



ANÁLISE DE PAINÉIS ENRIJECIDOS EM ESTRUTURAS DE CASCO DE FPSOs

Mariana Muniz da Silva Nunes

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

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa

Rio de Janeiro
Outubro de 2018

ANÁLISE DE PAINÉIS ENRIJECIDOS EM ESTRUTURAS DE CASCO DE FPSOs

Mariana Muniz da Silva Nunes

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 CIVIL.

Examinada por:



Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.



Dr. Marcelo Caire, D.Sc.



Dr. Paulo Mauricio Videiro, D.Sc.



Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2018

Nunes, Mariana Muniz da Silva

Análise de Painéis Enrijecidos em Estruturas de Casco de FPSOs. / Mariana Muniz da Silva Nunes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 106 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 107-110.

1. Offshore. 2. Flambagem. 3. FPSO. I. Ellwanger, Gilberto Bruno. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*À Deus e minha preciosa
família: marido, filha, pais, irmãs e
amigos. A todos que me
incentivaram, apoiaram e
acreditaram!*

Agradecimentos

Agradeço à Deus por mais essa conquista. Na fé continuarei minha jornada!

À minha família que é o motivo de tudo. Sem vocês eu nada seria.

Meu esposo, Roger, que sempre acreditou em mim; me apoiou; incentivou a estudar; buscou na faculdade nos dias de prova, tarde da noite; se sacrificou tanto quanto eu para que eu pudesse chegar até aqui. À minha filha, Maria Cecília. Amo vocês!

Ao American Bureau of Shipping pela oportunidade e confiança que depositaram em mim, me permitindo cursar o Mestrado. A todos os colegas de trabalho que me incentivaram e ajudaram.

Agradeço em especial aos meus orientadores, Gilberto e José Renato, pela ajuda durante a pesquisa e pela compreensão, devido a alguns imprevistos durante a elaboração deste trabalho.

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

ANÁLISE DE PAINÉIS ENRIJECIDOS EM ESTRUTURAS DE CASCO DE FPSOs

Mariana Muniz da Silva Nunes

Outubro/2018

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta uma análise de flambagem em painéis enrijecidos utilizados em estruturas offshore tipo FPSO (unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência). A região analisada encontra-se no costado de boreste, um dos locais de maior solicitação da estrutura.

Considerando as exigências das sociedades classificadoras, um painel, inicialmente íntegro, teve sua espessura reduzida ao valor mínimo permitido pela regra e, a partir dessa espessura, foi avaliada a integridade da estrutura. A análise teve continuidade com a redução das espessuras para valores abaixo do valor mínimo permitido e com a variação dos espaçamentos dos reforçadores. Após as análises, foram diagnosticados os tipos de falha que ocorreram nos painéis estudados.

A análise foi realizada com auxílio da fase ISE, do programa FPSO Eagle, desenvolvido pelo ABS e pelo Método dos Elementos Finitos, com auxílio da fase TSA do programa FPSO Eagle, do NASTRAN e do FEMAP.

Os resultados obtidos comprovam que quando todos os critérios do método prescritivo são atendidos a estrutura é de fato confiável. No entanto a análise de elementos finitos se mostrou muito eficaz considerando a necessidade de uma reavaliação estrutural, provando que em alguns casos é possível reduzir a espessura sem comprometer a integridade da mesma.

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

ANALISYS OF RIGID PANELS IN FPSOs HULL STRUCTURES

Mariana Muniz da Silva Nunes

October/2018

Advisors: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa

Department: Civil Engineering

This work presents a buckling analysis in stiffened panels, used in offshore structures type FPSO (floating unit of production, storage and offloading). The region analyzed is located on the starboard side, one of the most demanding locations of the structure.

Considering the requirements of the classification societies, a panel, initially intact, had its thickness reduced to the minimum allowed by the rule and from that thickness the integrity of the structure was evaluated. The analysis had continuity with the reduction of the thicknesses to values below the minimum allowed and with the variation of the spacing of the stiffeners. After the analysis were diagnosed the types of failure that occurred in the studied panels.

The analysis was performed with the support of the FPSO Eagle ISE phase, developed by the ABS and Finite Element Method, with the support of the TSA phase of the FPSO Eagle program, NASTRAN and FEMAP

The results obtained prove that when all the criteria of the prescriptive method are met the structure is indeed reliable. However, the analysis of finite elements proved to be very effective considering the need for a structural reassessment, proving that in some cases it is possible to reduce the thickness without compromising the integrity of the same

Sumário

1	INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Metodologia	4
1.3	Estrutura do trabalho.....	5
1.4	Breve histórico das atividades offshore	6
1.4.1	TLP (<i>Tension Leg Platform</i>).....	8
1.4.2	<i>Spar Buoy</i>	9
1.4.3	Semissubmersíveis	10
1.4.4	FPSO.....	11
2	CONCEITOS ESTRUTURAIS E OPERACIONAIS DOS FPSOS.....	13
2.1	Projeto de conversão e nova construção	14
2.2	Aspectos operacionais.....	16
2.3	A estrutura do FPSO	17
2.3.1	O Casco	17
2.3.2	<i>Topside</i>	19
2.3.3	Estrutura interna do casco.....	20
3	CARGAS ATUANTES NO FPSO	23
3.1	Introdução	23
3.2	Fatores de Severidade Ambiental (ESFs)	25
3.2.1	RAO.....	25
3.2.2	ESF Alfa (α)	27
3.2.3	ESF Beta (β)	28
3.3	Componentes de Carga	30
3.4	Critério de Carregamento.....	31
4	FLAMBAGEM	34
4.1	Introdução	34
4.2	Teoria das Placas	35
4.3	Flambagem de Placas.....	35
4.4	Critérios da Regra ABS para análise de flambagem.....	37
4.4.1	Geometria das Placas.....	37
4.4.2	Carga Aplicada	39
4.4.3	Conceitos de controle de Flambagem.....	41
4.4.4	Tensão Crítica de Flambagem	47

4.4.5	Fluxograma do processo de Análise de Flambagem	51
5	ANÁLISE DE FLAMBAGEM PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ...	52
5.1	Introdução	52
5.2	Procedimento da Análise de Flambagem pelo MEF	53
5.3	Determinação do carregamento para análise de flambagem.....	55
5.4	Análise de Flambagem.....	59
5.4.1	Flambagem do chapeamento do costado	60
5.4.2	Modelo Global.....	61
5.4.3	Flambagem dos reforçadores longitudinais	69
5.4.4	Modelo Local.....	71
6	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	74
6.1	Introdução	74
6.2	Informações gerais	74
6.3	Exemplo 1 – Espessura As Built.....	78
6.4	Exemplo 2 – Espessura mínima.....	82
6.5	Exemplo 3 – Primeira redução.....	84
6.6	Exemplo 4 – Segunda redução.....	86
6.7	Exemplo 5 – Pós-Flambagem	88
6.8	Exemplo 6 – Falha	91
6.9	Exemplo 7 – Aumento do espaçamento (1800 mm).....	94
6.10	Exemplo 8 – Redução do espaçamento (450 mm)	98
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	APÊNDICE I – Cálculo prescritivo dos reforços	111

Lista de Figuras

Figura 1-1 – Sistema <i>Turret</i> externo de ancoragem (Fonte: www.offshore-mag.com) ...	2
Figura 1-2 – Sistema <i>Spread</i> de ancoragem (Fonte: www.bluewater.com)	2
Figura 1-3 - Primeiras plataformas offshore (Fonte: www.aoghs.org)	6
Figura 1-4 - Exemplo de plataforma fixa dos dias atuais (Fonte: www.petrobras.com.br)	7
Figura 1-5 - Plataforma <i>Beryl Alpha</i> (Fonte: www.rigadvisor.co.uk).....	8
Figura 1-6 – Estrutura de uma TLP típica (http://www.petrobras.com.br)	9
Figura 1-7 – Spar Truss / Spar Cell [9].	10
Figura 1-8 – Semissubmersível de perfuração (Fonte: www.opetroleo.com.br).....	11
Figura 1-9 – FPSO PETROBRAS 66 (Fonte: www.petrobras.com.br)	12
Figura 2-1 – Exemplo de FPSO do tipo navio (Fonte: www.globalsecurity.org).....	13
Figura 2-2- Comparação entre FPSOs convertidos e novas construções.	16
Figura 2-3- Casco típico VLCC (Fonte: www.offshore-mag.com)	17
Figura 2-4 – Popa do casco do FPSO P-66.	18
Figura 2-5 – Principais planos de navio típico [16].....	18
Figura 2-6 – Casco do FPSO Monocoluna (Fonte: www.petrobras.com.br)	19
Figura 2-7 – Estruturas internas do casco.....	22
Figura 3-1 – Exemplo de momentos fletores verticais induzidos por uma onda regular [19].	24
Figura 3-2 – Movimentos do FPSO.....	24
Figura 3-3 - Espectro de Resposta [10].	27
Figura 4-1 – Típica placa reforçada [7].	38
Figura 4-2 - Condição de tosamento [21]......	39
Figura 4-3 - Condição de alquebramento [21].....	39
Figura 4-4 – Painel reforçado de uma estrutura offshore [19].	40
Figura 4-5 - Carregamento primário e efeitos de carga em painéis enrijecidos [27].	41
Figura 4-6 – Modos de Falha (ABS, 2014)	42
Figura 4-7 – Carregamento – Deflexão de painéis retangulares.	42
Figura 4-8 – Coeficiente de flambagem K_i [7].	49
Figura 4-9 - Coeficiente de flambagem K_i [7]......	50
Figura 4-10 – Fluxograma do processo de análise de Flambagem.....	51
Figura 5-1 – Exemplo de aproximações [28].	52

Figura 5-2 – Arranjo de Carregamento para FPSO de Casco Singelo [7].....	57
Figura 5-3 – Fatores de correlação e coeficientes para as combinações de carregamento [7].	58
Figura 5-4 – Detalhe dos tipos de elemento modelos no costado do modelo global.	60
Figura 5-5 - Vista trimétrica do sistema de coordenadas do Modelo Global.	62
Figura 5-6 - Corte longitudinal do Modelo Global.....	64
Figura 5-7 - Caverna típica.....	64
Figura 5-8 - Antepara Transversal.....	65
Figura 5-9 - Anteparas Longitudinais de Bombordo e Boreste.....	65
Figura 5-10 - Estruturas Internas (escoas e longarina central).	65
Figura 5-11 - Restrição das molas nas terminações do modelo [7].....	67
Figura 5-12 - Condições de Contorno do Modelo Global.	67
Figura 5-13 - Deformação Viga-Navio.	68
Figura 5-14 - Modelo Local 1.	69
Figura 5-15 – Detalhe da malha refinada do modelo Local 1.	70
Figura 5-16 - Modelo Local de 1 a 6.	72
Figura 5-17 - Região analisada compreendida entre as cavernas 135 e 155 e os longitudinais L33 e L37.....	73
Figura 5-18 - Exemplo das borboletas de conexões com os longitudinais.....	73
Figura 6-1 – Esboço do Arranjo Geral do FPSO utilizado.....	74
Figura 6-2 – Localização da região analisada.	76
Figura 6-3 – Representação dos painéis do costado analisados.	79
Figura 6-4 – Elemento rígido.	80
Figura 6-6 – Deformada dos reforçadores para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).	82
Figura 6-6 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para caso de carga 8 (tensão de Von Mises).	84
Figura 6-7 - Resultado da análise de flambagem dos elementos longitudinais do modelo local 3 (UC de flambagem).	86
Figura 6-8 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).	86
Figura 6-9 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 4 (UC de flambagem).	88

Figura 6-10 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).....	88
Figura 6-11 – Resultado de flambagem dos painéis do costado do exemplo 5 (UC de flambagem).....	90
Figura 6-12 - Resultado de resistência última dos painéis do costado do exemplo 5 (UC de resistência última).....	90
Figura 6-13 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 5 (UC de flambagem).	91
Figura 6-14 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para caso de carga 8 (tensão de Von Mises).	91
Figura 6-15 - Resultado de Flambagem dos painéis do costado do exemplo 6 (UC de flambagem).....	93
Figura 6-16 - Resultado de Resistência Última dos painéis do costado do exemplo 6 (UC de resistência última).	93
Figura 6-17 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 6(UC de flambagem).....	94
Figura 6-18 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).	94
Figura 6-19 – Painéis com espaçamento entre reforçadores de 1800mm.	95
Figura 6-20 - Resultado de Flambagem dos painéis do costado do exemplo 7 (UC de Flambagem).....	96
Figura 6-21 - Resultado de Resistência Última dos painéis do costado do exemplo 7 (UC de resistência última).	97
Figura 6-22 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 7 (UC de flambagem).	97
Figura 6-23 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).	98
Figura 6-24 – Painéis com espaçamento entre reforçadores de 450 mm.	99
Figura 6-25 - Resultado de Flambagem dos painéis do costado do exemplo 8 (UC de flambagem).....	101
Figura 6-26 - Resultado de Resistência Última dos painéis do costado do exemplo 8 (UC de resistência última).	101
Figura 6-27 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 8 (UC de flambagem).	102

Figura 6-28 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8
(tensão de Von Mises)..... 102

Lista de Tabelas

Tabela 1-1 - Frota Mundial de FPSOs em Operação.....	3
Tabela 3-1 – Componentes de carregamento para os fatores β	29
Tabela 3-2 – Matriz dos casos de carregamento representativos [12].....	32
Tabela 5-1- Condições de Contorno [7].	66
Tabela 5-2 - Nós e elementos dos modelos locais.....	71
Tabela 6-1 – Propriedades do Aço utilizado.	75
Tabela 6-2 – Principais Propriedades do FPSO	75
Tabela 6-3 – Valores de margem de corrosão para 25 anos de operação.....	76
Tabela 6-4 – Espessuras brutas utilizadas nas análises.	77
Tabela 6-5 - Perfis Utilizados.....	77
Tabela 6-6 – Proporcionalidade e Momento de Inércia dos reforçadores do Costado... 78	
Tabela 6-7 – Resultados da primeira análise (flambagem e resistência última)	81
Tabela 6-8 – Resultados da segunda análise (espessura mínima)	83
Tabela 6-9 – Resultado da terceira análise (redução abaixo da espessura mínima).....	85
Tabela 6-10 – Resultado da quarta análise (segunda redução abaixo da espessura mínima).....	87
Tabela 6-11 – Resultados da 5ª análise (flambagem dos painéis).....	89
Tabela 6-12 – Resultados da 6ª análise (Pós flambagem dos painéis)	92
Tabela 6-13 – Resultados da 7ª análise (aumento do espaçamento)	96
Tabela 6-14 – Resultados da 8ª análise (redução do espaçamento)	99
Tabela 6-15 – Resultados da 8ª análise (redução do espaçamento) (Cont.).....	100

Abreviações

ABS - American Bureau of Shipping

DEC – Design Environmental Condition

DLP – Dominant Loading Parameter

EFS – Environmental Severity Factor

FEMAP – Finite Element Modeling and Post-processing

FPI – Floating Production Installations

FPSO – Floating Production Storage and Offloading

ISE – Initial Scantling Evaluation

MARPOL – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

NASTRAN - NASA Structural Analysis

RAO – Response Amplitude Operator

SEAS – Sea Environment Assessment System

SVR – Steel Vessel Rules

TSA – Total Strength Assessment

VLCC - Very Large Crude Oil Carrier

1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

É de conhecimento que o mercado de exploração e produção de petróleo tem extrema importância para a economia mundial. Com a descoberta dos campos do pré-sal, devido à sua grande demanda, novas unidades de exploração e produção entraram em produção nos últimos anos, e muitas ainda estão sendo construídas para atender à demanda desses campos.

O projeto de uma unidade petrolífera, devido à sua complexidade e periculosidade, deve ser cuidadosamente desenvolvido, levando em consideração os aspectos de segurança, condição ambiental de operação, confiabilidade estrutural e demais aspectos que garantam sua operação por toda a vida útil. Além disso, o projeto e construção de um navio devem seguir os requisitos aplicáveis das regras das sociedades classificadoras.

Mediante a importância dessas estruturas, vê-se a necessidade de se buscarem conhecimentos que ajudem no desenvolvimento ou, até mesmo, no aperfeiçoamento ou confirmação dos métodos já utilizados para o desenvolvimento de seus projetos estruturais.

Um FPSO, na maioria dos casos, é projetado para operar no mínimo 20 anos, sem que seja necessária sua retirada da locação para docagem. Muitos fatores, entretanto, devem ser considerados no desenvolvimento de seu projeto, tanto para novas construções como projetos de conversão.

O projeto e construção estrutural de um FPSO são baseados em requisitos de regras aplicáveis de sociedades classificadoras. No entanto, estes requisitos podem ser alterados, considerando o tipo de serviço, demanda e locação/rota em que o navio opera.

Um FPSO é uma unidade estacionária e seus tanques de carga estão constantemente se enchendo e esvaziando, seu calado varia em uma determinada faixa continuamente. Devido à complexidade das amarrações, bem como conexão aos poços, a manutenção e inspeção são realizadas no local de operação.

Outro fator importante a ser considerado no projeto de um FPSO é o sistema de ancoragem, que pode apresentar diferentes configurações. Os sistemas mais utilizados no Brasil, são: “*Turret*” e “*Spread Mooring*”. O Sistema “*Turret*” (Figura 1-1) apresenta

menor restrição aos movimentos de guinada (movimento angular no eixo vertical), uma vez que o navio pode ser alinhado com a resultante das forças ambientais.



Figura 1-1 – Sistema *Turret* externo de ancoragem (Fonte: www.offshore-mag.com)

Por outro lado, o “*Spread Mooring*” (Figura 1-2) tem movimentos restritos e as cargas ambientais combinadas com o posicionamento no navio, podem causar danos maiores na estrutura.

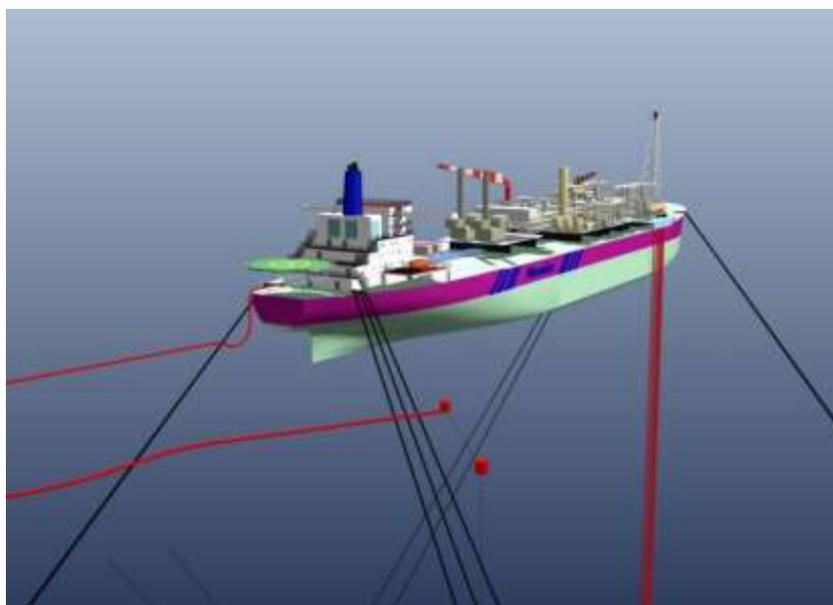


Figura 1-2 – Sistema *Spread* de ancoragem (Fonte: www.bluewater.com)

Dados coletados em 2016 e fornecidos pela Wood Group [1] apresentam um total de 169 FPSOs em operação no mundo. Dentre os principais países, o Brasil detém o maior número de unidades em operação (43 FPSOs); seguido pelo Reino Unido, China, Nigéria,

Angola e Austrália. A Tabela 1-1 relaciona a quantidade de FPSOs existentes no mundo e os países de origem.

Tabela 1-1 - Frota Mundial de FPSOs em Operação.

País	Quantidade	País	Quantidade
Brasil	43	Nova Zelândia	2
Reino Unido	16	Tailândia	2
China	14	Gabão	2
Nigéria	14	Gana	2
Angola	13	Costa do Marfim	2
Austrália	10	Canada	2
Noruega	9	Golfo do México	2
Vietnã	8	Filipinas	1
Indonésia	6	Itália	1
Malásia	5	Líbia	1
Guiné Equatorial	4	Egito	1
México	4	Congo	1
Índia	3	Mauritânia	1
Total			169

Estima-se que de 2017 a 2022 mais 54 unidades comecem a operar no mundo, dentre estas, 22 em território nacional [2]. Estes dados demonstram a importância do mercado de manutenção de plataformas FPSO no Brasil.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo a apresentação de uma análise de flambagem nos painéis do costado de boreste de um FPSO, com a finalidade de comprovar a eficácia do método prescritivo utilizado pelo ABS (*American Bureau of Shipping*), e apresentar as vantagens da utilização do método de elementos finitos para reavaliação estrutural de FPSOs em operação.

O método prescritivo obedece aos conceitos de controle de flambagem impostos pelas regras do ABS.

A análise por elementos finitos é dividida em duas partes: análise das placas que será feita através de um modelo global; e a análise dos reforços longitudinais, através de um modelo local refinado a partir do modelo global.

1.2 Metodologia

Segundo ABS [3], um aspecto importante no projeto de uma estrutura *offshore* é o comportamento de seus componentes estruturais à resistência última e flambagem.

Os critérios de projeto adotados pelo ABS são determinísticos, portanto as incertezas nas cargas atuantes e resistências não são especialmente abordadas, mas são inerentemente incorporadas aos fatores de utilização de resistência máxima permitidos [3].

A metodologia utilizada para realização da análise de flambagem apresentada neste trabalho é dividida em duas etapas. A primeira etapa consiste na seleção inicial dos escantilhões da estrutura, considerando as cargas máximas nominais esperadas para aquela estrutura, durante toda sua vida útil. Esta fase é chamada de ISE (*Initial Scantling Evaluation*). A segunda etapa, por sua vez, consiste na análise estrutural dos principais componentes do casco para verificação do seu desempenho, incluindo verificações de resistência, modos de falha associados ao escoamento, flambagem e resistência última. A segunda fase é conhecida como TSA (*Total Strength Assessment*).

O método descrito acima será realizado através do programa *ABS Eagle FPSO*. Inicialmente conhecido como *SafeHull*, o *software* foi desenvolvido pelo ABS na década de 1990 e posteriormente aperfeiçoado para atender aos critérios de locação específica.

Os modelos locais e global foram feitos no software FEMAP [4] e resolvidos no NASTRAN [5].

1.3 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 introduz as principais características das Unidades Flutuantes de Produção e armazenamento, conhecidos como FPSOs (Floating Production Storage and Offloading System).

O Capítulo 3 apresenta os critérios de carregamento da estrutura e como este carregamento é determinado.

O Capítulo 4 apresenta conceitos necessários para o entendimento da análise de flambagem, como uma breve introdução das teorias utilizadas para análise de estabilidade das placas e os critérios para análise impostos pelo ABS.

No capítulo 5, será apresentada a metodologia utilizada na análise de flambagem através do método de elementos finitos.

O capítulo 6 apresentará os exemplos de aplicação da metodologia.

As considerações finais do trabalho e sugestões para projetos futuros serão apresentadas no Capítulo 7.

1.4 Breve histórico das atividades offshore

Em 1891 engenheiros descobriram uma forma de extrair petróleo da água, dando surgimento as primeiras plataformas *offshore* [6]. Estruturas fixas de madeira foram construídas em *decks* e perfuravam a uma profundidade de 3 metros. A Figura 1-3 ilustra as primeiras plataformas offshore construídas no Grand Lake, em Saint Mary, Ohio [6].



Figura 1-3 - Primeiras plataformas offshore (Fonte: www.aoghs.org)

Na década de 1930, a exploração de petróleo foi expandida para águas mais profundas. O campo de Grand Isle, localizado a 10 quilômetros da costa, no Golfo do México, foi descoberto [6]. A partir desse momento, os operadores do campo viram a necessidade de aperfeiçoar sua tecnologia e descobrir uma forma de fixar as plataformas ao leito marinho, dando surgimento as plataformas fixas. Grandes estruturas de aço, compostas por pernas ocas com cerca de 22 metros de comprimento foram construídas. Essas pernas ocas serviram de guia para estacas que fixariam a estrutura ao leito marinho [6]. Em 1948 a plataforma Grand Isle tornou-se a maior plataforma de petróleo do mundo, e sua tecnologia em aço deu origem às plataformas de petróleo conhecidas nos dias de hoje (Figura 1-4).



