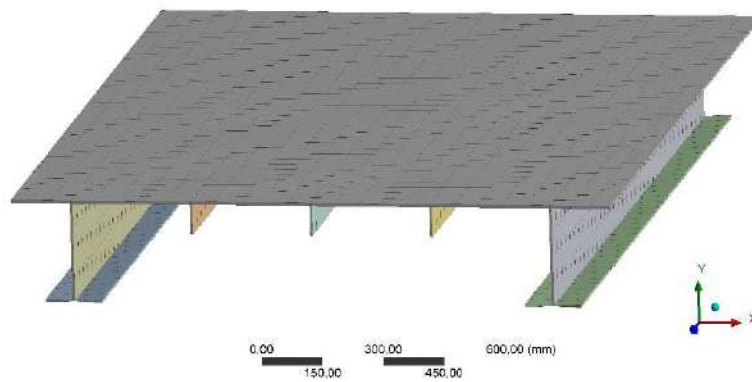


Figura C-6 - Malha de 60mm

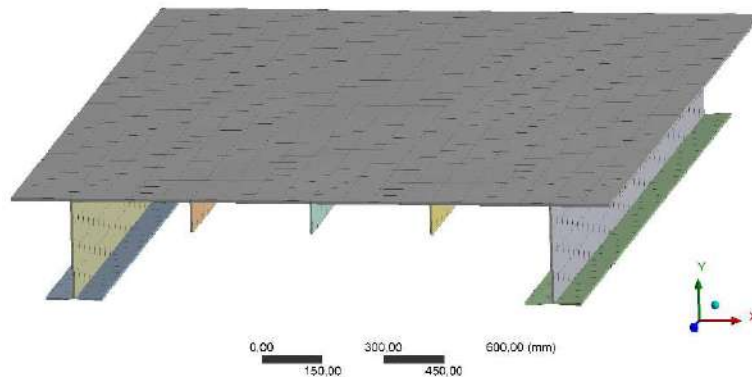


Figura C-7 - Malha de 70mm