Figura 1-4 - Exemplo de plataforma fixa dos dias atuais (Fonte: www.petrobras.com.br)

Em 1973, surgiu a primeira plataforma fixa de concreto, chamada *Beryl Alpha*, projetada para operar em uma lâmina d'água de 120 metros, localizada no campo de Beryl no Mar do Norte [6]. Sua estrutura consiste em 19 câmaras ocas de concreto, que formam a base para a plataforma. A Beryl alpha é ancorada no fundo do mar pelo seu peso próprio. A Figura 1-5 ilustra a estrutura da Beryl Alpha.



Figura 1-5 - Plataforma *Beryl Alpha* (Fonte: www.rigadvisor.co.uk)

Da década de 1980, o campo de Auger foi descoberto a quase 900 metros de profundidade. Nesse caso, a utilização de uma plataforma fixa seria inviável [6]. Surgiu, então, um novo e radical projeto para plataformas: as plataformas flutuantes.

1.4.1 TLP (*Tension Leg Platform*)

Segundo ABS [7], uma TLP consiste em um sistema de produção flutuante compostos por um sistema de ancoragem fixado no fundo do mar por tendões. Os tendões são ancorados através de estacas e tracionados no topo pela força resultante entre peso e empuxo.

Segundo JACOB [8], as TLPs possuem comportamento complacente para os movimentos no plano horizontal, visto que a força de restauração é fornecida pela componente da tração nos tendões. No plano vertical, os movimentos de translação vertical e rotação em torno das direções horizontais possuem períodos menores que o período dominante do mar.

Devido aos movimentos verticais restritos, esse sistema flutuante permite que o controle dos poços seja feito na superfície (completação seca).

Uma TLP convencional é composta por 4 colunas com um flutuador (*pontoons*) e ancoradas por 3 tendões em cada coluna. A Figura 1-6 mostra uma TLP típica.



Figura 1-6 – Estrutura de uma TLP típica (<http://www.petrobras.com.br>)

1.4.2 *Spar Buoy*

Uma *SPAR Buoy* convencional é uma plataforma de produção flutuante formada por uma única coluna com grande calado. Estas estruturas possuem baixo movimento no sentido vertical (*heave*) devido ao grande calado [7].

A coluna é equilibrada, devido ao baixo centro de gravidade. Esta estabilidade é possível devido ao preenchimento de uma câmara da parte inferior da coluna com um

material mais denso do que a água ou, em alguns casos, a *Spar Buoy* é lastreada com água do mar.

Ela possui duas variações: A *SPAR Buoy truss* formada por elementos treliçados conectando a parte superior do casco com o tanque inferior e a *SPARr Buoy cell* formada por vários cilindros verticais [8]. A Figura 1-7 ilustra as duas variações de uma *SPAR Buoy*.

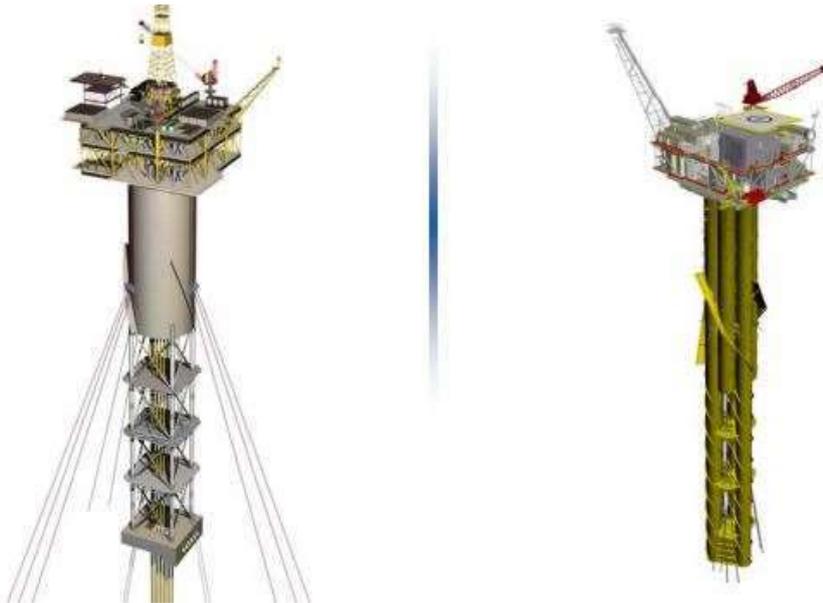


Figura 1-7 – Spar Truss / Spar Cell [9].

1.4.3 Semissubmersíveis

De acordo com BARROS [10], uma plataforma semissubmersível é uma unidade composta por dois flutuadores (*pontoons*) compartimentados em tanques, que oferecem lastro e flutuação à plataforma.

Segundo JACOB [8] a ancoragem dessas plataformas no leito marinho pode ser feita através de um sistema em catenária convencional ou *Taut-Leg*.

A grande vantagem da utilização das semissubmersíveis é que esta configuração de casco possui menor movimento vertical, comparado a outros cascos flutuantes.

As semissubmersíveis não permitem completação seca, além de não terem capacidade de armazenamento; precisam estar conectadas a oleoduto de exportação, ou enviar a produção para um FPSO [8].

A Figura 1-8 é um exemplo de uma plataforma semissubmersível de perfuração.



Figura 1-8 – Semissubmersível de perfuração (Fonte: www.opetroleo.com.br)

1.4.4 FPSO

Os FPSOs surgiram com a necessidade de exploração em águas profundas. Inicialmente, com o término da vida útil de navios petroleiros, os cascos foram convertidos e reutilizados na construção das plataformas, devido ao menor custo e ao tempo de conversão, comparados à construção de uma nova unidade.

Em 1974, o primeiro FPSO foi instalado na Indonésia, para exploração no campo de Adjurna. Alguns anos depois, em 1977, a companhia Shell colocou em serviço um FPSO para a exploração do campo de Castellon na costa mediterrânea da Espanha.

A primeira unidade flutuante de produção e armazenamento a operar no Brasil foi instalada em 1979 na Bacia de Campos, no Campo de Garoupa. O FPSO foi batizado P-34 e foi convertido a partir do navio-tanque PP Moraes. Quase três décadas depois, em 2006, a P-34 retorna a operar, desta vez no campo de Jubarte, na Bacia de Campos.

"A P-34 é um símbolo da tecnologia nacional, por sua trajetória histórica, que revela, em seu percurso, o estado da arte das tecnologias de produção no mar, com um posicionamento de vanguarda mundial", diz Carlos Tadeu Fraga, gerente executivo do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras [11].

De acordo com SOUZA [12], a oferta menor de navios petroleiros e o preço elevado do mercado em adquirir ou converter uma embarcação vem favorecendo a construção de novos FPSOs. Uma vez que existem mais estaleiros aptos a construir cascos de FPSOs, o custo passou a ser mais baixo do que a construção de semissubmersíveis.

Para atender a meta de produção de 4,2 milhões de barris por dia em 2020, a Petrobras iniciou o projeto de construção de 8 plataformas FPSO, chamados "Replicantes" [13]. O primeiro replicante, FPSO PETROBRAS 66 (Figura 1-9), foi entregue em fevereiro de 2016 e segue para locação no Campo de Lula Sul, na Bacia de Santos [13].



Figura 1-9 – FPSO PETROBRAS 66 (Fonte: www.petrobras.com.br)

2 CONCEITOS ESTRUTURAIS E OPERACIONAIS DOS FPSOS

As Unidades Flutuantes de Produção e Armazenamento de Óleo ou FPSO (“*Floating Production Storage and Offloading*”) são unidades flutuantes e estacionárias que têm capacidade de produzir e armazenar hidrocarbonetos, e efetuam o escoamento destes através de uma embarcação auxiliar. Devido a sua capacidade de armazenamento de óleo e facilidade de instalação, são utilizados preferencialmente em regiões *offshore* de grandes profundidades, afastados da costa, uma vez que não necessitam de uma estrutura local de linhas de duto para a exportação de óleo para um terminal terrestre.

A ideia central do FPSO é garantir uma grande capacidade de armazenamento que permita a instalação dessas unidades em campos muito afastados da costa, onde a instalação de linhas de duto torna-se proibitiva [14].

A Figura 2-1 apresenta um FPSO com casco de navio e sistema *Turret*¹ de ancoragem.

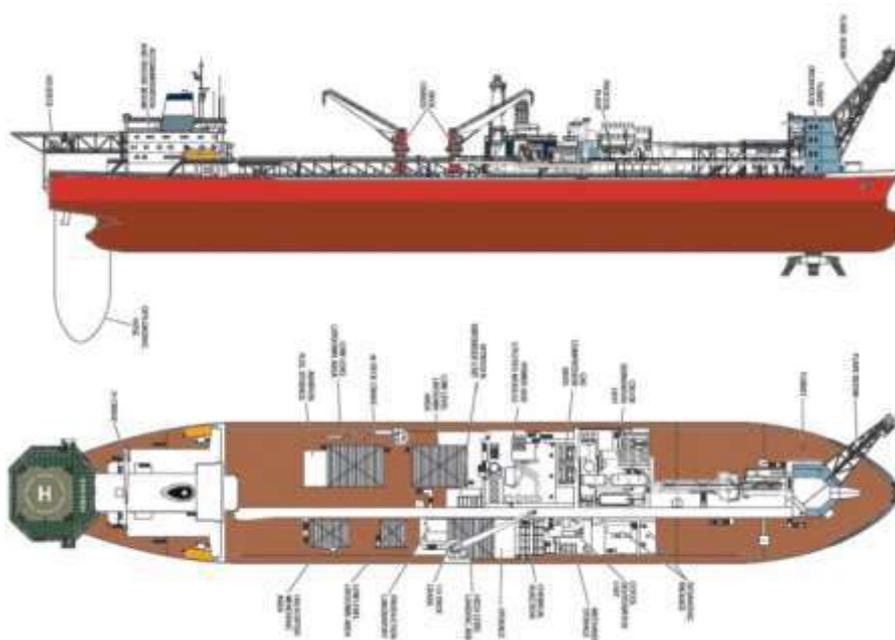


Figura 2-1 – Exemplo de FPSO do tipo navio (Fonte: www.globalsecurity.org)

¹ Sistema de ancoragem que permite que o FPSO gire ao redor dos *risers* e linhas de ancoragem (BARROS, 2015).

As principais vantagens da utilização do FPSO podem ser listadas a seguir [15]:

- Extensa área de convés capaz de acomodar e suportar um peso excessivo de diversos sistemas e equipamentos.
- Simples construção e reduzido custo de investimento para operação em águas profundas e ultra profundas.
- Fácil mobilização da unidade para outros campos *offshore*.
- Grande capacidade de produção das plantas de processo e armazenamento de óleo nos tanques de carga.
- Baixo investimento adicional para a conversão de navios petroleiros, no caso de disponibilidade de navios próprios.
- Opção ideal para regiões sem sistema de exportação de óleo (oleoduto).

2.1 Projeto de conversão e nova construção

O conceito dos FPSOs convertidos a partir dos navios VLCC (*“Very Large Crude Oil Carrier”*) surgiu após uma resolução da MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*), que implementou a proibição gradual dos petroleiros de casco singelo. Combinada com a necessidade de novas unidades para exploração em águas profundas e a desmobilização desses navios, surgiram os projetos de adaptação para FPSOs.

O projeto de conversão consiste basicamente em:

- Reavaliação estrutural do VLCC, como trocas das chapas e instalação de reforços estruturais, caso necessário;
- Instalação de *“stools”*, para suportar os módulos de produção que serão instalados;
- Extensão ou adaptação estrutural para o sistema de ancoragem (*“Spread Mooring”*, *“Risers”*, *“Dynamic Position”*, etc.);

- Instalação de balcões de “*risers*”, “*fairleads*”, paiol de amarras;
- Instalação de superestrutura de acomodações e “*Helideck*”;
- Retirada do sistema de propulsão.

É importante ressaltar que a viabilidade econômica do projeto de conversão está diretamente relacionada às condições estruturais/conservação e ao projeto inicial do navio, bem como às características ambientais do futuro local de operação.

Atualmente, devido à escassez dos navios VLCCs antigos no mercado, a vantagem econômica do projeto de conversão já não é mais tão acentuada. No entanto, as vantagens da utilização de FPSO ainda permanecem.

Visto que com a construção de estaleiros aptos à fabricação de novos FPSOs, e considerando a vantagem que os FPSOs proporcionam devido à grande capacidade de armazenamento, excluído a necessidade da utilização de malhas de dutos para o escoamento da produção; o projeto de novas construções, mais simplificado, com um “*layout*” menor e mais seguro entrou em atuação.

A construção de um FPSO novo pode ser feita baseada no projeto de um petroleiro, uma vez que o projeto já é conhecido e muitos estaleiros já possuem habilidade na sua execução. Ou ainda, como já citado, é viável investir num projeto específico para FPSO visando a simplificação da estrutura como, por exemplo, a retirada do sistema propulsivo e a modificação do formato do casco. O Projeto de “Replicantes” da Petrobras pode ser citado como exemplo.

Segundo pesquisa realizada em julho de 2016 pela Offshore Magazine [1], existem atualmente 169 FPSOs em operação. A Figura 2-2 relaciona a quantidade de navios FPSO convertidos e novas construções, que estão em operação.

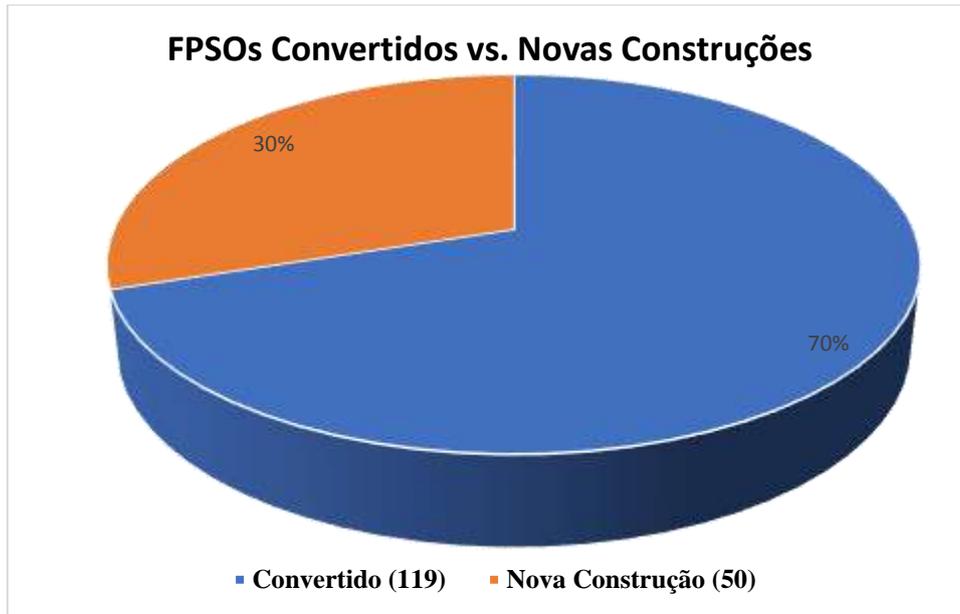


Figura 2-2- Comparação entre FPSOs convertidos e novas construções.

2.2 Aspectos operacionais

Os FPSOs possuem características e funções bem diferentes dos petroleiros, apesar de possuírem a mesma estrutura. Segundo NETO E PORTELLA [15], algumas dessas funções são:

- Processar óleo e gás através das instalações da planta de processo;
- Importar óleo e gás através do sistema de *risers*;
- Exportar óleo, gás e água através do sistema de *risers* e do sistema de alívio;
- Armazenar óleo a bordo, nos tanques da embarcação;
- Permanecer na posição, através do sistema de ancoragem (*turret*, *spread mooring*, ou "DICAS" ou sistema de manutenção da posição (*station keeping system*));
- Queima de emergência do gás excedente através do *flare*;
- Prover acomodações para a tripulação e pessoal de manutenção;

- Prover área para operações de decolagem e partida de helicópteros (*Helideck*).

2.3 A estrutura do FPSO

2.3.1 O Casco

O primeiro e mais conhecido é o casco dos petroleiros convertidos. São cascos de navios de grande porte, mais largos e menos fundos, para carregar maiores volumes. Possuem *design* hidrodinâmico com menor resistência de avanço (Figura 2-3).



Figura 2-3- Casco típico VLCC (Fonte: www.offshore-mag.com)

Os cascos simplificados surgiram na concepção das novas construções. É um navio com proa achatada e possui formato semelhante a uma “caixa de sapato”. Além disso, não é necessário um sistema propulsivo, e o projeto é concebido de acordo com a necessidade de carga especificada, resultado numa casa de máquinas bem menor do que a de um navio VLCC convencional. Um exemplo de casco com essa configuração é a P-66, que faz parte do Projeto dos “Replicantes” da Petrobras (Figura 2-4).



Figura 2-4 – Popa do casco do FPSO P-66.

As duas configurações de casco citadas, seguem os conceitos básicos de geometria de um navio como mostrado na Figura 2-5.

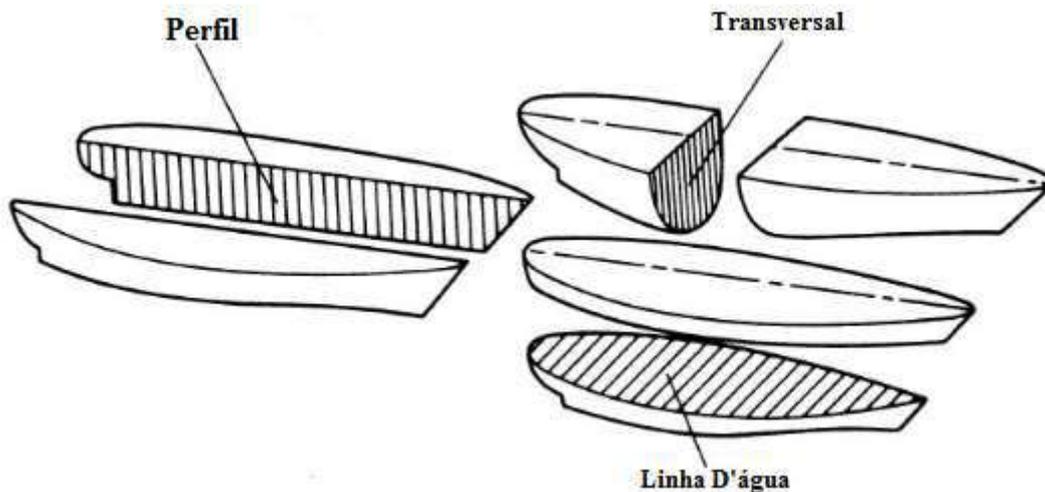


Figura 2-5 – Principais planos de navio típico [16]

A geometria do casco normalmente tem apenas um plano de simetria, chamado de plano de perfil (“*middle line plan*”) e este é plano de referência principal. O plano de linha d’água é o plano perpendicular à linha média, no sentido horizontal e o corte perpendicular a estes dois planos é conhecido como plano baliza ou seção transversal.

Existe um outro conceito de casco de FPSO utilizado pela Petrobras desde 2007 no campo de Piranema, em Sergipe: o FPSO Monocoluna (Figura 2-6). O FPSO monocoluna

tem como característica marcante a utilização de um casco com apenas uma coluna. Em relação aos conceitos atuais, a plataforma monocoluna apresenta vantagens significativas:

- Menores movimentos, possibilitando a utilização de SCR em catenária livre;
- Maior reserva de estabilidade avariada;
- Flexibilidade operacional;
- Boa relação Peso de convés por Deslocamento.

A Petrobras está desenvolvendo um projeto de monocoluna, o Mono-BR, que possui uma abertura na parte central, que permite a entrada de água com a finalidade de melhorar os movimentos verticais do casco [17]. Além do formato do casco, dispositivos redutores de movimento, chamados de “saia” e de moonpool, foram dimensionados para melhorar ainda mais esta característica.



Figura 2-6 – Casco do FPSO Monocoluna (Fonte: www.petrobras.com.br)

2.3.2 Topside

É a estrutura localizada acima no casco, no convés, composta por módulos de processamento. A função dos módulos ou planta de processo é separar e tratar o óleo produzido pelos poços. Tipicamente, é composta pelos módulos de separação de óleo,

compressão e tratamento de gás, geração de energia, *pipe-rack*, acomodações, *flare* (queimador) e heliponto.

2.3.3 Estrutura interna do casco

Segundo FONSECA [18], a estrutura do navio considera desde a ossada ou esqueleto até o forro exterior (chapeamento).

Cada componente da estrutura do navio é projetada considerando os esforços a que será submetido (esforços longitudinais, transversais e locais).

FONSECA [18] considera que a ossada do navio é composta por dois sistemas de vigas: as vigas longitudinais e as vigas transversais, além dos reforços locais.

A seguir, serão apresentados os principais componentes da estrutura interna do FPSO tipo navio.

2.3.3.1 Elementos Longitudinais

Os elementos que compõem as seções longitudinais (costado, fundo, convés) têm a função de contribuir para resistência aos esforços longitudinais a que o FPSO está sujeito.

Além do costado, fundo e do convés, existem as anteparas longitudinais e os reforçadores longitudinais, que compõe a estrutura da viga-navio. As anteparas longitudinais são estruturas que, além de dividirem os compartimentos internos, são responsáveis por suportar as cargas de viga-navio. Obrigatoriamente, um FPSO tipo navio deve possuir duas anteparas longitudinais.

As vigas e reforçadores longitudinais, tem por finalidade reforçar o chapeamento do fundo, costado, convés, e anteparas longitudinais, são elas:

- Longarinas: estruturas instaladas no fundo do navio no sentido longitudinal.
- Sicordas: estruturas instaladas no convés interno, no sentido longitudinal.
- Longitudinais: reforços perfilados instalados no chapeamento do convés, fundo, costado e antepara longitudinal.

2.3.3.2 Elementos Transversais

As vigas e o chapeamento transversal têm a finalidade de dar forma ao exterior do casco e resistirem à tendência de deformação do casco pela ação dos esforços transversais.

As anteparas transversais estanques têm por finalidade subdividir os espaços internos, delimitando os tanques, além de compor a resistência estrutural do casco. As anteparas têm a capacidade de suportar o convés e as cargas concentradas, distribuindo os esforços locais para uma maior região do casco. Existem também anteparas transversais não estanques, que têm por função reduzir o efeito de superfície livre que se define pelo movimento dos líquidos no interior do tanque

As cavernas, por sua vez, são elementos transversais, que ajudam a sustentar o chapeamento externo no navio, dispostas ao longo do comprimento do casco e igualmente espaçadas entre si.

2.3.3.3 Elementos principais de apoio e reforços locais.

Os prumos (verticais) e travessas (transversais) são reforços perfilados dispostos nas cavernas e anteparas com a finalidade de reforçá-las.

As borboletas são chapas em forma de esquadro que servem para conectar dois perfis ou duas superfícies que fazem ângulo entre si.

As escoas são estruturas transversais dispostas nas anteparas transversais e tem a finalidade de reforçar a estrutura e reduzir o efeito de superfície livre dos líquidos dentro do tanque.

A Figura 2-7 mostra as principais estruturas internas do FPSO.

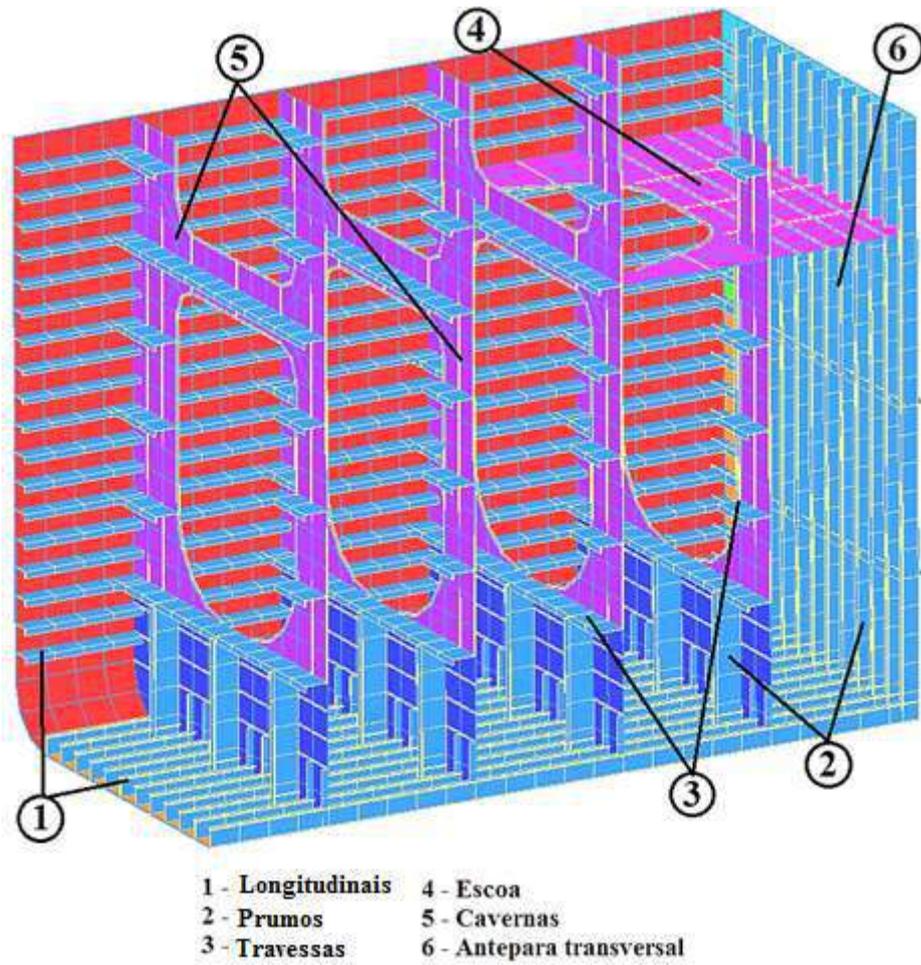


Figura 2-7 – Estruturas internas do casco.

3 CARGAS ATUANTES NO FPSO

3.1 Introdução

Um navio pode ser carregado de diferentes formas, dependendo do tipo de operação que este estará sujeito.

De acordo com a regra ABS [7], na concepção da estrutura do FPSO, todos os componentes de carga em relação à viga navio e à estrutura local devem ser levados em consideração. Estes incluem:

- Pressão hidrostática dos tanques de carga ou lastro atuando na superfície interna do casco;
- Pressão hidrostática da água do mar atuando na superfície externa do casco;
- Pressão hidrodinâmica induzida por ondas agindo na superfície externa do casco;
- Forças inerciais devido ao movimento ou aceleração da estrutura, dos equipamentos e carga dos tanques.

Os carregamentos mais significativos relacionados à viga navio são os momentos e cortantes em águas tranquilas, que são resultantes do peso da estrutura, do carregamento dos tanques e do empuxo. Os carregamentos induzidos por onda, como momentos fletores verticais e horizontais, cortantes e momentos de torção também devem ser considerados (Figura 3-1).

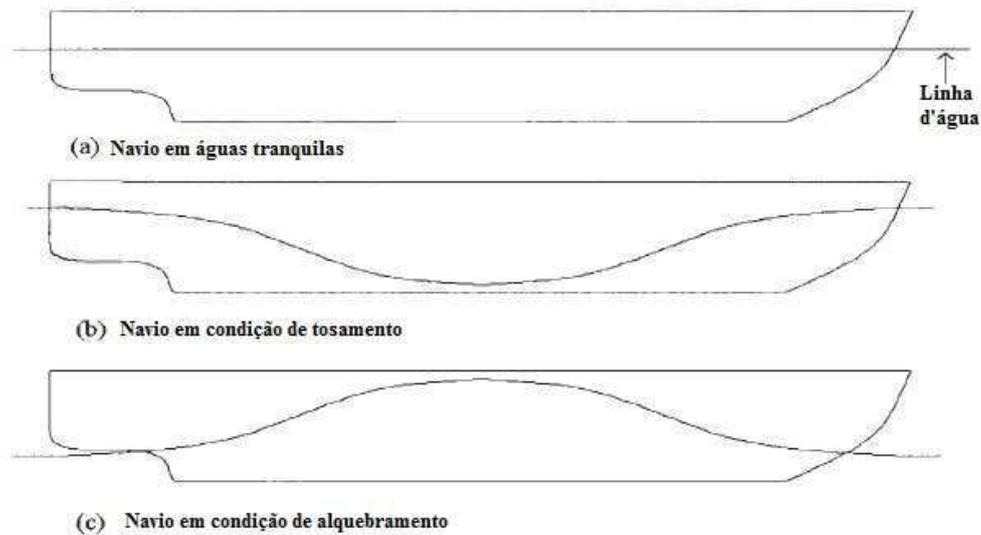


Figura 3-1 – Exemplo de momentos fletores verticais induzidos por uma onda regular [19].

Além disso, um FPSO submetido a ondas, comporta-se como um corpo rígido, possuindo seis graus de liberdade, sendo três de translação (*surge*, *sway* e *heave*) e três de rotação (*roll*, *pitch* e *yaw*), como mostra a Figura 3-2.

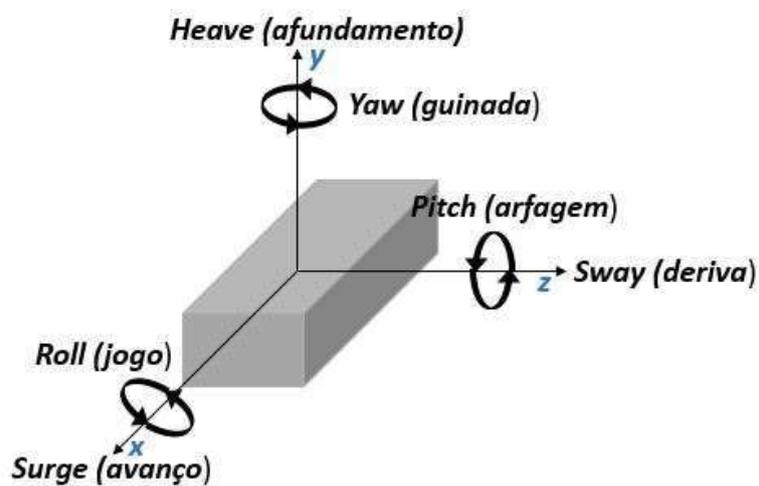


Figura 3-2 – Movimentos do FPSO.

A complexidade das cargas, pressões, e forças atuantes no navio FPSO, torna muitas vezes difícil a compreensão precisa de como várias cargas e coeficientes afetam os escantilhões requeridos [12].

3.2 Fatores de Severidade Ambiental (ESFs)

Em 1993, o ABS desenvolveu um programa para avaliação estrutural de navios petroleiros, chamado de SAFEHULL.

O critério de carregamento do SAFEHULL foi desenvolvido a fim de definir representações realistas das componentes dinâmicas de carregamento e das combinações de carregamento para a avaliação da resistência estrutural do navio [12].

Inicialmente, a análise dos FPSOs era feita através do SAFEHULL, no entanto, devido às diferenças relacionadas à locação e operação entre navio e FPSO, o ABS desenvolveu um novo sistema para correção dessas diferenças, o ABS Eagle FPSO.

O Eagle FPSO possui um sistema de avaliação do ambiente de locação específica (SEAS) responsável pelo cálculo dos fatores de severidade ambiental (ESF). Estes fatores são responsáveis pelo ajuste de carregamento e efeitos de carga causado pela locação específica e do longo prazo do local de operação. Existem dois tipos de ESF: alfa (α) e beta (β).

Segundo ABS [7], os fatores alfa (α) são utilizados para ajustar a expectativa de performance de resistência à fadiga entre o serviço de mar irrestrito e as condições ambientais do local de operação a longo prazo. Por sua vez, os fatores beta (β) são utilizados principalmente para o ajuste das componentes do carregamento dinâmico.

“Na prática, o casco pode ser carregado em uma grande variedade de padrões de carregamento de tanques e calados. O valor implícito de todos os ESFs dos tipos alfa e beta para o serviço de mar irrestrito é 1.0” [7].

3.2.1 RAO

O *software* SEAS do FPSO tem por finalidade a determinação dos fatores de severidade ambiental, α e β . Estes fatores são determinados a partir da combinação dos RAOs com informações das condições ambientais das rotas e locação. Esta combinação resultará na geração dos espectros de resposta do FPSO.

Os RAOs são representações matemáticas das respostas dinâmicas do navio e efeitos de carregamento para uma onda senoidal de amplitude unitária [10].

No SEAS há duas formas de geração de RAOs: através das funções de RAO do banco de dados (*database*) do sistema; ou através da análise do *Seakeeping*² (programa PRECAL).

O *database* de RAO consiste na análise *Seakeeping* de cinco navios existentes com comprimento entre 150 metros e 350 metros considerando as configurações usuais de um FPSO. O programa escolhe dois navios com comprimentos próximos ao navio em análise e faz a combinação dos RAOs com os espectros de onda fornecidos pelo usuário, gerando os espectros de resposta. Em seguida, o SEAS faz uma interpolação dos espectros encontrados.

O procedimento do ABS [21] recomenda que a análise via *database* seja realizada apenas de forma preliminar, uma vez que as informações detalhadas das características do navio ainda não estão disponíveis. Após a validação dessas características, é necessário que a análise de *Seakeeping* seja realizada, para obtenção de resultados mais coerentes.

A análise do *Seakeeping* consiste na geração de um modelo hidrodinâmico 3D do casco, que é sujeito a ondas regulares para determinação do RAO. Este modelo hidrodinâmico é gerado pelo PRECAL a partir de informações fornecidas pelo usuário, que incluem o plano de linhas do navio, informações de distribuição de peso leve e peso morto, comprimento, boca, pontal e calado.

Após a obtenção do RAO é possível determinar os espectros de resposta (Figura 3-3), como mostra a equação 1 abaixo:

$$S_z(\omega, H_s, T_z, \theta) = \text{RAO}(\omega, \theta)^2 \cdot S_\eta(\omega, H_s, T_z) \quad (1).$$

Onde:

$S_z(\omega, H_s, T_z, \theta)$ = espectro de resposta;

$\text{RAO}(\omega, \theta)^2$ = função de transferência de movimentos/ momentos ou cortante;

$S_\eta(\omega, H_s, T_z)$ = espectro de mar.

² Comportamento dinâmico da embarcação no mar (fonte: www.deno.oceanica.ufrj.br)

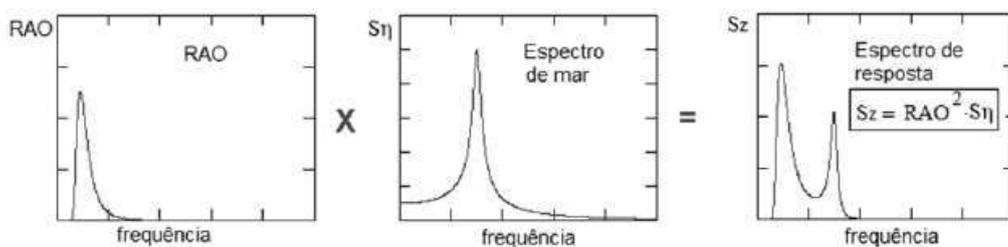


Figura 3-3 - Espectro de Resposta [10].

3.2.2 ESF Alfa (α)

O fator de severidade ambiental α é responsável pelo ajuste do dano de fadiga devido às cargas dinâmicas induzidas por ondas e para avaliação do dano de fadiga acumulado durante o serviço anterior do navio.

Segundo ABS [7], o conceito do fator α (alfa) é comprar o dano por fadiga resultante de diferentes condições ambientais. Este possui duas formas de aplicação: para o ajuste do dano à fadiga devido ao carregamento dinâmico induzido por onda; e para avaliar o dano acumulado durante da vida como navio.

O dano de fadiga é calculado para condição ambiental do Atlântico Norte e para a condição da rota/locação e, em seguida, é determinado o ESF α que adequará a condição ambiental das rotas ou locação do FPSO [10].

Valores de α maiores que 1,0 representam um aumento da vida de fadiga em relação às ondas do Atlântico Norte [7]. Este aumento é devido a menor severidade das condições ambientais do FPSO quando comparadas às condições ambientais do Atlântico Norte.

Em resumo, o ESF alfa é calculado da seguinte forma:

- Cálculo do espectro de resposta (RAO x Espectros de mar);
- Obtenção dos momentos espectrais;
- Cálculo da Distribuição de Rayleigh, frequência de cruzamento zero e parâmetro de banda;
- Cálculo do dano para as condições ambientais específicas (D_s);
- Cálculo do dano para as condições do Mar do Atlântico Norte (D_u).

- Obtenção do ESF α através da equação $\alpha = \frac{D_s}{D_u}^{0,65}$

Para o cálculo do dano, devem ser calculados os momentos espectrais que serão utilizados para o cálculo da distribuição de Rayleigh, frequência de cruzamento zero e parâmetro de banda.

O ESF alfa é utilizado para a análise de fadiga apenas para o método simplificado. O método por elementos finitos considera o ESF Beta (β) para fadiga.

3.2.3 ESF Beta (β)

Os fatores β fazem o ajuste do carregamento dinâmico das cargas para definir a força da viga-navio (cargas induzidas por ondas).

O ESF beta introduz uma comparação entre as condições ambientais em que a embarcação pretende operar e as condições ambientais da condição de mar irrestrito do Atlântico Norte [7]

Os fatores β são definidos pela razão entre o valor extremo mais provável de um determinado carregamento para uma condição ambiental específica e o mesmo carregamento na condição ambiental do Atlântico Norte, como mostra a Equação (2):

$$\beta = \frac{L_S}{L_U} \quad (2).$$

Onde,

L_S = Valor mais provável para um determinado carregamento no ambiente específico,

L_U = Valor mais provável para um determinado carregamento no Atlântico Norte.

Segundo ABS [7] valores de β igual a 1,0 correspondem à condição de serviço irrestrito de um navio no mar. Os valores de β menores que 1,0 representam um ambiente menos severo em comparação ao mar irrestrito.

Existem dois tipos de fatores β : os fatores utilizados para avaliar a resistência e fator utilizado para análise de fadiga. O primeiro tipo é utilizado para avaliar a resistência do

casco, tanto para o método simplificado, quanto para o método de elementos finitos. O segundo tipo é utilizado para fadiga apenas quando empregado o Método dos Elementos Finitos.

Existem 13 componentes de carga dinâmica na Regra ABS [7] para as quais os fatores de ajuste β foram derivados, de acordo com a Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Componentes de carregamento para os fatores β .

1	VMB	Momento Fletor Vertical
2	HBM	Momento Fletor Horizontal
3	EPP	Pressão externa de Bombordo
4	EPS	Pressão externa de Boreste
5	VAC	Aceleração Vertical
6	TAC	Aceleração Transversal
7	LAC	Aceleração Longitudinal
8	PMO	Movimento de Arfagem
9	RMO	Movimento de Balanço
10	RMV	Movimento Vertical Relativo no Pique de Vante
11	WHT	Altura de Onda
12	VSF	Força Cisalhante Vertical
13	HSF	Força Cisalhante Horizontal

Os fatores β são uma função direta do carregamento induzido por onda a longo prazo para a locação esperada, em comparação com carregamento do mar irrestrito. Além disso, os fatores β precisam abordar outras diferenças e fatores entre a base do projeto de mar e ancoragem/trânsito/instalação/reparo/inspeção. Isto inclui [7]:

- Diferentes períodos de retorno para as cargas ambientais (20 anos para Mar irrestrito comprado com 100 anos para o local de operação, 10 anos para trânsito e 1 ano para inspeção);
- Efeitos do sistema de ancoragem sobre os efeitos de carga da instalação;

- Diferente caracterização de dissipação de energia das ondas entre o oceano aberto e a locação específica;
- Aproximação relativa de períodos naturais de resposta do sistema global a cargas significativas induzidas pelo ambiente em tais períodos (possíveis efeitos de amplificação dinâmica).

Os ESFs β são aplicados às forças cisalhantes, momento fletor horizontal, pressões externas e acelerações de forma análoga ao momento fletor vertical.

3.3 Componentes de Carga

As cargas dinâmicas representam a resultante combinada da pressão de onda externa, da pressão interna do tanque e dos efeitos inerciais nos componentes estruturais e de massa.

Para se determinar a resposta estrutural do FPSO, é necessário considerar todas as cargas que afetam diretamente a viga-navio e as estruturas locais. As componentes de cargas consideradas são:

- Os momentos de flexão e torção induzidos por onda, bem como as forças cortantes verticais e horizontais de viga-navio;
- As acelerações verticais, transversais e longitudinais dos tanques de carga e lastro (pontos de fronteira);
- As acelerações ao longo do comprimento do navio;
- Os movimentos de balanço e arfagem (*pitch*) do navio;
- As pressões internas nos tanques;
- As pressões externas de onda ao longo do comprimento do navio.

Os valores das componentes de cargas são calculados para cada instante de tempo quando o parâmetro de carregamento dominante (DLP) atinge o valor máximo para cada condição de onda em cada uma das condições de carregamento.

3.4 Critério de Carregamento

O *Eagle* FPSO define uma representação realística das componentes dinâmicas de carregamento e das combinações desses carregamentos para avaliar a resistência da embarcação.

Segundo ABS [20], os casos de carregamento são selecionados com base nas condições de carregamento do navio, nos parâmetros de carregamento dominantes (DLP) e nas condições ambientais de projeto.

As condições de carregamento referem-se à condição de enchimento dos tanques (existência ou ausência de óleo ou lastro no interior do tanque). Estas condições são definidas a partir das condições típicas encontradas nos manuais de carregamento do navio. As condições de carregamento normalmente utilizadas como condições representativas são:

- Condição de lastro ou calado mínimo após *offloading* (todos os tanques de carga vazios);
- Carregamento intermediário (tanques 33% preenchidos);
- Carregamento intermediário (tanques 50% preenchidos);
- Carregamento intermediário (tanques 67% preenchido);
- Condições de carga total (tanques cheios);
- Condições de inspeção e reparo;
- Condições de teste dos tanques - durante a conversão e após a construção.

Segundo ABS [7], os parâmetros de carregamento dominante (DLP) referem-se basicamente aos efeitos de carga, decorrentes dos movimentos do navio e cargas de ondas, que produzem a resposta estrutural máxima para membros estruturais críticos.

Os seguintes DLPs são identificados como necessários para desenvolver os casos de carga para a estrutura do casco [20]:

- Momentos de flexão verticais e horizontais;
- Acelerações verticais e laterais;
- Forças cisalhantes verticais e horizontais;
- Ângulo de *roll*.

A Condição Ambiental de Projeto (DEC) é definida como a condição extrema com uma combinação específica de vento, ondas e corrente para a qual o sistema deve ser projetado [7]. Nas aplicações *offshore*, é necessário um período de retorno de 100 anos para estabelecer valores de projeto para o controle dos efeitos induzidos pelas condições ambientais.

Ainda segundo ABS [20], para um FPSO, as cargas induzidas pelo meio ambiente são dominadas por ondas, que são caracterizadas por alturas significativas, formas espectrais e períodos de onda associados.

As estatísticas de longo prazo para locação esperada de um FPSO são determinadas através de uma distribuição conjunta de probabilidades entre as alturas significativas e os períodos das ondas no local específico de operação do FPSO.

Cada caso de carregamento consiste na combinação de uma condição de carregamento operacional em um conjunto de cargas estabelecidas na consideração de cada DLP específico e de um sistema de ondas para um elemento estrutural de interesse [12].

SOUZA [12] exemplifica os casos de carregamento através de uma matriz representativa, considerando uma seleção de condições de carregamento de diversas regiões estruturais, combinada aos DLPs a serem considerados a fim de garantir a máxima demanda estrutural. Os casos de carregamento devem ser selecionados de forma a considerar as condições mais severas que a estrutura do navio está submetida.

A Tabela 3-2 mostra um exemplo de matriz de casos de carregamento:

Tabela 3-2 – Matriz dos casos de carregamento representativos [12]

Condição de Carregamento		Cheio (calado máximo)	Lastro (calado leve)	Parcialmente cheio (33%)	Parcialmente cheio (50%)	Parcialmente cheio (67%)
Elemento Estrutural						
Convés	Chapeamento longitudinal e vigas	1a				1a
Fundo	Chapeamento longitudinal e vigas	1a, 2a, 2c, 4a	1a, 2a, 2c, 4 ^a	2a	2c	1b, 2a, 2c
Anteparas	Longitudinal	1a, 1b			4a	1a, 1b
	Transversal	4a, 4b	4a, 4b			4a, 4b
	Escoa	2b, 2d	4a, 4b	4a	4b	2b, 2d
Costado	Chapeamento longitudinal e vigas (meio-navio)	4a, 4b	4a, 4b	4b		4a, 4b
	Chapeamento longitudinal e vigas (porão de vante)	3a, 3b	3 ^a	3b		3a, 3b
	Chapeamento longitudinal e vigas (porão de ré)	3a, 3b	3 ^a		3a, 3b	3a, 3b
Elementos primários		4a, 4b, 2b, 2d	4a, 4b		4a, 4b	4a, 4b, 2b, 2d

Legenda:

Parâmetros de carregamento com os respectivos ângulos de incidência da onda:

1a – Momento Fletor vertical (tosamento) para 0° e 180°

1b - Momento Fletor vertical (alquebramento) para 0° e 180°

2a – Aceleração vertical (trim proa, linha de centro) para 180° e 135°

2b - Aceleração vertical (trim proa, fora da linha de centro) para 150°, 135°, 105° e 75°

2c - Aceleração vertical (trim popa, linha de centro) para 180° e 135°

2d - Aceleração vertical (trim popa, fora da linha de centro) para 150°, 135°, 105° e 75°

3a – Aceleração longitudinal (tanque de vante, boreste inclinado para baixo) para 105 e 90°

3b - Aceleração longitudinal (tanque de vante, boreste inclinado para cima) para 105 e 90°

4a – Balanço (boreste inclinado para baixo) para 90° e 75°

4b - Balanço (boreste inclinado para cima) para 90° e 75°

4 FLAMBAGEM

4.1 Introdução

Flambagem é o fenômeno de instabilidade que ocorre em peças esbeltas quando submetidas a um carregamento de compressão axial. As estruturas de cascas finas, muito utilizadas em projetos de engenharia aeronáutica, naval e petroquímica, sofrem muito com os efeitos de flambagem devido à esbeltez de sua estrutura, ou seja, a relação largura e espessura das placas.

As propriedades de flexão de uma placa dependem muito da sua espessura, comparadas às suas outras dimensões. TIMOSHENKO [21] refere-se a três principais tipos de placas no estudo de flambagem de placas e casca:

- Placas esbeltas com pequenas deformações;
- Placas esbeltas com grandes deformações;
- Placas espessas.

As placas esbeltas com pequenas deflexões são aquelas cujo deslocamento transversal é pequeno em comparação com sua espessura. Para essas placas, usualmente, assume-se que: não há deformação no plano médio da chapa; seções planas normais ao plano médio da placa permanecem planas após a flexão; e a tensão normal na direção transversal da chapa pode ser desconsiderada [22].

As placas esbeltas com grandes deflexões são aquelas cujos deslocamentos verticais dependem das deformações por flexão e da carga axial normal atuante no interior da placa. Neste caso, o comportamento da placa passa a ser não linear. Podemos considerar as seguintes hipóteses para este tipo de placa: há deformações no plano médio da placa após a flexão; seções planas normais ao plano médio da placa permanecem planas e normais ao plano médio após a flexão; e a tensão normal na direção transversal da chapa pode ser desconsiderada [21].

As placas espessas são aquelas cuja deflexão transversal se aproxima mais do valor da espessura da placa, mas ainda são pequenos se comparado com as demais dimensões. Os deslocamentos transversais resultam de deformações devido à flexão e ao

cisalhamento considerando as seguintes hipóteses: o plano médio da placa permanece indeformável após a flexão; seções planas normais ao plano médio da placa permanecem planas após a flexão, mas não necessariamente normais ao plano médio; e a tensão normal na direção transversal da chapa pode ser desconsiderada [21].

As placas do fundo no casco de um navio estão sujeitas a uma pressão hidrostática uniformemente distribuída e a esforços no plano das placas causados pela flexão do casco como uma viga [21].

Os próximos itens deste capítulo apresentam respectivamente uma breve introdução às principais teorias aplicadas ao estudo de placas e como são aplicadas essas teorias segundo as normas do ABS.

4.2 Teoria das Placas

As principais teorias aplicadas à análise estrutural de placas são as Teorias de Kirchhoff, Mindlin e von Kármán.

A teoria de Kirchhoff é aplicada no estudo do comportamento das placas esbeltas, quando, na composição dos deslocamentos, apenas as deformações por flexão são consideradas. A teoria de von Kármán, por sua vez, é aplicada às placas esbeltas, considerando as deformações tanto por flexão, quanto os efeitos devido à carga axial normal. Na teoria de Mindlin, aplicada ao estudo das placas espessas, os deslocamentos transversais são compostos pelas deformações por flexão e por cisalhamento e os efeitos de carga axial normal são analisados separadamente. Normalmente, no projeto de estruturas navais, são aplicados os conceitos de Kirchhoff e von Kármán para o estudo do comportamento de flambagem das placas.

4.3 Flambagem de Placas

Quando uma placa é comprimida em seu plano médio, esta torna-se instável e começa a se encurvar a partir de um determinado valor crítico de força aplicada ao plano [22].

Deve-se considerar alguns fatores que interferem no comportamento das placas, como por exemplo:

- Esbeltez do reforço e espaçamento;
- Geometria de placas;
- Tensão de escoamento do material.

Além disso, tensões residuais, deformação inicial, condições de contorno e tipos de carga também afetarão o comportamento das placas.

Soluções dos problemas clássicos de flambagem, pelo chamado método de equilíbrio e as condições que resultam no menor autovalor, ou a carga real de flambagem, não são de todo óbvios em muitas situações [22]. Muitas vezes o método de energia é usado para obtenção das cargas de flambagem.

Segundo THIMOSHENKO e GERE [23], O método de energia pode ser muito útil na análise de flambagem de placas enrijecidas, uma vez que é requerido apenas uma aproximação da carga crítica de flambagem. Aplicando o método de energia, assume-se que a placa está sujeita a esforço atuando no plano médio, e sofre flexão lateral para determinada condição de contorno.

Quando uma placa é submetida à carga axial de compressão, e este carregamento for igual a carga crítica de flambagem, pode-se considerar que esta placa assume grandes deslocamentos com pequenos incrementos de carga. No entanto, atingir a carga crítica de flambagem não significa que a estrutura irá colapsar. Há uma redistribuição de tensões no plano médio da placa e a estrutura apresenta uma resistência pós-flambagem. Quando a estrutura supera essa resistência, ocorre o colapso.

O comportamento das placas no que diz respeito ao fenômeno de flambagem é diferente dos reforçadores. As placas são capazes de suportar tensões acima das tensões críticas de flambagem, uma vez que ocorre uma redistribuição de tensões para as extremidades enrijecidas. As placas, portanto, apresentam uma trajetória de pós-flambagem estável, com um ganho de resistência.

Tal fenômeno de pós-flambagem não é considerado no projeto de elementos unidimensionais, como os reforçadores, uma vez que para pequenos acréscimos de força há um aumento elevado para os deslocamentos transversais.

4.4 Critérios da Regra ABS para análise de flambagem

Este item tem como referência as regras da Entidade Classificadora *American Bureau of Shipping* (ABS).

Segundo o ABS [3], o comportamento de flambagem e força de resistência à tração (resistência última) são aspectos importantes no projeto de uma estrutura *offshore*. Pensando nisso, o ABS desenvolveu um “guia de flambagem”, isto é, o *ABS Guide for Buckling and Ultimate Strength Assessment for Offshore Structures*. Esse guia fornece as equações necessárias para avaliar os limites de tensão de resistência à tração e flambagem de placas, painéis reforçados e painéis ondulados.

O critério de projeto para o cálculo de flambagem adotado pelo ABS é baseado em tensões de trabalho. Nesse critério, as tensões atuantes devem ser menores do que as tensões permitidas e as incertezas com relação ao carregamento aplicado e resistência não são especialmente abordadas, no entanto, são inerentemente incorporadas através de fatores de correção.

As formulações apresentadas pelo ABS [3] são baseadas nas premissas e recomendações dos Guias do ABS, como *ABS Steel Vessel Rules* [24] e *Floating Production Installation* [7], bem como nas recomendações do *American Petroleum Institute* [25 e 26].

Para os FPSOs, os critérios que devem ser obedecidos são aqueles encontrados na Regra ABS SRV Parte C e FPI Parte 5A, uma vez que os critérios do guia de flambagem não incorporam as características relacionadas à locação específica. O guia de flambagem será utilizado apenas como referência para descrição dos conceitos de flambagem.

4.4.1 Geometria das Placas

As placas, placas enrijecidas e placas corrugadas são amplamente utilizados nas estruturas *offshore*. Estas construções são utilizadas como componentes principais e secundários devido a sua fácil construção e eficiência estrutural (relação força e peso).

Segundo o ABS [7], os reforçadores (*stiffeners*) das placas são normalmente instalados igualmente espaçados, paralelos ou perpendiculares aos bordos da placa na direção da carga dominante e são suportados por estruturas mais robustas (vigas ou

girders) e amplamente espaçadas. A Figura 4-1 exemplifica uma placa reforçada típica utilizada no fundo do navio FPSO.

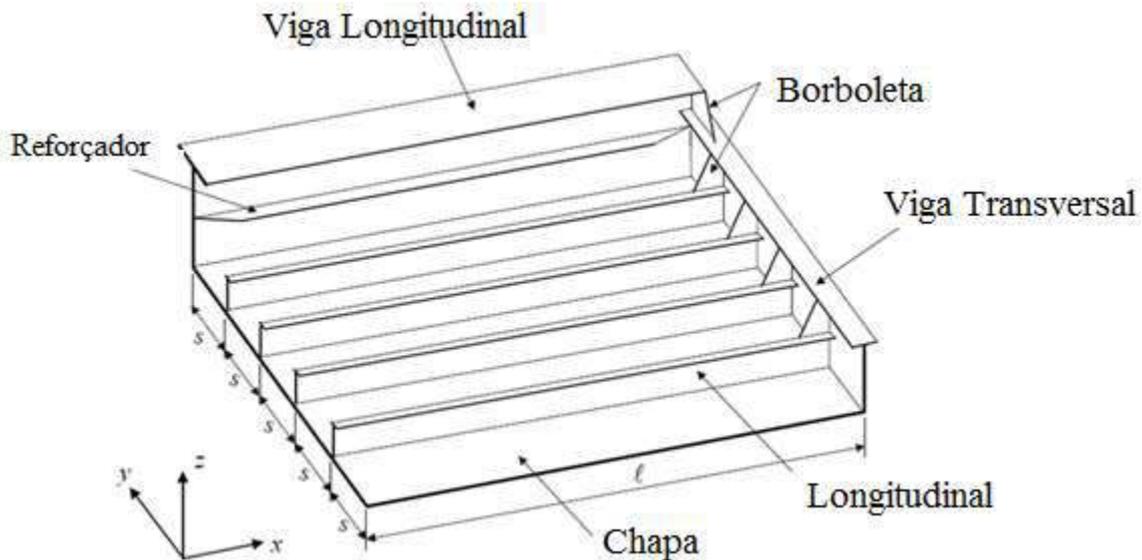


Figura 4-1 – Típica placa reforçada [7].

Esta configuração de painel³ reforçado permite que a carga hidrostática seja transferida das placas para os reforços, que por sua vez transferem a carga para as vigas transversais (Figura 4-4).

Os enrijecedores utilizados neste tipo de construção são normalmente os perfis laminados em L, T ou bulbo, construídos em aço comum ou aço de alta tensão. Além disso, esses perfis devem atender aos critérios de proporcionalidade (relação espessura x largura) e momento de inércia mínimos.

A análise precisa de um painel enrijecido deve refletir a capacidade do painel em resistir à flambagem global, além da possibilidade de as placas fletirem localmente entre os reforçadores [3].

³ Painel é a região da placa delimitada por reforçadores.

4.4.2 Carga Aplicada

Um FPSO é constantemente submetido a esforços devido ao seu peso próprio, ao efeito de superfície livre dentro dos tanques, aos movimentos induzidos pelas ondas, como visto no Capítulo 3.

Os carregamentos mais significativos são os momentos e cortantes em águas tranquilas, que são resultantes do peso da estrutura, do carregamento dos tanques e do empuxo. Os carregamentos induzidos por onda, como momentos fletores verticais e horizontais, cortantes e torsões também devem ser considerados.

As placas do fundo no casco de um navio estão sujeitas a uma pressão hidrostática uniformemente distribuída e a esforços no plano das placas devido à flexão do casco como uma viga [21].

Diz-se que o navio está em condição de tosamento quando o cavado de uma onda está à meia-nau e a crista está nas extremidades (Figura 4-2), fazendo com que o convés do navio sofra compressão e o fundo fique tracionado, provocando assim um momento (*sagging bending moment*).

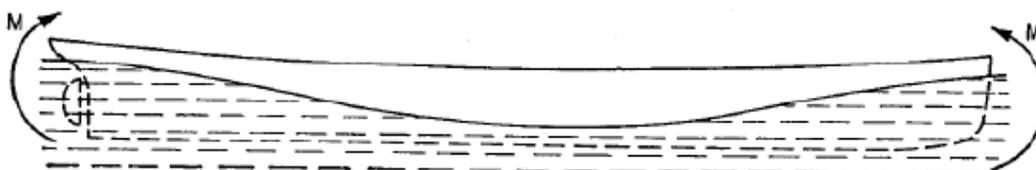


Figura 4-2 - Condição de tosamento [21].

A condição de alquebramento ocorre quando a crista de uma onda está à meia-nau e o cavado nas extremidades (Figura 4-3), tracionando o convés e comprimindo o fundo (*hogging bending moment*).



Figura 4-3 - Condição de alquebramento [21].

Para calcular o deslocamento deve-se considerar não só a ação do momento fletor no casco, mas também a alteração nas tensões distribuídas ao longo das placas do fundo, devido ao efeito desta flexão.

A Figura 4-4 ilustra uma placa do fundo de um navio, enrijecida longitudinalmente. A placa está submetida a uma compressão biaxial, devido à pressão hidrostática aplicada no casco e ao momento fletor atuante na viga-navio. A carga hidrostática é transferida das placas para os reforços, que por sua vez, transferem as cargas para as vigas transversais.

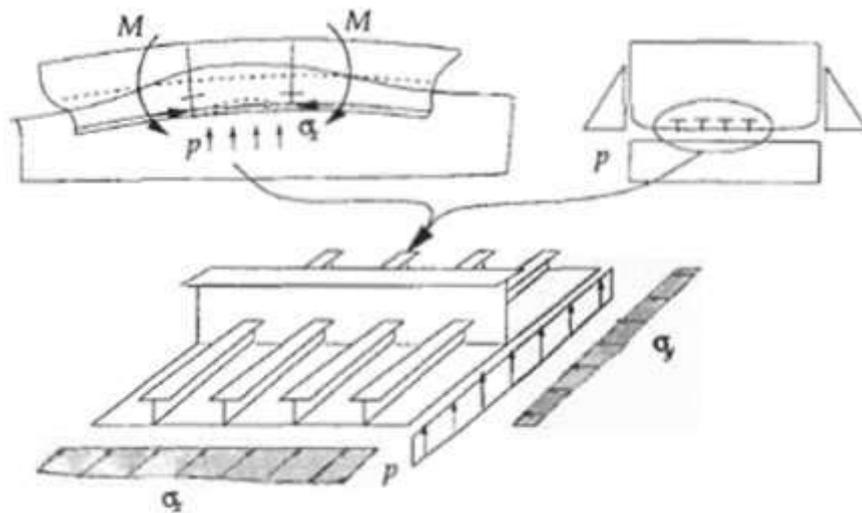


Figura 4-4 – Painel reforçado de uma estrutura offshore [19].

Para o cálculo de flambagem de placas e reforçadores da estrutura do FPSO deve-se considerar as seguintes cargas e efeitos de carregamento (Figura 4-5):

- Compressão Uniforme no plano σ_{ax} , σ_{ay} ;
- Tensões de flexão normais ao plano σ_{bx} , σ_{by} ;
- Tensões Cisalhantes τ ;
- Cargas Laterais, q ;
- Combinação dessas componentes.

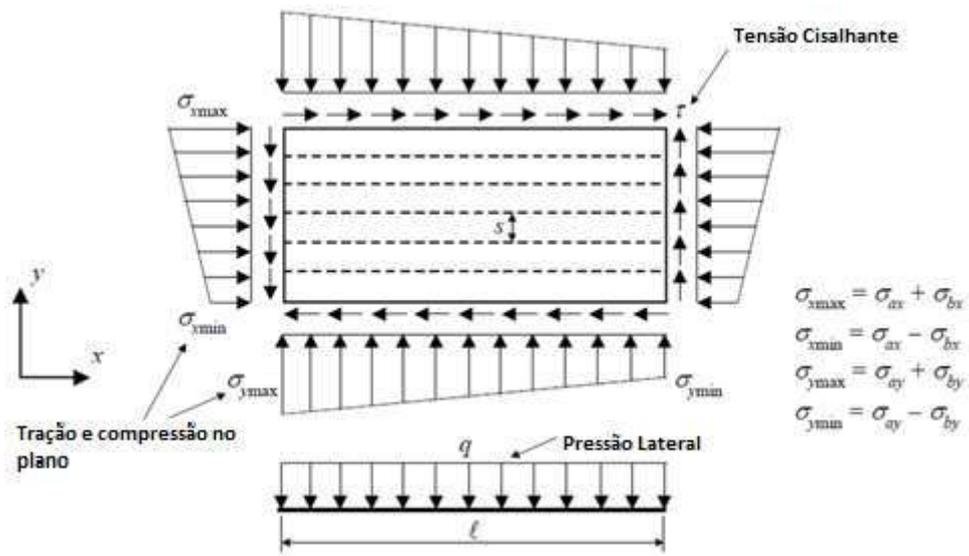


Figura 4-5 - Carregamento primário e efeitos de carga em painéis enrijecidos [27].

4.4.3 Conceitos de controle de Flambagem

No projeto de painéis enrijecidos, deve-se ter em mente que existem três níveis de modo de falha (Figura 4-6):

- 1º - placa – flambagem dos painéis de aço entre os reforçadores longitudinais.
- 2º - painel reforçado – flambagem dos painéis de aço, bem como dos reforçadores longitudinais, localizados entre as vigas que compõem as estruturas transversais (cavernas)
- 3º - ‘grelha’ – flambagem dos painéis, incluindo vigas e reforçadores, podendo se estender a mais de uma viga de suporte.

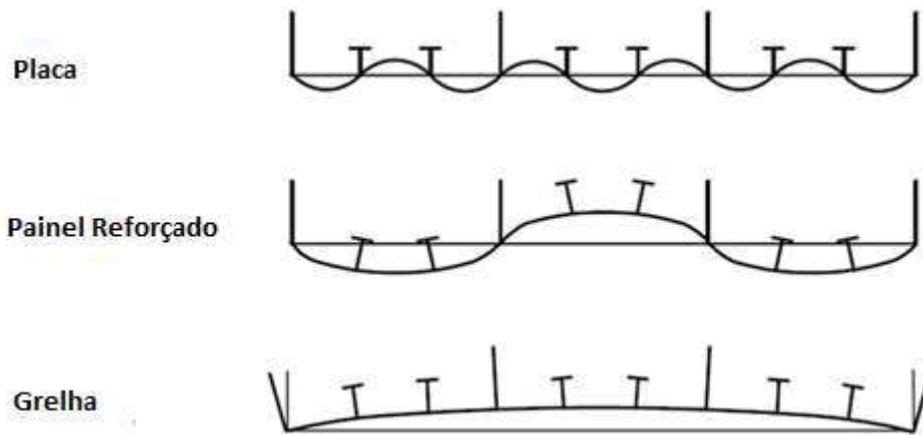


Figura 4-6 – Modos de Falha (ABS, 2014)

São necessárias proporções adequadas entre placas, reforços e vigas para garantir a segurança suficiente dos painéis enrijecidos.

Segundo o ABS [3], os painéis apresentam um aumento continuado de resistência após a tensão de flambagem teórica (ponto de bifurcação) antes de finalmente atingir a capacidade de carga máxima. Em outras palavras, os painéis de placas possuem comportamento de pós-flambagem estável. Portanto, é aceitável que os painéis sejam projetados para alcançar o estado de flexão, mas não o estado final. A Figura 4-7 ilustra a relação carregamento – deflexão de um painel.

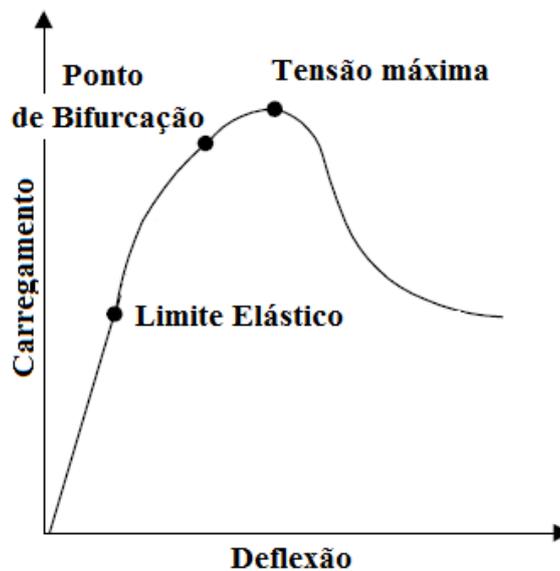


Figura 4-7 – Carregamento – Deflexão de painéis retangulares.

Os critérios de controle de flambagem, segundo a regra para FPSO [7], baseiam-se nos seguintes conceitos:

- a) A resistência à flambagem dos reforços longitudinais é geralmente maior que a dos painéis de placas que eles suportam;
- b) Todos os elementos longitudinais, incluindo as chapas colaborantes, devem ter momentos de inércia não inferiores a:

$$i_o = \frac{st^3_n}{12(1-\nu^2)}\gamma_o \quad (3).$$

Onde,

i_o = momento de inércia do elemento (cm⁴);

s = espaçamento entre os elementos longitudinais (cm);

t = espessura líquida do chapeamento (cm);

ν = coeficiente de Poisson (0,3 para o aço);

γ_o = coeficiente definido em ABS [7], item 7.9.

- c) Os membros de suporte (cavernas, incluindo seus reforçadores e chapas colaborantes), devem ter momento de inércia não inferior a:

$$\frac{I_s}{i_o} \geq 0,2 \left(\frac{B_s}{l}\right)^3 \left(\frac{B_s}{s}\right) \quad (4).$$

Onde,

I_s = momento de inércia do membro de suporte (cm⁴);

B_s = vão livre do membro de suporte (cm);

l = comprimento do reforço (cm);

s = espaçamento entre reforços (cm).

- d) As abas e flanges das vigas, dos elementos longitudinais e dos reforçadores são proporcionais de modo que a instabilidade local seja evitada. Devem atender à seguinte formulação:

$$\frac{b_2}{t_f} = 0,4 \left(\frac{E}{f_y} \right)^{1/2} \quad (5).$$

Onde,

b_2 = maior dimensão do flange (cm);

t_f = espessura líquida do flange (cm);

E = módulo de elasticidade do material (N/cm²);

f_y = limite de escoamento do material (N/cm²).

- e) As almas dos elementos longitudinais e reforçadores são proporcionais de modo que a instabilidade local seja evitada. Devem atender às seguintes formulações:

$$d_w/t_f \leq 1,5(E/f_y)^{1/2}, \text{ para perfis angulados.}$$

$$d_w/t_f \leq 0,85(E/f_y)^{1/2}, \text{ para perfis bulbo.} \quad (6).$$

$$d_w/t_f \leq 0,5(E/f_y)^{1/2}, \text{ para barras chatas.}$$

Onde,

d_w = largura da alma (cm);

t_f = espessura líquida da alma (cm).

- f) As almas das cavernas, pisos e elementos transversais são projetadas com proporções adequadas e devem ser devidamente reforçadas para evitar instabilidade local. As tensões críticas de flambagem para estes componentes podem ser calculados a partir de equações dadas em ABS [7] item 7.3.

Em adição aos critérios acima, a resistência contra os modos de falha de painéis retangulares deve ser verificada através dos critérios a seguir.

4.4.3.1 Critérios para verificação de flambagem dos painéis.

Os critérios a serem atendidos para verificação de flambagem dos painéis de aço obedecem às seguintes formulações:

- Estado-Limite de Flambagem:

$$\left(\frac{f_{Lb}}{f_{cL}}\right)^2 + \left(\frac{f_{Tb}}{f_{cT}}\right)^2 + \left(\frac{f_{LT}}{f_{cLT}}\right)^2 \leq 1.0 \quad (7).$$

Onde,

f_{Lb} = tensão de compressão total calculada na direção longitudinal da placa (N/cm²), induzida por flexão da viga-navio e pelos painéis entre as anteparas.

f_{Tb} = tensão de compressão total calculada na direção transversal/vertical (N/cm²);

f_{LT} = tensão de cisalhamento calculada (N/cm²);

f_{cL} , f_{cT} e f_{cLT} são respectivamente as tensões críticas de flambagem correspondentes à compressão uniaxial nas direções longitudinais, transversais/verticais e cisalhamento (N/cm²). As formulações das tensões críticas de flambagem podem ser consultadas no item 4.3.4.

- Força máxima sob tensão combinada:

$$\left(\frac{f_{Lb}}{f_{uL}}\right)^2 + \left(\frac{f_{LT}}{f_{uLT}}\right)^2 \leq Sm \quad (8).$$

$$\left(\frac{f_{Tb}}{f_{uT}}\right)^2 + \left(\frac{f_{LT}}{f_{uLT}}\right)^2 \leq Sm \quad (9).$$

$$\left(\frac{f_{Lb}}{f_{uL}}\right)^2 + \left(\frac{f_{Tb}}{f_{uT}}\right)^2 - \eta \left(\frac{f_{Lb}}{f_{uL}}\right) \left(\frac{f_{Tb}}{f_{uT}}\right) + \left(\frac{f_{LT}}{f_{uLT}}\right)^2 \leq Sm \quad (10).$$

Onde,

f_{uL} , f_{uT} e f_{uLT} são, respectivamente, as tensões máximas com relação à compressão uniaxial e ao cisalhamento. Os valores de f_{uL} , f_{uLT} e f_{uLT} são definidos em ABS [7], item 5A-3-4, 5.3.3.

η = constante definida em ABS [7].

Sm = Fator de redução de tensão, definido em ABS [7]. (0.908 para AH36 e 1.0 para aço comum).

4.4.3.2 Critérios para verificação de flambagem para longitudinais e reforçadores:

Os reforçadores, por sua vez, devem ser verificados pelas seguintes formulações:

- Flambagem da viga-coluna:

$$\frac{f_a}{(f_{ca}A_e/A)} + m \frac{f_b}{f_y} \leq Sm \quad (11).$$

Onde,

f_a = tensão de compressão nominal calculada (N/cm²);

f_{ca} = tensão crítica de flambagem (N/cm²), definida em ABS [7];

A_e = área efetiva da seção líquida (cm), definida em ABS [7];

A = área total da seção líquida (cm);

m = fator de amplificação, definido em ABS [7];

f_b = tensão de flexão, (N/cm²);

Sm = fator de redução de tensão, definido em ABS [7]. (0,908 para AH36 e 1.0 para aço comum);

f_y = tensão de escoamento do material (N/cm²).

- Flambagem a flexo-torção:

$$\frac{f_a}{(f_{ct} A_e/A)} \leq S_m \quad (12).$$

Onde,

f_{ct} = Tensão crítica de flambagem flexo-torcional (N/cm²).

- Proporcionalidade dos reforçadores, Eqs. (5) e (6).

Ainda de acordo com ABS [7], quando os limites de proporcionalidade são atendidos, o pressuposto sobre o controle de flambagem dos reforços é considerado satisfatório. Caso contrário, a força de flambagem deve ser verificada através de uma análise local.

A análise local de flambagem para os elementos longitudinais consiste no cálculo da tensão de flambagem crítica, considerando a largura da alma como o espaçamento ‘s’ e o vão livre entre reforçadores como a distância ‘l’. Posteriormente, utiliza-se o critério de estado limite de flambagem, Eq. (7).

A flambagem de reforços e vigas é restrita devido à sua resistência diminuir rapidamente, caso ocorra algum dos modos de falha. Portanto, sua força máxima é considerada igual à força de flambagem.

4.4.4 Tensão Crítica de Flambagem

As tensões críticas de flambagem para placas retangulares, painéis reforçados, alma dos elementos longitudinais, vigas, flanges e *face plates* podem ser obtidas através das seguintes equações [7]:

$$f_{ci} = f_{Ei} \quad , \text{ para } f_{Ei} \leq P_r f_{yi} \quad (13).$$

$$f_{ci} = f_{iy} [1 - P_r (1 - P) f_{yi} / f_{Ei}] \quad , \text{ para } f_{Ei} > P_r f_{yi} \quad (14).$$

Onde,

f_{ci} = tensão crítica de flambagem para compressão uniaxial, flexão e cisalhamento, separadamente, (N/cm²);

$$f_{Ei} = K_i[\pi^2 E / 12(1 - \nu^2)](t_n/s)^2, \text{ (N/cm}^2\text{)};$$

K_i = coeficiente de flambagem, Figuras 4-8 e 4-9. Observa-se que para o cálculo do coeficiente de flambagem dos reforçadores, os valores de l e s devem ser, respectivamente, o vão livre e a profundidade da alma do longitudinal.

E = módulo de elasticidade do material;

ν = coeficiente de Poisson (0,3 para o aço);

t_n = espessura da chapa, em cm;

s = espaçamento entre longitudinais;

P_r = limite elástico linear da estrutura (0,6 para aço);

$f_{iy} = f_y$ para compressão uniaxial e flexão, e $f_y/\sqrt{3}$ para cisalhamento;

f_y = tensão de escoamento do material. (N/cm²).

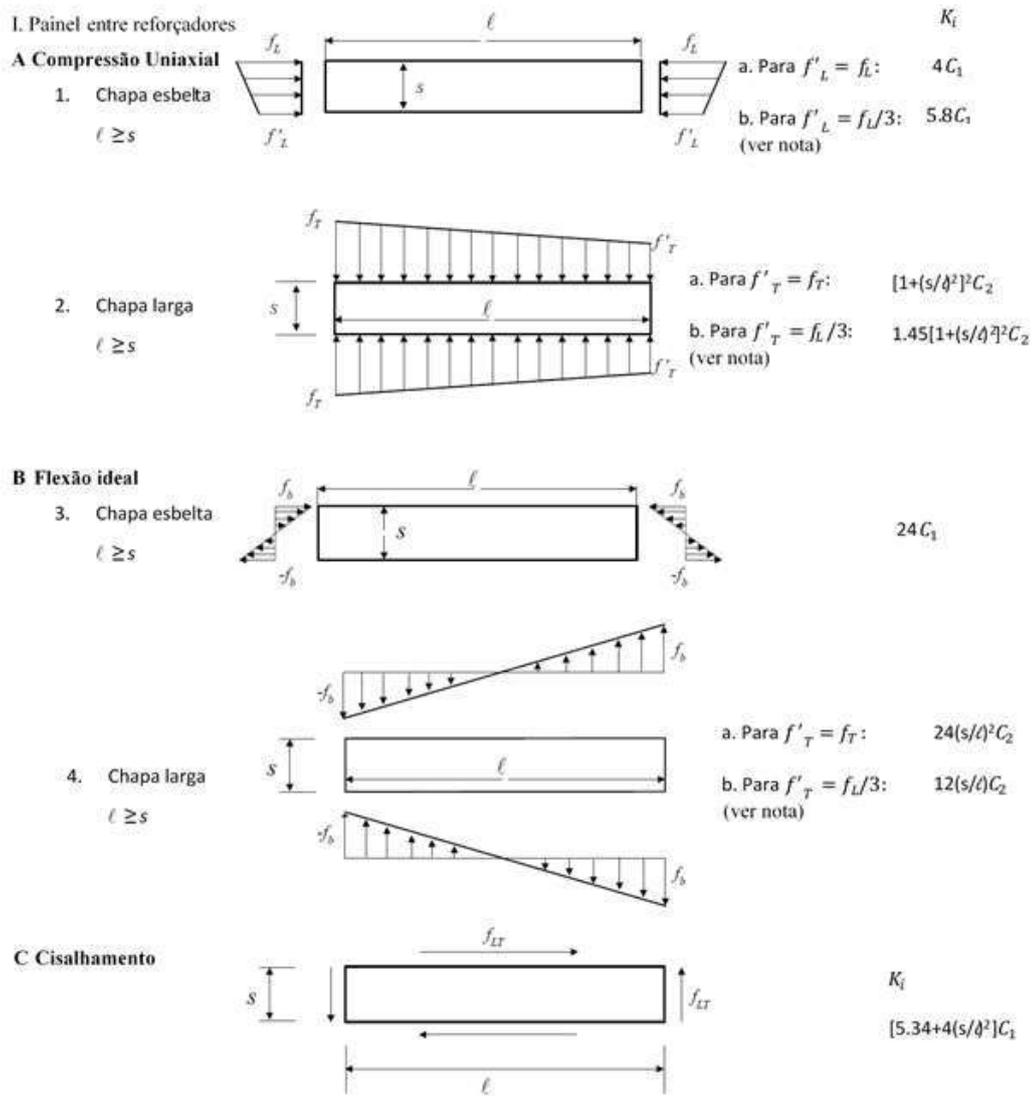


Figura 4-8 – Coeficiente de flambagem K_i [7].

D Valor para C_1 e C_2

1. Para painéis entre reforçadores em T ou angulares
 $C_1 = 1.1$
 $C_2 = 1.3$ dentro do fundo duplo ou costado duplo
 $C_2 = 1.2$ demais
2. Para painéis entre reforçadores barra chata ou bulbo
 $C_1 = 1.0$
 $C_2 = 1.2$ dentro do fundo duplo ou costado duplo
 $C_2 = 1.1$ demais

II. Alma do Longitudinal ou reforçador

A Compressão Axial

Mesmo que I.A.1 substituindo s pela profundidade da alma e ℓ pelo vão livre

- a. Para $f'_L = f_L$:
- b. Para $f'_L = f_L/2$:

(ver nota)

Onde

$C = 1.0$ para reforçadores em T ou angulares

$C = 0.33$ para bulbo

$C = 0.11$ para barra chata

B Flexão Ideal

Mesmo que I.B.1 substituindo s pela profundidade da alma e ℓ pelo vão livre

III. Flange e Face Plate

Compressão Axial



$$s = b_2$$

ℓ = Vão livre

NOTA: em I.A. (II.A), K_i para valores intermediários de f'_L/f_L (f'_T/f_T) devem ser obtidos por interpolação entre a e b.

Figura 4-9 - Coeficiente de flambagem K_i [7].

4.4.5 Fluxograma do processo de Análise de Flambagem

A Figura 4-10 apresenta um fluxograma simplificado do processo de verificação de flambagem de um painel enrijecido, segundo os critérios das normas ABS, descritos nos itens anteriores.

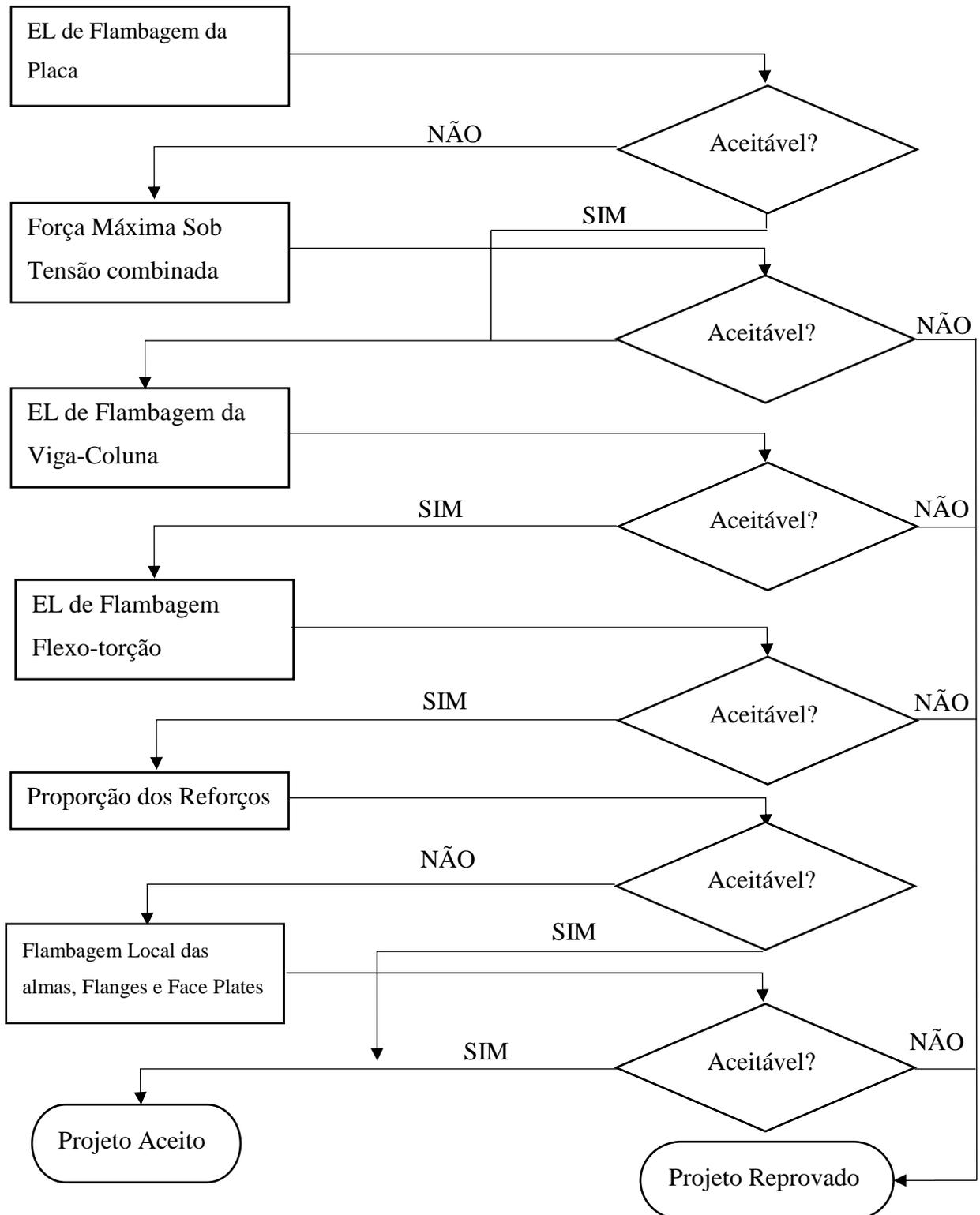


Figura 4-10 – Fluxograma do processo de análise de Flambagem.

5 ANÁLISE DE FLAMBAGEM PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

5.1 Introdução

A Análise de Elementos Finitos (AEF) é a aplicação prática de um método matemático, usado por engenheiros e cientistas, para resolver numericamente problemas muito complexos em diversas áreas, incluindo a análise de estruturas e, nesse caso, tem por objetivo solucionar problemas potenciais ou existentes de desempenho estrutural.

Segundo GIACCHINI [28], “a ideia central do método dos elementos finitos (MEF) é discretizar o domínio, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos; e resolver não o problema original, mas sim um que lhe é associado”.

O termo discretização representa a substituição de um problema contínuo para um conjunto discreto. Ou seja, a função original antes definida num domínio não enumerado de pontos, passa a ser uma reunião finita de intervalos [28].

A Figura 5-1 ilustra a aproximação de uma função (Figura 5-1 - a) suave por outra linear por parte (Figura 5-1 - b). Quanto menor a norma da partição, melhor é a aproximação [28].

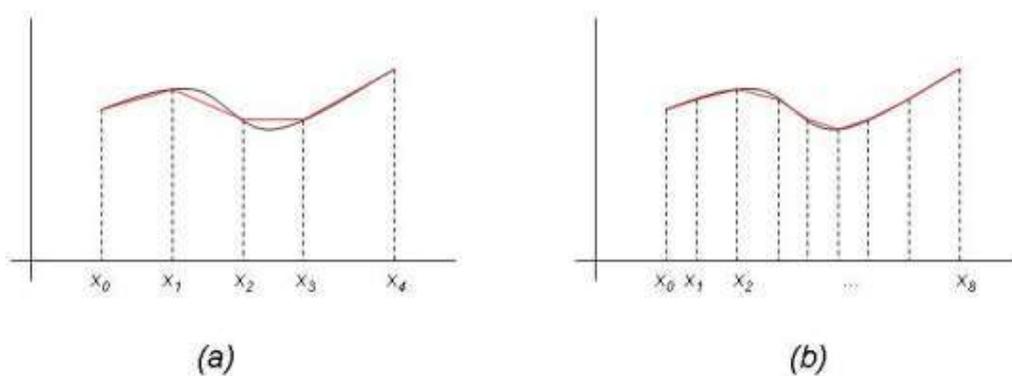


Figura 5-1 – Exemplo de aproximações [28].

Um modelo de elementos finitos é composto por um sistema de nós, que definem os elementos, dando forma a malha de elementos finitos. Esta malha considera as

propriedades físicas e geométricas do modelo permitindo investigar sua resposta às condições aplicadas.

A aplicação do método dos elementos finitos, segundo UGURAL [22], incluem a análise de placas espessas e cascas, não-linearidades geométricas e materiais, plasticidade, vibração, viscoelasticidade e viscoplasticidade, fratura, placas laminadas, análise de flambagem, análise térmica, resposta dinâmica, análise aero e hidroelástica de sistemas estruturais, e assim por diante.

5.2 Procedimento da Análise de Flambagem pelo MEF

Este item tem como referência o Guia de Flambagem do ABS [3 e 28].

Segundo o ABS, duas técnicas disponíveis são utilizadas para prever a carga de flambagem e o modo de falha por flambagem de uma estrutura: análise de flambagem não-linear e análise de flambagem de autovalor (ou linear).

A análise de flambagem linear prevê a resistência teórica de flambagem de uma estrutura linear elástica ideal como, por exemplo, no procedimento clássico para a obtenção da carga crítica de uma coluna de Euler.

A análise formulada como um problema de autovalor obedece:

$$([K] + \lambda_i[S])\{\psi_i\} = 0 \quad (15).$$

Onde,

$[K]$ = matriz de rigidez;

$[S]$ = matriz de tensões iniciais;

λ_i = autovalor (usado para multiplicar as cargas que geraram $[S]$)

ψ_i = autovetor de deslocamento.

Para a resolução do problema de autovalor, os autovetores são usualmente normalizados para que o maior valor seja 1,0. Assim, as tensões só podem ser interpretadas como uma distribuição relativa de tensões [3].

A análise de flambagem linear segue o procedimento [7]:

- Criação do modelo de análise (efeitos não lineares não são considerados).
- Obtenção da solução estática na qual os autovalores calculados representam fatores de carga de flambagem.
- Obtenção dos autovalores. Esses autovalores representam fatores de escalonamento para todas as cargas. Se certas cargas são constantes enquanto outras cargas são variáveis é necessário garantir que a matriz de tensão $[S]$ das cargas constantes não seja fatorada pela solução de autovalor.
- Expansão da solução. Se os modos de flambagem precisarem ser revisados, a solução deve ser expandida independentemente de qual método de extração de autovalor é usado.
- Resolução do problema de autovalor.
- Análise de resultados.

No entanto, este método não considera as imperfeições e não-linearidades de uma estrutura real. A análise de flambagem não linear e incremental é geralmente a abordagem mais recomendada para o projeto de estruturas reais. A técnica para análise não linear se vale de cargas gradualmente crescentes para buscar o valor da carga no qual a estrutura se torna instável.

Na técnica não-linear, características como imperfeições iniciais, comportamento plástico, lacunas e resposta de grande deflexão podem ser incluídas. Além disso, usando o carregamento controlado de deflexão, o desempenho pós-flambagem pode ser rastreado.

De acordo com ABS [3], a formulação Lagrangeana é amplamente utilizada para calcular a matriz de rigidez de elementos finitos não-lineares aplicada à análise de flambagem.

Neste conceito, a seguinte equação (16) deve ser satisfeita:

$$[L] + \{\Delta R\} = [K]^E \{\Delta U\} \quad (16).$$

Onde,

$[L]$ = força de desequilíbrio causada pela diferença entre as forças externas totais, $\{R\}$ e forças internas totais, $\{r\}$;

$\{\Delta R\}$ = incremento da força nodal;

$\{\Delta U\}$ = incremento de deslocamento;

$[K]^E$ = matriz de rigidez elástica tangente.

Ainda segundo ABS [3] a equação pode ser resolvida através do método Newton-Raphson. Para resolver o comportamento de pós-colapso instável, o método de comprimento de arco é normalmente útil. Este método é executado iterativamente até que o vetor de força desbalanceado converta para zero dentro do limite de tolerância especificado.

É importante observar que uma solução não convergente não necessariamente significa que a estrutura atingiu sua carga máxima. O resultado pode ser devido à instabilidade numérica, que pode ser corrigida refinando a técnica de modelagem.

5.3 Determinação do carregamento para análise de flambagem

Para se determinar a resposta estrutural do FPSO, todas as cargas que afetam diretamente a viga-navio e estruturas locais devem ser consideradas. O carregamento estático em águas tranquilas e as cargas de movimentos induzidos pela onda, *sloshing*, *slamming*, carregamento dinâmico, térmico e cargas de gelo (quando aplicável) deverão ser calculados.

Segundo o ABS [7], o carregamento para momento fletor vertical induzidos por onda, quando não for possível um cálculo direto, podem ser calculados pelas equações de aproximação:

$$M_{WS} = -k_1 \beta_{VBM} C_1 L^2 B (C_b + 0.7) \times 10^{-3} \quad (\text{Tosamento}) \quad (17).$$

$$M_{WS} = +k_2 \beta_{VBM} C_1 L^2 B C_b x 10^{-3} \quad (\text{Alquebramento}) \quad (18).$$

Onde,

k_1 e k_2 = constantes definidas em ABS (2014), respectivamente 110 e 190;

C_1 = fator definido em ABS (2014);

β_{VBM} = fator de severidade ambiental para momento fletor vertical;

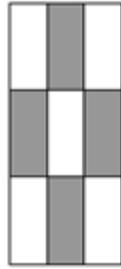
L = comprimento;

B = boca;

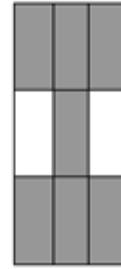
C_B = coeficiente de bloco.

Analogamente, ABS [7] fornece as demais equações para determinação das cargas de momentos fletores horizontais, forças cisalhantes, pressões internas e externas, e acelerações.

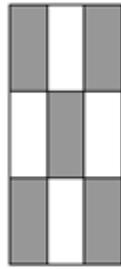
Para se avaliar a resistência da estrutura, oito casos de combinação de carregamento são especificados para a análise pelas normas do ABS. Os arranjos de carregamento são mostrados na Figura 5-2. Para cada caso de carregamento, há fatores de correlação e coeficientes relevantes para os tanques carregados e estão indicados na Figura 5-3.



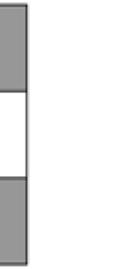
a. Caso de carregamento nº 1 e 3
2/3 do calado de projeto



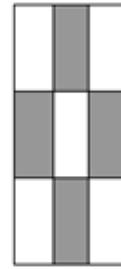
b. Caso de carregamento nº 2 e 4
0.95 do calado de projeto



c. Caso nº 5
2/3 do calado de projeto



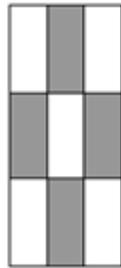
g. Caso nº 9
1/3 do calado de projeto



d. Caso nº 6
2/3 do calado de projeto



h. Caso nº 10
1/3 do calado de projeto



e. caso de carregamento nº 7
2/3 do calado de projeto



f. caso de carregamento nº 8
0.95 do calado de projeto

Figura 5-2 – Arranjo de Carregamento para FPSO de Casco Singelo [7].

	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6	C.7	C.8	C.9	C.10
A. Carregamentos Viga-Navio (ver 5A-3-2/5)										
Momento Fletor vertical	Tos (-)	Alq (+)	Tos (-)	Alq (+)	Tos (-)	Alq (+)	Tos (-)	Alq (+)	-	-
k_c	1.0	1.0	0.7	0.7	0.3	0.3	0.4	0.4	0.0	0.0
Força Cisalhante Vertical	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	-	-
k_c	0.5	0.5	1	1	0.3	0.3	0.4	0.4	0	0
Momento Fletor horizontal					(-)	(+)	(-)	(+)	-	-
k_c	0	0	0	0	0.3	3	1	1	0	0
Força Cisalhante horizontal					(+)	(-)	(+)	(-)		
k_c	0	0	0	0	0.3	0.3	0.5	0.5	0	0
B. Pressão Externa (ver 5A-3-2/5.5)										
k_c	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0	0
k_{ρ}	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0	0
C. Pressão Interna no tanque (Ver 5A-3-2/5.7)										
k_c	0.4	0.4	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0	0
w_v	0.75	-0.75	0.75	-0.75	0.25	-0.25	0.4	-0.4	0	0
w_l	Antepara Vante 0.25	Antepara Vante -0.25	Antepara Vante 0.25	Antepara Vante -0.25	-	-	Antepara Vante 0.2	Antepara Vante -0.2	-	-
	Antepara ré -0.25	Antepara ré 0.2	Antepara ré -0.2	Antepara ré 0.2	-	-	Antepara ré -0.2	Antepara ré -0.2	-	-
w_t	-	-	-	-	Antepara BB -0.75	Antepara BB 0.75	Antepara BB -0.4	Antepara BB 0.4	-	-
	-	-	-	-	Antepara BE 0.75	Antepara BE -0.75	Antepara BE 0.4	Antepara BE -0.4	-	-
C_ϕ	-1.0	1.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	-0.7	0.7	0.0	0.0
C_θ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0	0.7	-0.7	0.0	0.0
D. Referência de Onda e Movimento										
Ângulo	0	0	0	0	90	90	60	60	-	-
Afundamento	Para Baixo	Para cima	Para Baixo	Para cima	Para Baixo	Para cima	Para Baixo	Para cima	-	-
Arfagem	Proa baixo	Proa Cima	Proa baixo	Proa Cima	-	-	Proa baixo	Proa Cima	-	-
Jogo	-	-	-	-	Boreste Baixo	Boreste Cima	Boreste Baixo	Boreste Cima	-	-

Figura 5-3 – Fatores de correlação e coeficientes para as combinações de carregamento [7].

As cargas para oito casos de carregamento descritos representam o carregamento total, ou seja, são compostas pela soma das cargas estáticas em água tranquilas com as cargas dinâmicas induzidas pelas ondas.

O carregamento estático é determinado de acordo com o arranjo de carregamento como indicado na Figura 5-2, em associação com os respectivos calados e peso da carga

ou de lastro. O carregamento dinâmico pode ser obtido pela diferença entre o carregamento total e o carregamento estático.

5.4 Análise de Flambagem

A análise de flambagem, que será apresentada no capítulo 6 deste trabalho, foi feita de acordo com as normas e diretrizes do ABS. Os programas utilizados para confecção e pós-processamento dos dados da análise de elementos finitos foram os *softwares* FEMAP e NASTRAN. Estes dois programas interagem com o ABS FPSO *Eagle*, que, por sua vez, foi utilizado para o carregamento e aplicação de condições de contorno dos modelos de elementos finitos, além da aplicação dos requisitos das normas do ABS.

O processo da análise pode ser dividido em três partes:

- Primeira parte: dimensionamento da embarcação e análise inicial dos escantilhões selecionados.
- Segunda parte: confecção do modelo global e análise de elementos finitos.
- Terceira Parte: pós-processamento e análise de Flambagem Local.

A primeira parte da análise dá-se pelo projeto simplificado de um FPSO com dimensões baseadas em um FPSO real e, posteriormente, os escantilhões selecionados foram avaliados através da fase ISE (*Initial Scantling Evaluation*) do ABS FPSO *Eagle*. Nesta fase, alguns parâmetros iniciais são avaliados como módulo de seção da viga-navio, espessura mínima exigida dos escantilhões, flambagem e fadiga simplificada, resistência viga-navio, etc.

Na segunda parte, um modelo de elementos finitos de três tanques de carga foi confeccionado. Na fase TSA (*Total Strength Assessment*), são aplicadas as cargas e casos de carregamento, condições de contorno, bem como a aplicação dos fatores de severidade ambiental, já faladas no item 3.2 deste trabalho. Após a obtenção dos resultados de resistência do modelo global e sua validação, a análise de flambagem propriamente dita pode ser realizada. O modelo global e os resultados supracitados serão apresentados nos itens 5.4.1 e 5.4.2.

A última parte da análise divide-se em duas etapas: a análise de flambagem do chapeamento do costado e a análise dos reforçadores longitudinais do costado.

5.4.1 Flambagem do chapeamento do costado

A análise de flambagem do chapeamento foi realizada através do processamento do modelo global. Oito modelos foram verificados. As espessuras e espaçamento entre reforçadores do modelo original foram modificados na região de análise e os resultados foram obtidos através da fase TSA.

O chapeamento do modelo global é representado em elementos de placa e os reforçadores são modelados como elemento de viga. Não há representação de borboletas de conexão e demais detalhes estruturais. A Figura 5-4 ilustra os elementos modelados no costado de boreste do tanque central, entre as cavernas 125 e 165.

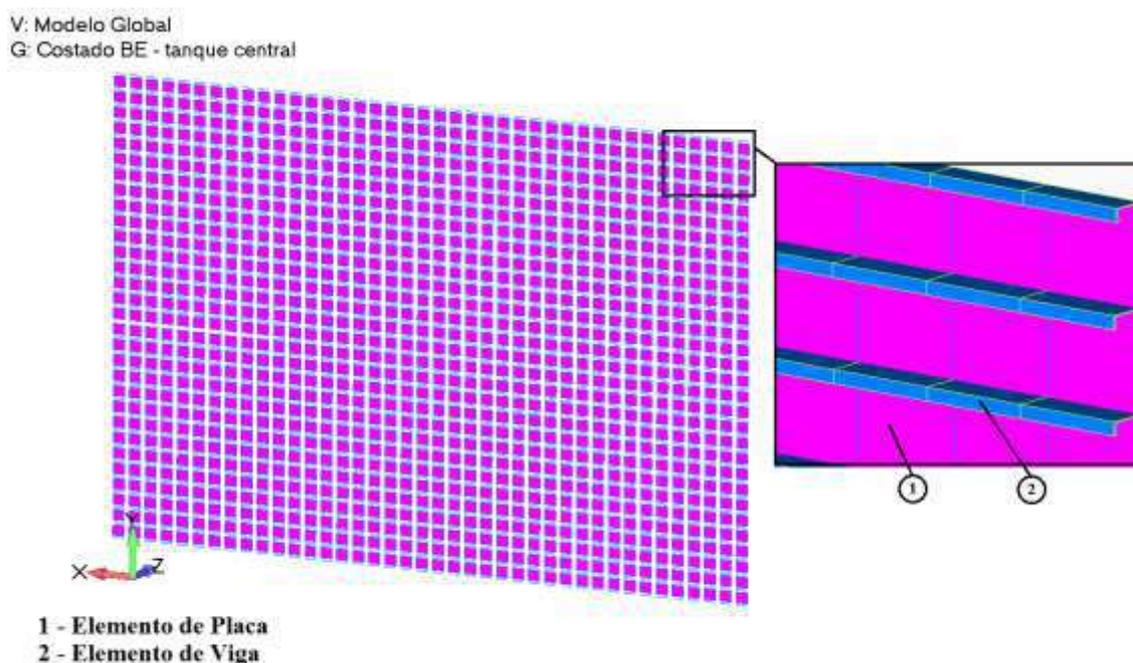


Figura 5-4 – Detalhe dos tipos de elemento modelos no costado do modelo global.

Após o resultado de resistência de viga-navio, os modelos foram analisados em uma segunda etapa do módulo TSA. Nesta etapa, os painéis do costado são selecionados e é possível verificar o resultado dos critérios de flambagem e resistência última da região.

5.4.2 Modelo Global

Segundo o ABS [7], o modelo global de três tanques de carga tem por finalidade determinar a resposta global da estrutura de viga-navio, incluindo tensões primárias e secundárias, bem como obter as condições de contorno adequadas para serem utilizadas na análise local com malha refinada. O modelo de três tanques de cargas pode ser considerado representativo para análise estrutural dos tanques de carga e lastro localizados no intervalo de $0,4L^4$ à meia nau.

O modelo global de elementos finitos é capaz de avaliar tanto a tensão de viga-navio como a resistência ao escoamento e flambagem dos elementos primários longitudinais e transversais [10].

Ainda segundo o ABS [7], a confecção do modelo global deve considerar as margens de corrosão nominal também indicados na regra.

a) Sistema de Coordenadas e Unidades:

O sistema de coordenadas global utilizado no modelo é definido como (Figura 5-5):

- Eixo x: direção longitudinal (positivo para vante);
- Eixo y: direção vertical (positivo para cima);
- Eixo z: direção transversal (positivo para boreste);
- Origem: linha de base com a linha de centro da na antepara transversal estaque do tanque mais a ré.

As unidades utilizadas no Modelo de Elementos Finitos são:

- Comprimento: centímetro (cm);
- Massa: quilograma (kg);
- Tensão: kgf/cm^2 .

⁴ Distância referente à 40% do comprimento entre perpendiculares considerado a partir da meia-nau, para vante e para ré.

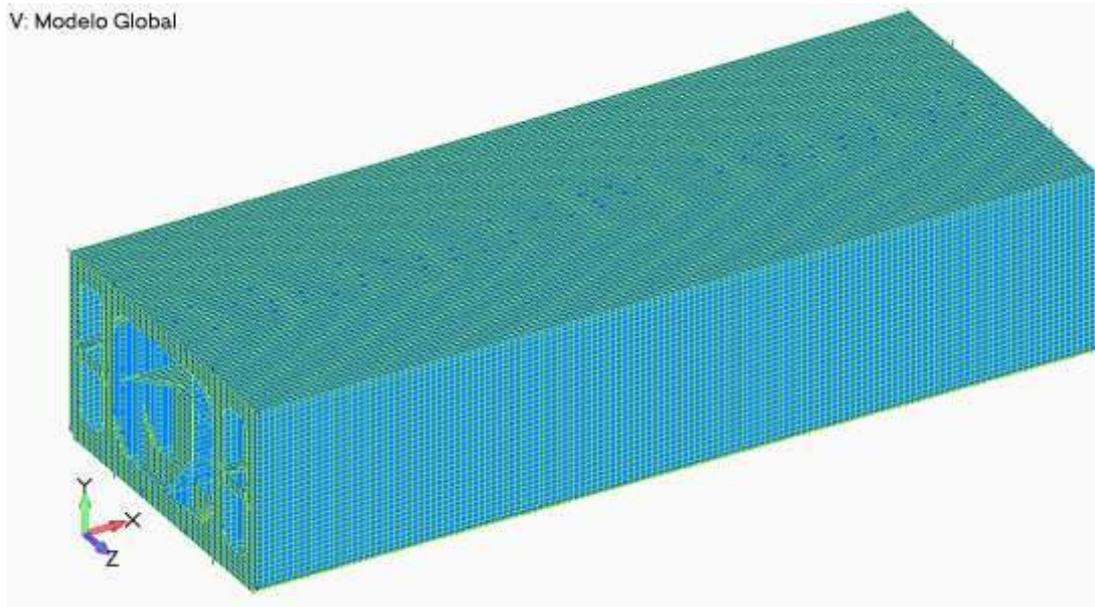


Figura 5-5 - Vista trimétrica do sistema de coordenadas do Modelo Global.

b) Propriedades do Modelo Global

O ABS [7] determina que o modelo global deve ser desenvolvido obedecendo as seguintes características:

- Todos os elementos estruturais primários e secundários que afetem o carregamento global devem ser incluídos;
- A idealização da estrutura deve ser baseada principalmente na sua rigidez e não apenas na geometria;
- É importante que o modelo seja consistente em todo seu comprimento, no entanto, a malha do tanque localizado na região central, onde será realizada a análise, é prioritária. Os resultados da análise nesses tanques são mais precisos, pois são pouco afetados pelas condições de contorno. Contudo, o resultado da análise nos tanques extremos de algumas chapas, como cavernas e escoas, também é bem preciso.

As chapas do modelo de elementos finitos são normalmente representadas por elementos de placa e os reforçadores longitudinais por elementos de viga. A malha do

modelo de elementos finitos deve seguir o sistema painéis reforçados da forma mais real possível. O tamanho da malha deve possuir as seguintes características [7].

- Um elemento entre cada reforçador longitudinal. Longitudinalmente, o comprimento do elemento não deve ser maior do que 2 espaçamentos longitudinais;
- Pelo menos três elementos entre cavernas;
- As borboletas devem ser terminadas no nó mais próximo, desde que o comprimento da borboleta não exceda seu comprimento real;
- Os reforços transversais não devem ser conectados aos elementos longitudinais;
- Não é aconselhável que a razão de aspecto dos elementos seja maior que 3,0. O uso de elementos de placas triangulares deve ser reduzido ao mínimo. Sempre que possível, a razão de aspecto dos elementos de placa em áreas de tensões elevadas deve ser mantida próximo de 1,0 e o uso de elementos triangulares deve ser evitado.
- Furos nos elementos transversais e longitudinais são geralmente ignorados no modelo global. Não representar o elemento de placa ou reduzir a espessura para simular o furo não é aconselhável, pois isto resultaria em tensões irreais.

As Figura 5-6 a Figura 5-10 mostram, respectivamente, um corte longitudinal do modelo global mostrando a divisão dos tanques centrais do modelo; a malha da caverna típica utilizada no modelo; a antepara transversal, anteparas longitudinais de bombordo e boreste; e as escoas e longarina central do modelo.

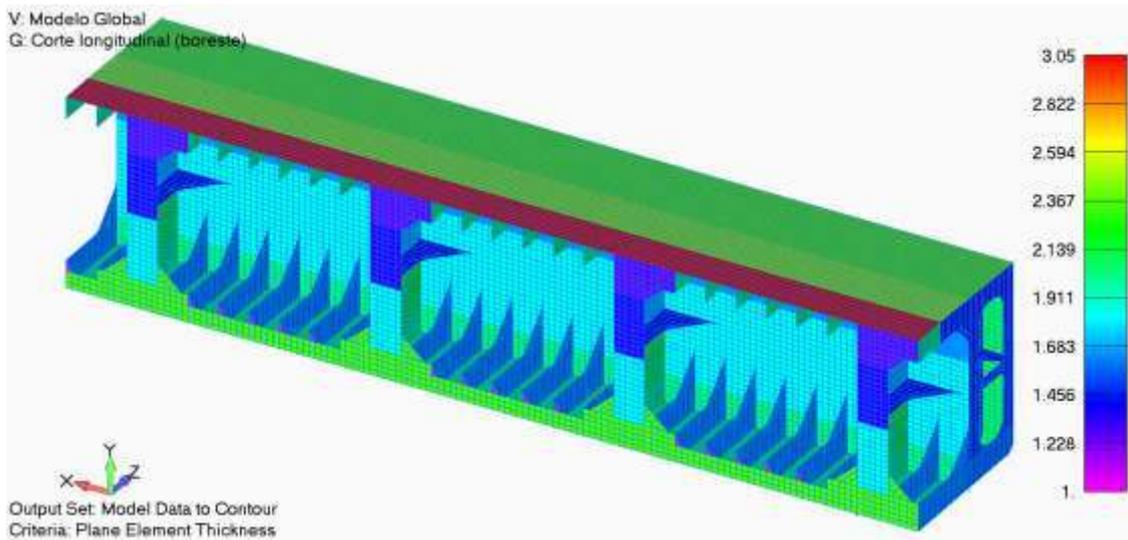


Figura 5-6 - Corte longitudinal do Modelo Global.

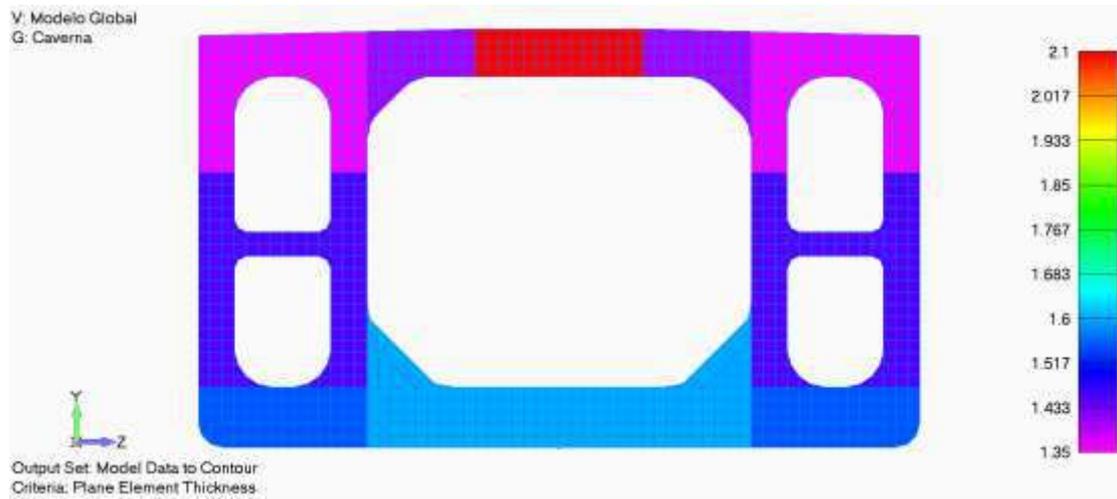


Figura 5-7 - Caverna típica.

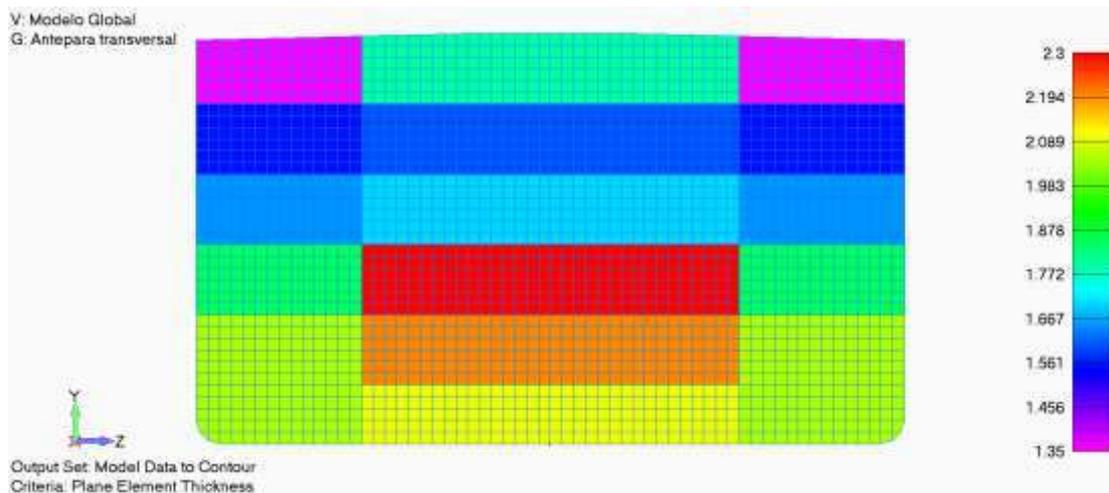


Figura 5-8 - Antepara Transversal.

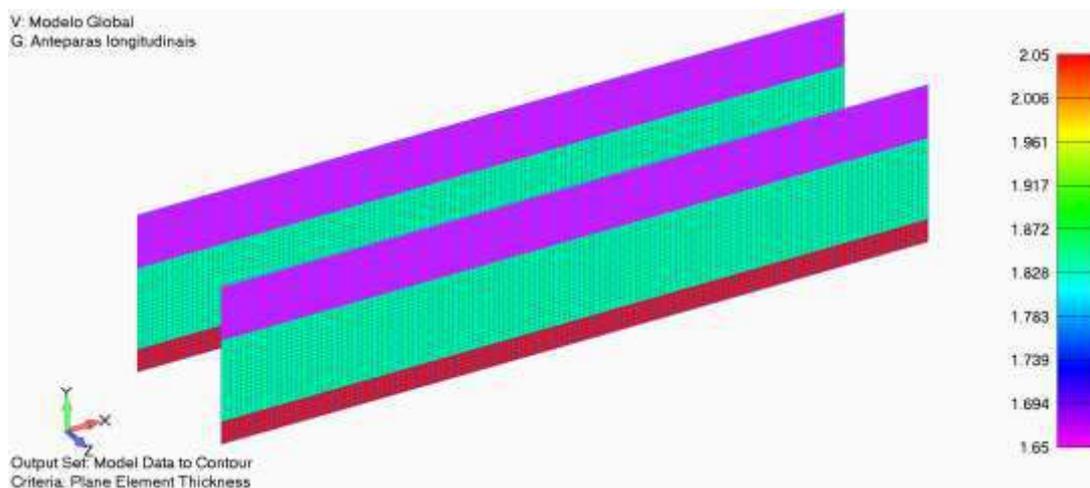


Figura 5-9 - Anteparas Longitudinais de Bombordo e Boreste.

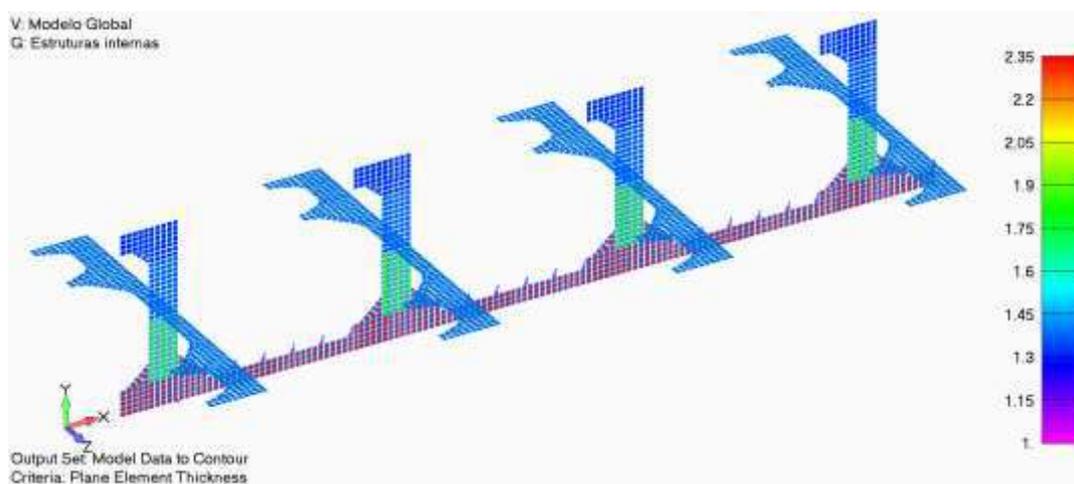


Figura 5-10 - Estruturas Internas (escoas e longarina central).

c) Condições de Contorno

Segundo o ABS [7], o modelo numérico tridimensional da viga-navio de três tanques deve possuir as seguintes características:

- Os momentos fletores e torsões atuantes devem ser aplicados em pontos independentes nas extremidades do modelo. Este ponto independente é determinado pela linha central e pela linha neutra. Todos os elementos longitudinais devem ser ligados ao ponto independente através de uma ligação rígida (LR) (Figura 5-11).
- As forças cisalhantes devem ser representadas por: molas (elementos unidimensionais) com rigidez axial, conectadas por uma de suas extremidades ao fundo; convés; e antepara longitudinal e costado (Figura 5-12). A outra extremidade deve estar engastada.

A Tabela 5-1 resume as condições de contorno citadas.

Tabela 5-1- Condições de Contorno [7].

Localização	Translação			Rotação		
	δx	δy	δz	θx	θy	θz
Ré						
Elementos longitudinais	LR				LR	LR
Ponto independente	Engaste				MH	MV
Convés e fundo			Mola			
Antepara longitudinal e Costado		Mola				
Vante						
Elementos longitudinais	LR				LR	LR
Ponto independente					MH	MV
Convés e fundo			Mola			
Antepara longitudinal e Costado		Mola				

Sendo,

LR – Ligação Rígida;

MH – Momento Horizontal;

MV – Momento Vertical.

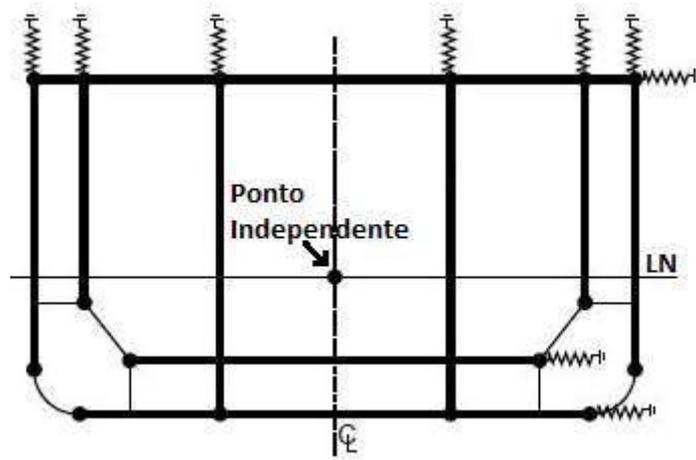


Figura 5-11 - Restrição das molas nas terminações do modelo [7].

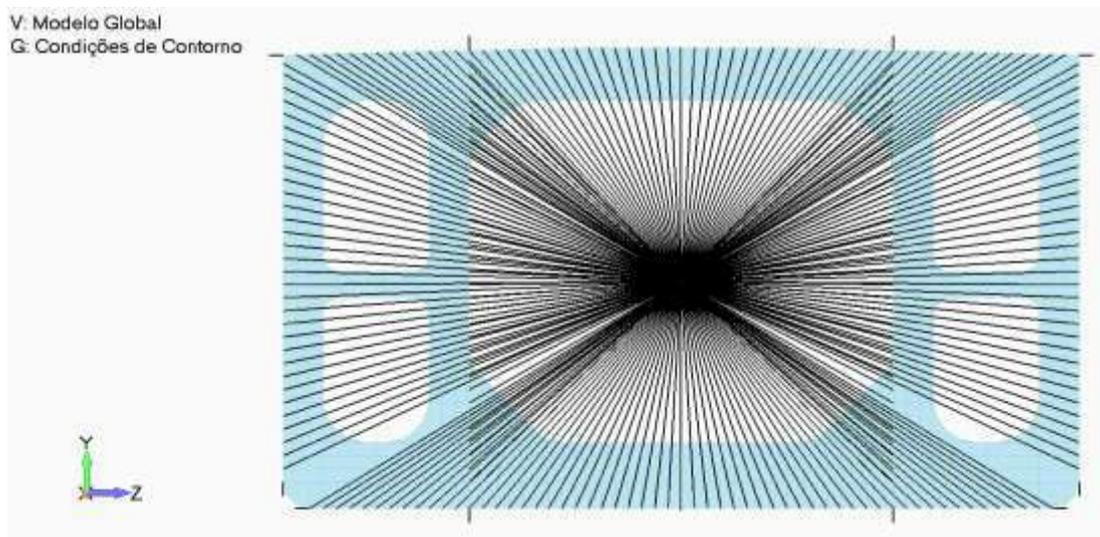


Figura 5-12 - Condições de Contorno do Modelo Global.

d) Resultado e Validação

O ABS recomenda que uma verificação dos resultados primários de tensão e deformação do modelo global seja realizada a fim de verificar se a estrutura do casco e as condições de carga e contorno foram aplicadas devidamente.

A verificação geralmente é realizada para o momento de flexão vertical, que se dá em torno do eixo Y, uma vez que é o momento de flexão mais predominante e para o qual é utilizada uma alta proporção do módulo da seção da viga-navio [7].

A primeira verificação a ser feita é a verificação visual das deformações encontradas no modelo em todos os casos de carga. A Figura 5-13 ilustra o resultado da deformação da viga-navio (ampliada 5 vezes) obtida no modelo global.

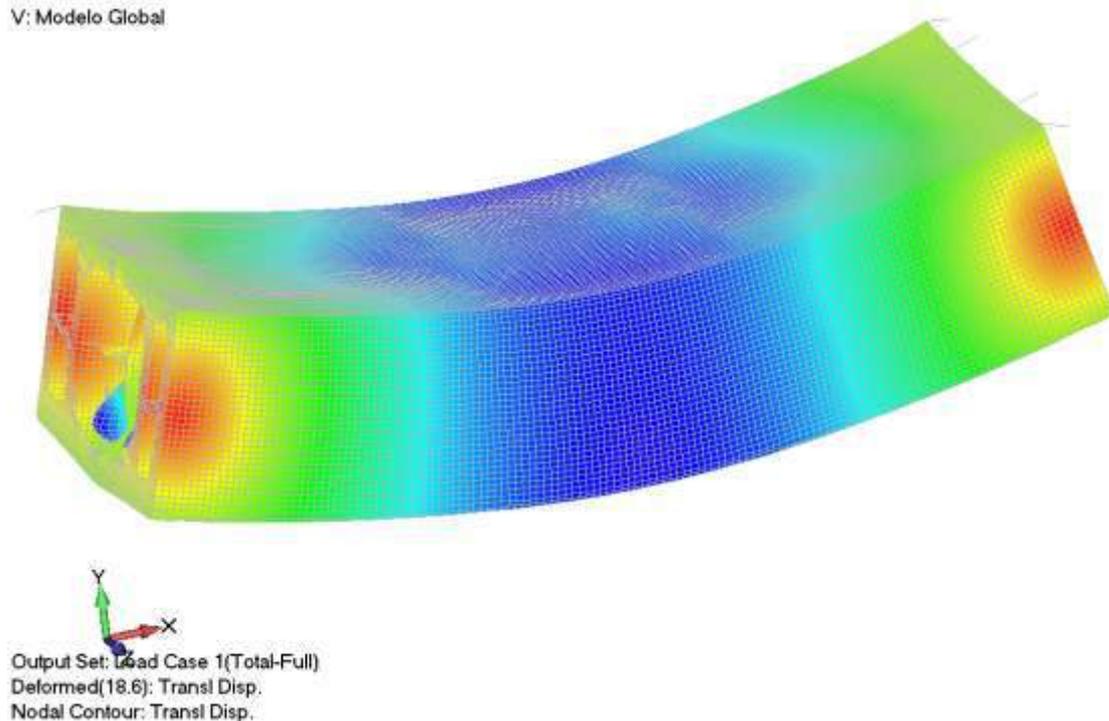


Figura 5-13 - Deformação Viga-Navio.

O segundo passo da verificação é a comparação das tensões encontradas no modelo clássico de viga com as tensões do modelo global para o primeiro caso de carregamento. Esta comparação é geralmente realizada no convés, pois é a região onde os efeitos de carga são menores.

O resultado teórico da tensão viga-navio é determinado pela relação entre o momento fletor total e o módulo de seção do convés:

$$\sigma_{Tosamento} = \frac{\text{Momento Fletor Total}}{\text{Módulo de Seção do Convés}} = \frac{1449556}{897655} = 1,62 \frac{tf}{cm^2}$$

O resultado encontrado da média das tensões nos elementos (próximo de 1,5 tf/cm²) é considerado satisfatório para a análise em questão.

5.4.3 Flambagem dos reforçadores longitudinais

Os reforçadores longitudinais foram avaliados através de um modelo local refinado da região de análise. A malha dos painéis do costado analisados pelo modelo global foi refinada e os reforçadores, antes em elemento de viga, foram representados em elementos de placa, assim como os detalhes estruturais próximos a região de análise (borboletas de conexão entre longitudinais e cavernas, barras verticais das cavernas, cantoneiras, etc.). O modelo local está localizado entre os planos $X = 40$ cm e 75 cm e $Z = 14,4$ cm do modelo global (Figura 5-14) e a malha foi refinada entre as cavernas 135 e 155 (Figura 5-15).

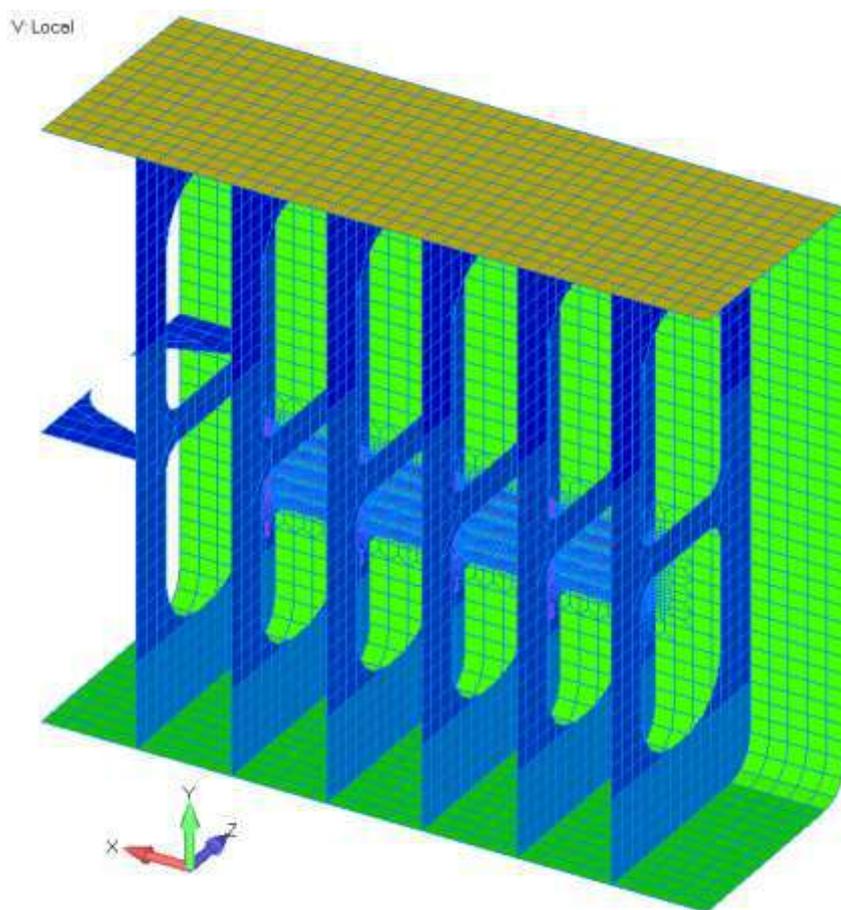


Figura 5-14 - Modelo Local 1.

V Local
G: DETALHE PANEIS

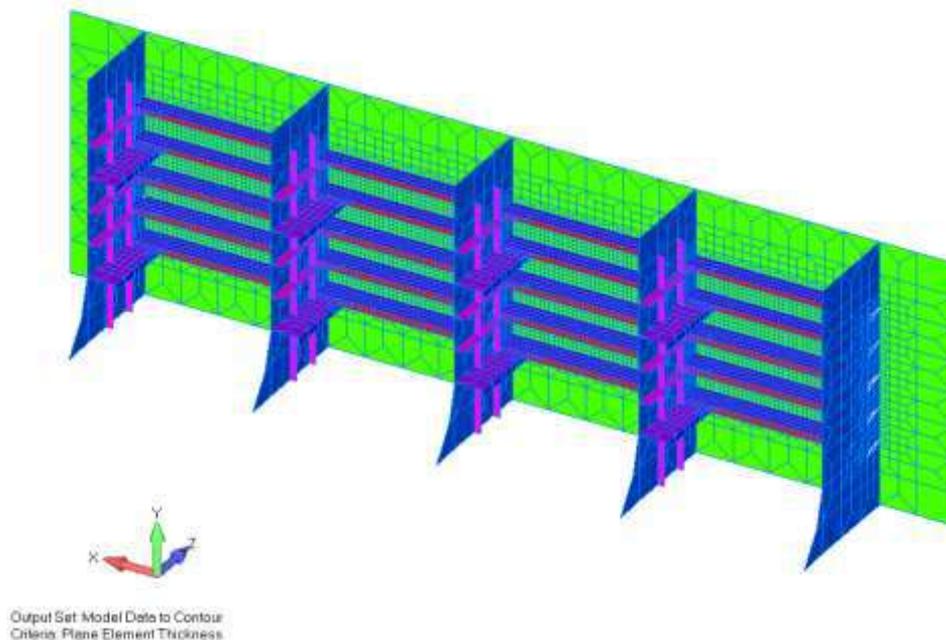


Figura 5-15 – Detalhe da malha refinada do modelo Local 1.

O TSA possui um módulo para análise local, onde é realizada a transferência dos deslocamentos encontrados no modelo global para os nós do contorno do modelo local refinado. As condições de contorno e carregamento são aplicadas. Após a obtenção dos novos deslocamentos do modelo, é possível realizar a análise do modelo local.

A análise de flambagem dos elementos longitudinais é feita através da seleção dos elementos em questão e, posteriormente, os resultados de flambagem são apresentados para todos os casos de carregamento aplicados. Nesta etapa, apenas a flambagem dos elementos selecionados é analisada.

Os resultados da análise do chapeamento e reforços longitudinais serão apresentados no capítulo 6 a seguir.

5.4.4 Modelo Local

O modelo local foi construído utilizando elementos finitos de placa, com todas as características de conexões e com os principais elementos estruturais da região de análise.

Os modelos locais para a análise de flambagem foram utilizados apenas para obtenção de resultados dos longitudinais do costado. Cada modelo é limitado pelos planos $X = 40$ cm, $X = 75$ cm e $Z = 14,4$ cm e o sistema de coordenadas é o mesmo utilizado para o modelo global (Figura 5-16).

Oito modelos locais diferentes foram confeccionados para análise de flambagem presente neste trabalho. Os modelos globais são compostos pelos nós e elementos indicados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 - Nós e elementos dos modelos locais.

Modelo	Nós	Elemento placa	Elemento treliça	Elemento Viga	Elemento Rígido
1	16670	16909	1508	2766	10
2	16670	16909	1508	2766	10
3	16670	16909	1508	2766	10
4	16670	16909	1508	2766	10
5	16670	16909	1508	2766	10
6	16670	16909	1508	2766	10
7	20367	20783	1528	2766	10
8	14815	14944	1508	2766	6

As condições de contorno do modelo local são obtidas a partir dos deslocamentos do modelo global e são aplicadas aos nós contidos nos planos $X = 40$ m, $X = 75$ m e $Z = 14$ m.

V1

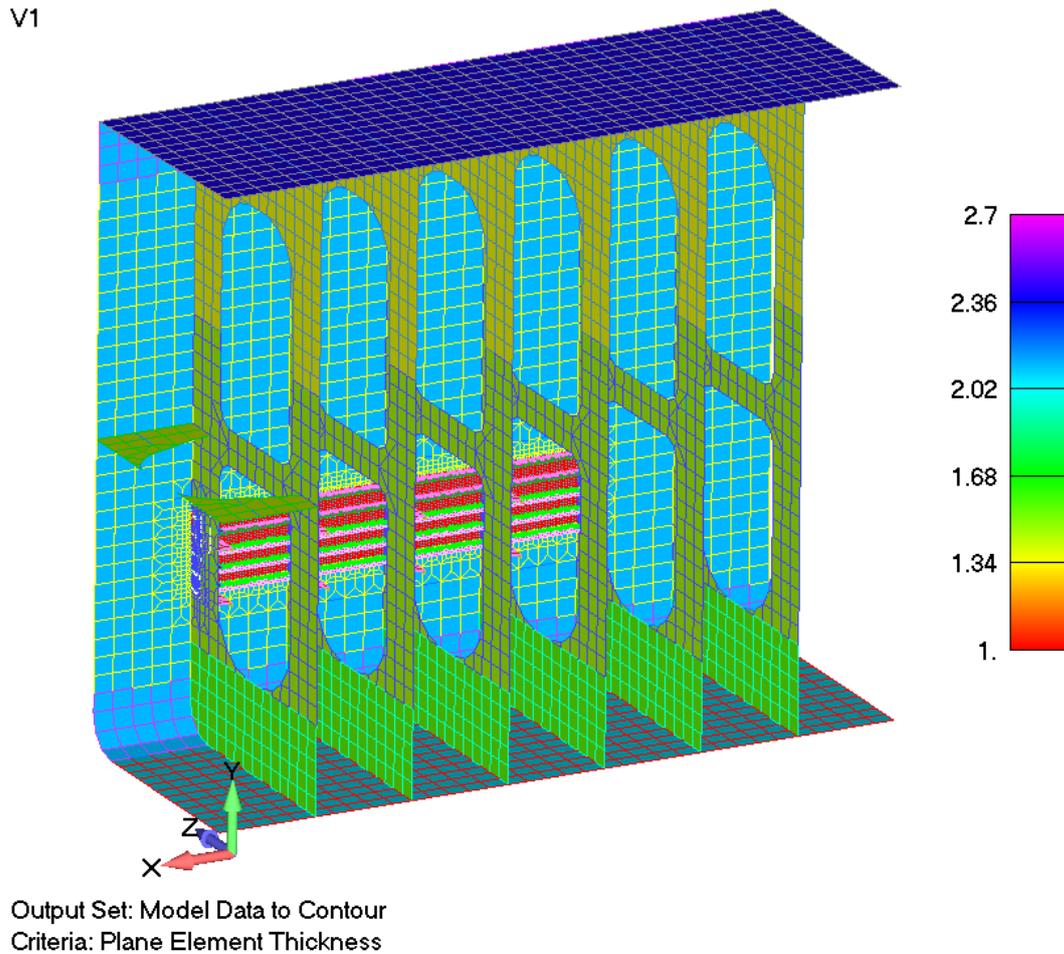


Figura 5-16 - Modelo Local de 1 a 6.

A região de análise está localizada no costado de boreste entre as cavernas 135 e 155 entre os longitudinais L33 e L37 (Figura 5-17). Os elementos que representam os elementos longitudinais, que antes eram de elementos de viga, foram modelados com elementos de placa e as conexões também foram representadas. A Figura 5-18 ilustra um exemplo de conexão entre os reforçadores e as borboletas de conexão com a caverna.

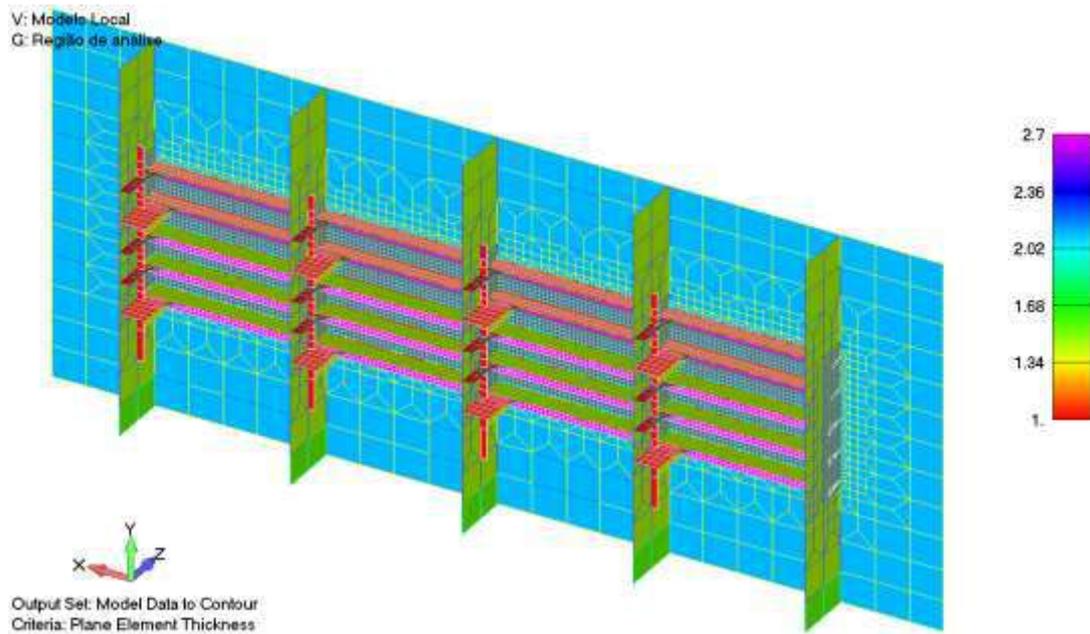


Figura 5-17 - Região analisada compreendida entre as cavernas 135 e 155 e os longitudinais L33 e L37.

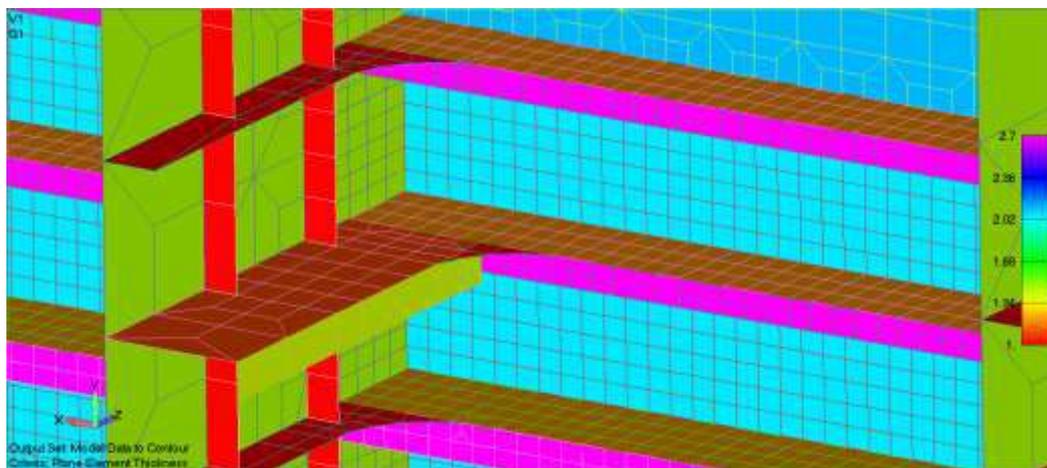


Figura 5-18 - Exemplo das borboletas de conexões com os longitudinais.

6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

6.1 Introdução

O objetivo principal deste capítulo é apresentar os resultados da análise de flambagem nos painéis do costado de um FPSO com dimensões arbitradas, em função de dimensões reais de um FPSO, atendendo aos critérios da regra ABS [7].

O método utilizado na análise foi o método de Elementos Finitos. O modelo global e os modelos locais foram confeccionados através dos programas FEMAP. O ABS Eagle FPSO v2.0 foi responsável pela aplicação do carregamento e das condições de contorno, bem como no processamento dos resultados de tensão de viga-navio, resistência última e flambagem.

6.2 Informações gerais

O FPSO dimensionado é uma estrutura de casco simples, com duas anteparas longitudinais e uma longarina central. As chapas do convés e fundo são de aço tipo HT36, e as demais estruturas foram dimensionadas com aço comum (Mild). A Figura 6-1, apresenta um esboço do arranjo geral do FPSO utilizado, enquanto a Tabela 6-1 apresenta as propriedades dos aços utilizados. Já a Tabela 6-2 mostra as principais características do navio, como dimensões longitudinais e seção mestra



Figura 6-1 – Esboço do Arranjo Geral do FPSO utilizado.

Tabela 6-1 – Propriedades do Aço utilizado.

Tipo de Aço (nomenclatura programa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Resistência à Tração (MPa)
Mild	235	400-502
HT36	355	490-620

Tabela 6-2 – Principais Propriedades do FPSO

Distância entre a perpendicular de ré e o início do modelo	85 metros
Espaçamento entre cavernas	5 metros
Comprimento do tanque	40 metros
Comprimento total (L)	306 metros
Comprimento entre Perpendiculares (Lbp)	288 metros
Coeficiente de Bloco (Cb)	0,98
Calado de Projeto	23,146 metros
Pontal (D)	31 metros
Boca	54 metros
Raio do Bojo	3,6 metros
Vida útil de projeto	25 anos

Os valores arbitrados para os momentos fletores vertical negativo (tosamento) e vertical positivo (alquebramento) em águas tranquilas foram de -600.000 tfm e 600.000 tfm, respectivamente.

Os Fatores de Severidade Ambiental foram determinados através dos RAOs do banco de dados do SEAS e os dados de locação específica utilizados são os correspondentes às condições ambientais do mar do Atlântico Norte, também contidos no banco de dados do programa. Portanto, os valores dos ESFs β utilizados são iguais a 1,0.

Os valores nominais de corrosão de projeto (NDCV) utilizados na análise local considerando uma vida útil de 25 anos são os indicados na Tabela 6-3.

Tabela 6-3 – Valores de margem de corrosão para 25 anos de operação.

Elemento estrutural	Margem de corrosão (milímetros)
Chapeamento	1,85
Alma	2,00
Flange	1,00

A região analisada está localizada no costado de boreste, compreendida entre os reforços longitudinais L33 e L37, e as cavernas Cv135 e Cv155, como mostra a Figura 6-2.

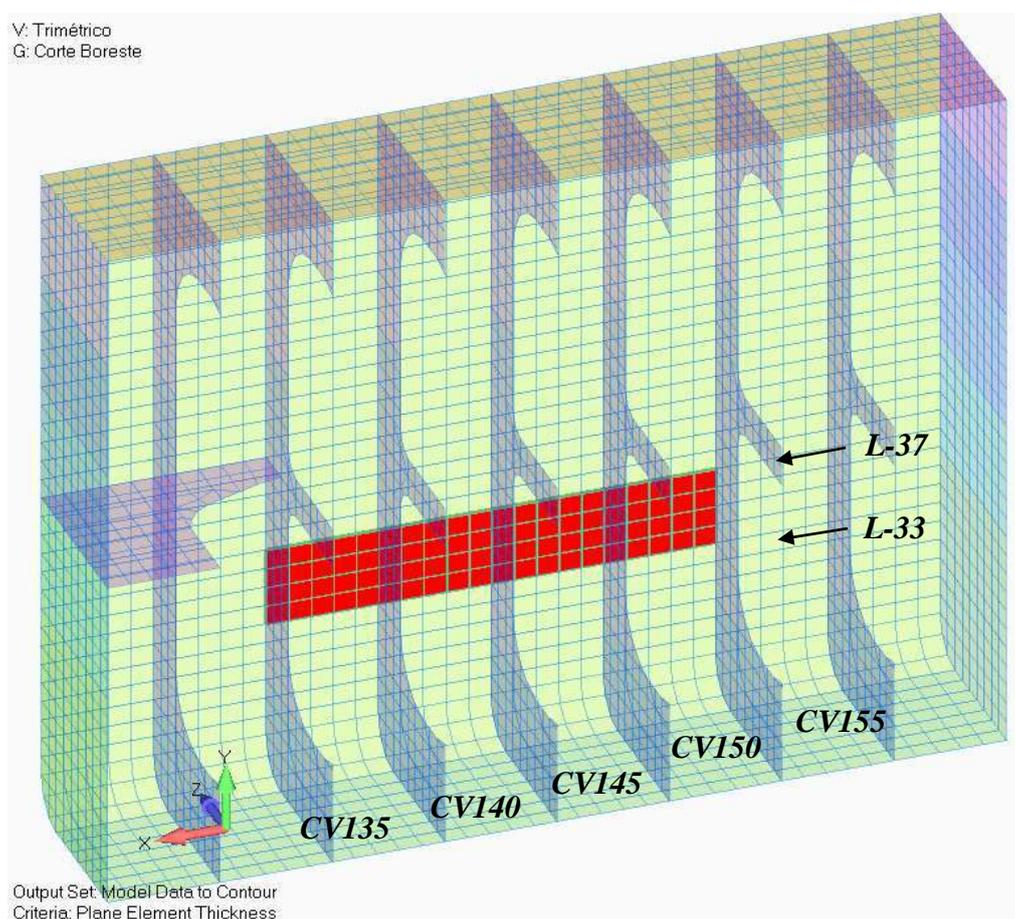


Figura 6-2 – Localização da região analisada.

Inicialmente, foi analisado o comportamento dos painéis indicados na Figura 6-2 com a espessura de projeto. Em seguida, as espessuras foram reduzidas e foi possível verificar o comportamento da estrutura diante de uma redução máxima de 32% da

espessura mínima exigida pela regra ABS [7]. Foram utilizadas 6 espessuras diferentes e três espaçamentos entre reforçadores, totalizando 8 análises. A Tabela 6-4 indica a relação das espessuras e espaçamentos utilizados em cada análise.

Tabela 6-4 – Espessuras brutas utilizadas nas análises.

Análise	Quantidade de painéis analisados	Espessura do Chapeamento (mm)	Espessura da alma do reforçador (mm)	Espessura do flange do reforçador (mm)	Espaçamento entre Reforçadores (mm)
1	16	23,00	14,0	28,0	900
2	16	22,35	14,0	28,0	900
3	16	21,85	12,5	26,0	900
4	16	19,85	12,5	26,0	900
5	16	18,85	12,5	26,0	900
6	16	17,85	12,5	26,0	900
7	8	21,85	14,0	28,0	1800
8	32	17,85	12,5	26,0	450

Os reforçadores utilizados foram perfis L com as características apresentadas na Tabela 6-5.

Tabela 6-5 - Perfis Utilizados.

Identificação	Perfil
L33	L600x14x200x28
L34	L600x14x200x28
L35	L600x14x200x28
L36	L500x14x150x28
L37	L500x14x150x28

Os reforçadores utilizados sofreram redução de espessura na alma e no flange, como mostra a Tabela 6-4. Após a redução, alguns reforçadores deixam de atender ao critério de proporcionalidade (Tabela 6-6).

Tabela 6-6 – Proporcionalidade e Momento de Inércia dos reforçadores do Costado.

	Item	L.33	L.34	L.35	L.36	L.37
As-Built	Proporcionalidade	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
2º exemplo	Proporcionalidade	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
3º exemplo	Proporcionalidade	Não Aceitável				
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
4º exemplo	Proporcionalidade	Não Aceitável				
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
5º exemplo	Proporcionalidade	Não Aceitável				
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
6º exemplo	Proporcionalidade	Não Aceitável				
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
7º exemplo	Proporcionalidade	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
8º exemplo	Proporcionalidade	Não Aceitável				
	Momento de Inércia	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável

Os cálculos referentes à Tabela 6-6 podem ser consultados no anexo I.

6.3 Exemplo 1 – Espessura As Built

A primeira análise refere-se a análise de resistência última e flambagem de 16 painéis do costado (Figura 6-3), bem como seus respectivos reforçadores longitudinais L33 a L37.

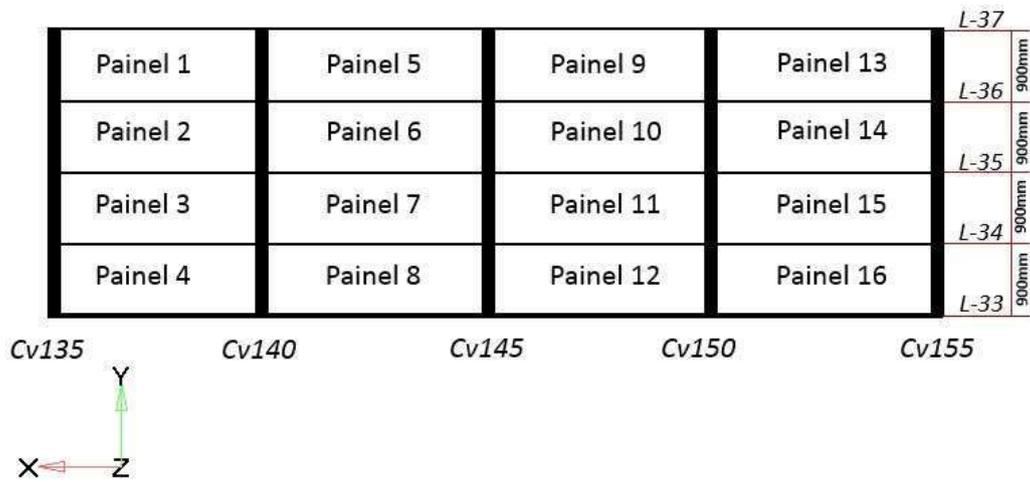


Figura 6-3 – Representação dos painéis do costado analisados.

A espessura líquida mínima de projeto calculada segundo ABS [7] é:

$$t_1 = 0,73 s \left(\frac{k_1 p}{f_1} \right)^{1/2} = 0,73 \times 900 \times \left(\frac{0,342 \times 2,949}{1032} \right)^{1/2} = 20.54 \text{ mm} \quad (19).$$

Os valores de p e f_1 foram calculados pelo ABS FPSO *Eagle* na fase TSA. A espessura utilizada foi a espessura original de projeto (as built) $t_{bruta} = 23,0$ mm.

O chapeamento foi modelado em elemento de placa com espessura líquida de 21,15 mm, que corresponde à diferença entre a espessura *as built* e a margem de corrosão.

Os resultados da análise de flambagem e resistência última do chapeamento foram obtidos através do processamento do modelo global pela fase TSA do ABS FPSO *Eagle*, e serão apresentados segundo o critério descrito no item 4.4

Os reforçadores longitudinais também foram modelados em elementos de placas através de um modelo local (alma e flange) e interligados aos elementos de viga do modelo global por um outro elemento rígido, como mostra a Figura 6-4.

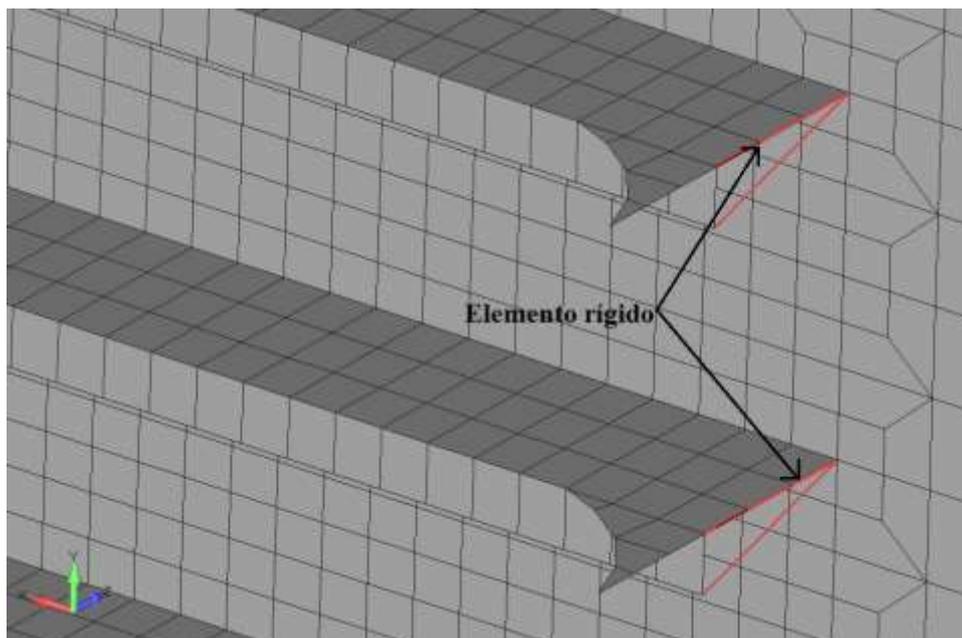


Figura 6-4 – Elemento rígido.

Os resultados da análise de flambagem dos reforçadores foram obtidos através do modelo local, pela fase TSA do ABS FPSO *Eagle*.

A Tabela 6-7 mostra os resultados da análise de flambagem e resistência última do chapeamento e seus respectivos reforçadores, considerando apenas os resultados máximos encontrados entre os 8 casos de carga.

O valor de referência *Unit Check* (UC) apresentado na tabela 6-7, representa a razão entre os resultados encontrados para análise em questão e os valores admissíveis de acordo com os critérios aplicáveis.

Tabela 6-7 – Resultados da primeira análise (flambagem e resistência última)

		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
PAINEL		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	0,52	0,30	L-37	0,37	0,29
	2	0,55	0,32	L-36	0,40	0,31
	3	0,56	0,37	L-35	0,56	-
	4	0,56	0,36	L-34	0,49	0,37
				L-33	0,52	0,35
Cv140-145	5	0,52	0,39	L-37	0,26	0,25
	6	0,56	0,32	L-36	0,31	0,31
	7	0,57	0,37	L-35	0,49	0,40
	8	0,57	0,45	L-34	0,55	0,30
				L-33	0,67	0,46
Cv145-150	9	0,51	0,30	L-37	0,26	0,25
	10	0,55	0,32	L-36	0,30	0,33
	11	0,57	0,38	L-35	0,49	0,26
	12	0,56	0,45	L-34	0,56	0,31
				L-33	0,45	0,68
Cv150-155	13	0,50	0,30	L-37	0,35	0,46
	14	0,54	0,32	L-36	0,45	0,54
	15	0,55	0,36	L-35	0,44	0,42
	16	0,54	0,43	L-34	0,51	0,47
				L-33	0,58	0,61

Como mostrado na Tabela 6-7, todos os painéis estão atendendo o critério ABS (2014), tanto para a verificação de flambagem, quanto para o critério de resistência última, não ultrapassando o valor de *Unit Check* (UC) $\leq 1,00$.

A Figura 6-5 mostra a deformada dos reforçadores no caso de carga 8 (caso onde ocorreu a maior deformação).

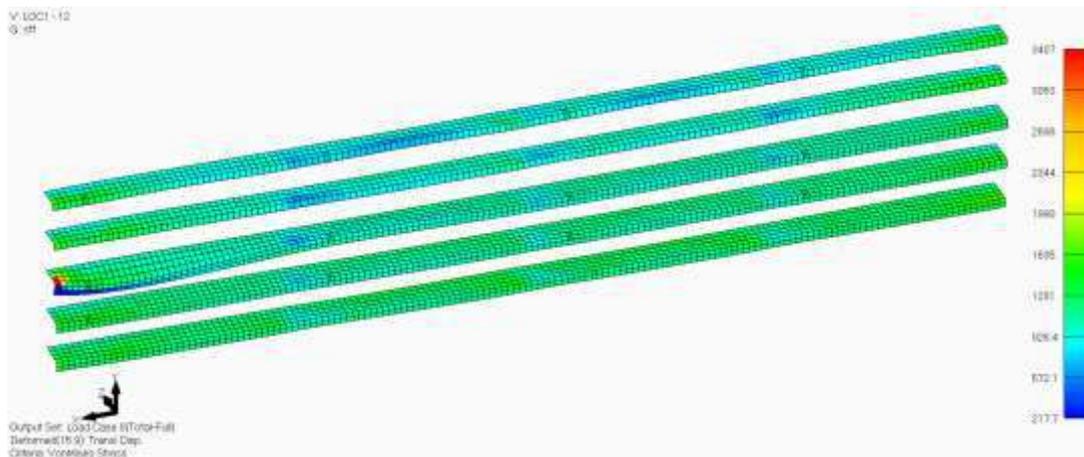


Figura 6-5 – Deformada dos reforçadores para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

6.4 Exemplo 2 – Espessura mínima

O segundo exemplo refere-se à análise dos painéis considerando a espessura mínima de projeto de $t_{bruta} = 22,35$ mm. A espessura dos elementos longitudinais e o espaçamento entre eles não foram alterados.

Seguindo os mesmos critérios adotados no exemplo 1, os resultados da análise do chapeamento foram obtidos através do processamento do modelo global e os elementos longitudinais analisados via modelo local.

A Tabela 6-8 mostra os resultados da segunda análise, considerando os resultados máximos encontrados entre os 8 casos de carga.

Tabela 6-8 – Resultados da segunda análise (espessura mínima)

		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
PAINEL		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	0,58	0,37	L-37	0,37	0,30
	2	0,62	0,38	L-36	0,39	0,32
	3	0,63	0,37	L-35	0,56	-
	4	0,62	0,36	L-34	0,50	0,39
				L-33	0,54	0,38
Cv140-145	5	0,58	0,36	L-37	0,26	0,23
	6	0,62	0,37	L-36	0,32	0,34
	7	0,63	0,37	L-35	0,50	0,41
	8	0,62	0,35	L-34	0,57	0,31
				L-33	0,69	0,47
Cv145-150	9	0,57	0,36	L-37	0,25	0,23
	10	0,61	0,36	L-36	0,30	0,38
	11	0,63	0,36	L-35	0,49	0,26
	12	0,62	0,35	L-34	0,57	0,31
				L-33	0,70	0,44
Cv150-155	13	0,56	0,35	L-37	0,35	0,45
	14	0,60	0,36	L-36	0,44	0,56
	15	0,60	0,36	L-35	0,44	0,43
	16	0,60	0,34	L-34	0,50	0,48
				L-33	0,57	0,63

É possível observar que, mesmo com a redução de espessura ao limite mínimo exigido pela regra, todos os painéis analisados continuam atendendo aos critérios flambagem e de resistência.

A Figura 6-6 ilustra a deformada dos reforçadores no caso de carga 8 (caso onde ocorreu a maior deformação).

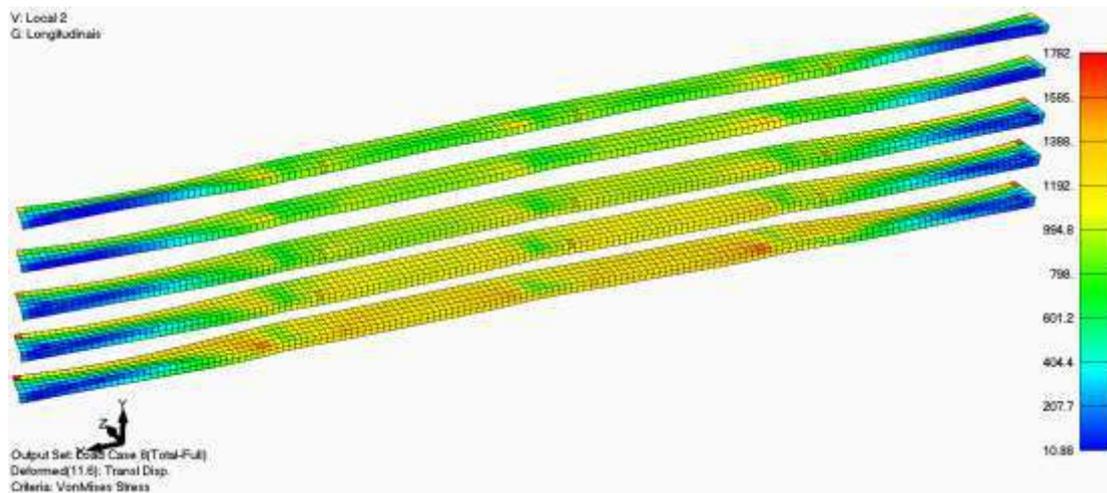


Figura 6-6 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

6.5 Exemplo 3 – Primeira redução

A terceira análise representa a redução de espessura abaixo do limite permitido pela regra.

A espessura do chapeamento utilizada é de $t_{bruta} = 21,85\text{mm}$. As espessuras da alma e do flange também foram reduzidas ($t_{alma} = 12,5\text{ mm}$ e $t_{flange} = 26\text{ mm}$). O espaçamento entre longitudinal não foi modificado e permanece com $s = 900\text{mm}$.

A Tabela 6-9 apresenta os resultados (valores máximos encontrados) da análise de flambagem e resistência última dos painéis do chapeamento e o resultado de flambagem local dos longitudinais L33 a L37.

Tabela 6-9 – Resultado da terceira análise (redução abaixo da espessura mínima)

		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
PAINEL		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	0,63	0,42	L-37	0,39	0,32
	2	0,67	0,42	L-36	0,41	0,35
	3	0,69	0,41	L-35	0,48	0,38
	4	0,67	0,40	L-34	0,53	0,42
				L-33	0,57	0,40
Cv140-145	5	0,64	0,40	L-37	0,27	0,26
	6	0,68	0,41	L-36	0,33	0,39
	7	0,69	0,41	L-35	0,52	0,29
	8	0,67	0,40	L-34	0,60	0,33
				L-33	0,73	0,51
Cv145-150	9	0,63	0,40	L-37	0,26	0,24
	10	0,07	0,41	L-36	0,31	0,41
	11	0,68	0,41	L-35	0,52	0,27
	12	0,67	0,39	L-34	0,60	0,31
				L-33	0,73	0,46
Cv150-155	13	0,61	0,39	L-37	0,38	0,49
	14	0,65	0,40	L-36	0,49	0,63
	15	0,66	0,40	L-35	0,47	0,47
	16	0,65	0,38	L-34	0,54	0,53
				L-33	0,61	0,70

Todos os painéis analisados apresentam valores de UC, tanto para flambagem quanto para resistência, abaixo de 1,0.

Os longitudinais analisados, mesmo após a redução e o não cumprimento do critério de proporcionalidade, permanecem dentro do limite esperado para o critério de limite de flambagem.

As Figura 6-7 e Figura 6-8 ilustram os resultados de flambagem e a deformação nos elementos longitudinais.

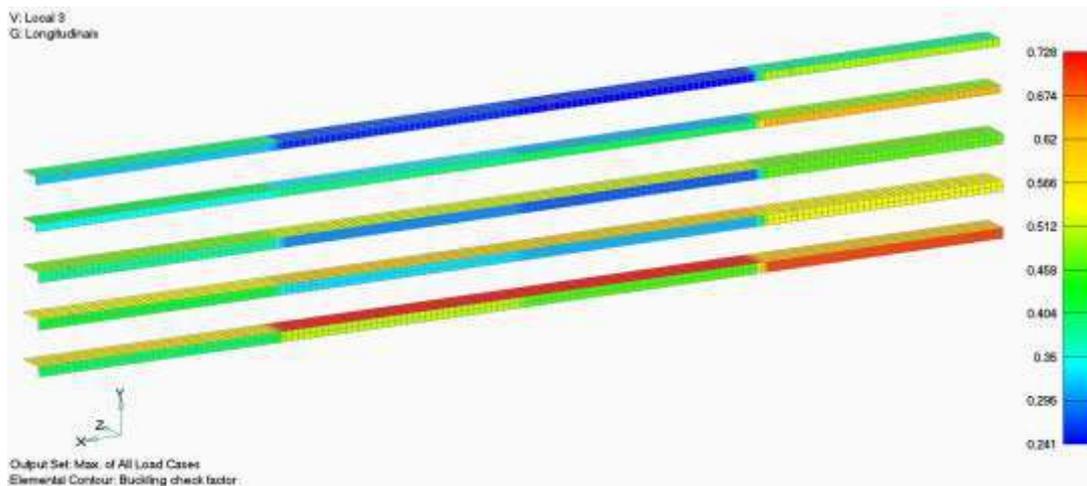


Figura 6-7 - Resultado da análise de flambagem dos elementos longitudinais do modelo local 3 (UC de flambagem).

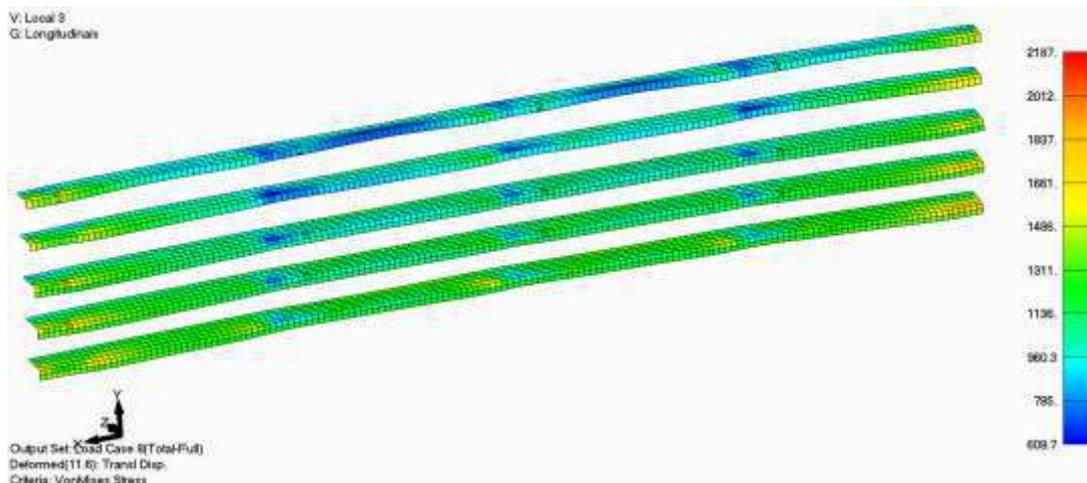


Figura 6-8 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

6.6 Exemplo 4 – Segunda redução

A quarta análise representa a segunda redução de espessura abaixo do limite permitido pela regra. A espessura bruta utilizada foi 19,85 mm. A espessura dos longitudinais permanece a mesma do exemplo 3. O espaçamento entre reforçadores não sofreu alteração ($s = 900$ mm).

Após a redução, alguns painéis não passaram no critério de flambagem, no entanto permanecem no limite de resistência. Os painéis 2, 3, 6, 7, 10 e 11 serão tratados como

aceitáveis, visto que o valor máximo foi excedido em apenas 3% e os valores de pós-flambagem não foram alcançados.

Todos os elementos longitudinais entre os painéis estão dentro dos limites permitidos e atendem todos os requisitos.

A Tabela 6-10 mostra os piores cenários da análise seguida das Figura 6-9 e Figura 6-10, que ilustram os resultados de flambagem e deformação dos elementos longitudinais.

Tabela 6-10 – Resultado da quarta análise (segunda redução abaixo da espessura mínima)

PAINEL		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	0,95	0,71	L-37	0,39	0,32
	2	1,01	0,72	L-36	0,41	0,35
	3	1,01	0,68	L-35	0,48	0,38
	4	0,96	0,63	L-34	0,54	0,42
				L-33	0,57	0,40
Cv140-145	5	0,99	0,73	L-37	0,28	0,27
	6	1,03	0,74	L-36	0,34	0,40
	7	1,01	0,69	L-35	0,52	0,30
	8	0,96	0,62	L-34	0,60	0,36
				L-33	0,72	0,51
Cv145-150	9	0,99	0,74	L-37	0,26	0,25
	10	1,03	0,74	L-36	0,32	0,42
	11	1,02	0,69	L-35	0,52	0,28
	12	0,96	0,62	L-34	0,60	0,32
				L-33	0,72	0,47
Cv150-155	13	0,93	0,69	L-37	0,38	0,50
	14	0,96	0,69	L-36	0,49	0,64
	15	0,97	0,65	L-35	0,48	0,47
	16	0,92	0,60	L-34	0,54	0,53
				L-33	0,61	0,70

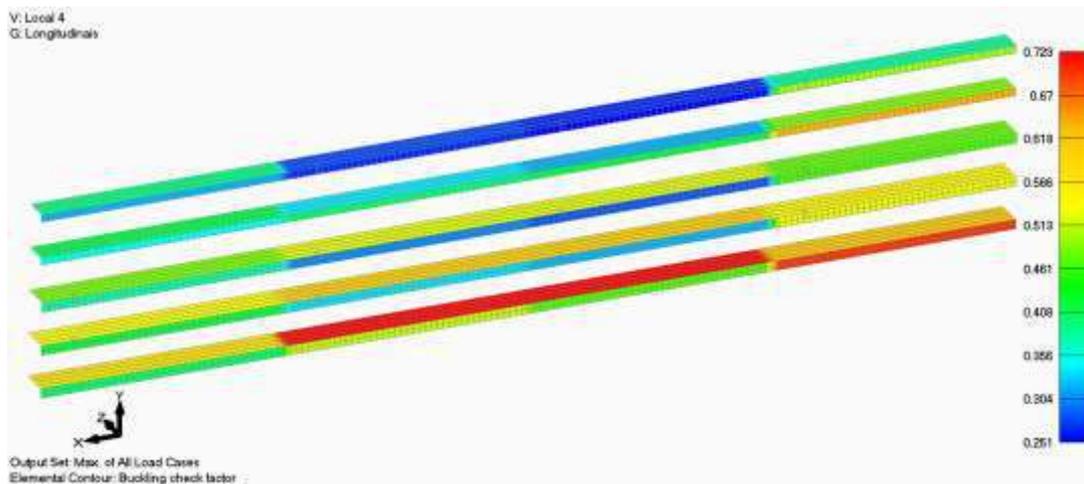


Figura 6-9 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 4 (UC de flambagem).

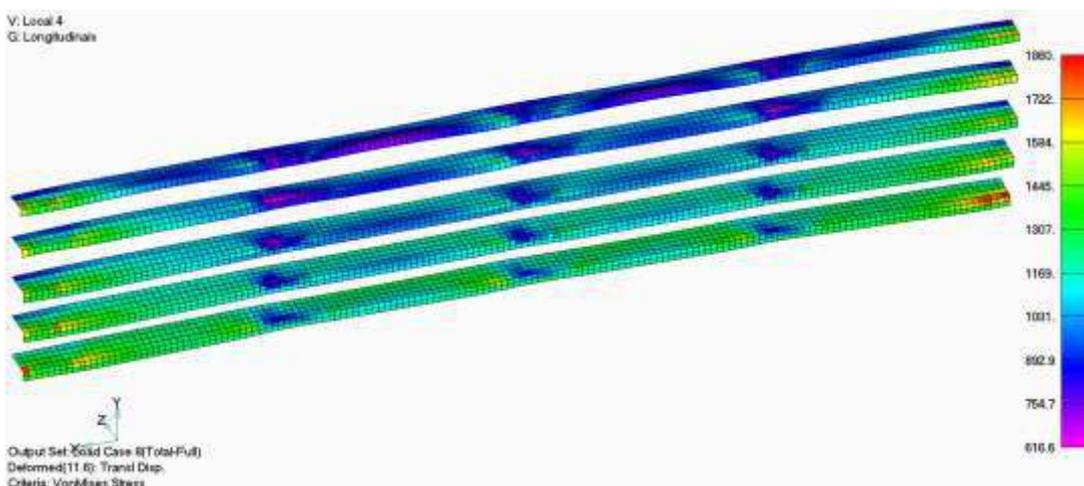


Figura 6-10 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

6.7 Exemplo 5 – Pós-Flambagem

A falha dos painéis foi atingida após a quarta redução de espessura, equivalente a redução de 18% da espessura *as-built*. A análise foi realizada com o mesmo espaçamento entre reforçadores das análises subsequentes e os mesmos longitudinais. A espessura bruta utilizada na análise foi de 18,85 mm.

Apesar de alguns painéis apresentarem valores de resistência acima de 1,0, estes serão considerados satisfatórios. Nenhum reforçador longitudinal foi reprovado.

A Tabela 6-11 mostra os piores cenários da análise. Já as Figura 6-11 e Figura 6-12 ilustram os resultados de flambagem e resistência dos painéis do costado, e as Figura 6-13 e Figura 6-14 mostram a flambagem e a deformação dos elementos longitudinais.

Tabela 6-11 – Resultados da 5ª análise (flambagem dos painéis)

PAINEL		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	1,21	0,95	L-37	0,39	0,32
	2	1,27	0,97	L-36	0,41	0,35
	3	1,26	0,91	L-35	0,49	0,38
	4	1,19	0,83	L-34	0,54	0,42
				L-33	0,57	0,40
Cv140-145	5	1,28	1,00	L-37	0,28	0,27
	6	1,33	1,01	L-36	0,34	0,41
	7	1,30	0,94	L-35	0,53	0,31
	8	1,20	0,83	L-34	0,60	0,34
				L-33	0,72	0,51
Cv145-150	9	1,28	1,01	L-37	0,27	0,26
	10	1,32	1,02	L-36	0,32	0,42
	11	1,29	0,94	L-35	0,53	0,29
	12	1,19	0,82	L-34	0,61	0,32
				L-33	0,72	0,47
Cv150-155	13	1,18	0,92	L-37	0,38	0,50
	14	1,23	0,92	L-36	0,49	0,64
	15	1,21	0,86	L-35	0,48	0,47
	16	1,14	0,79	L-34	0,55	0,53
				L-33	0,62	0,70

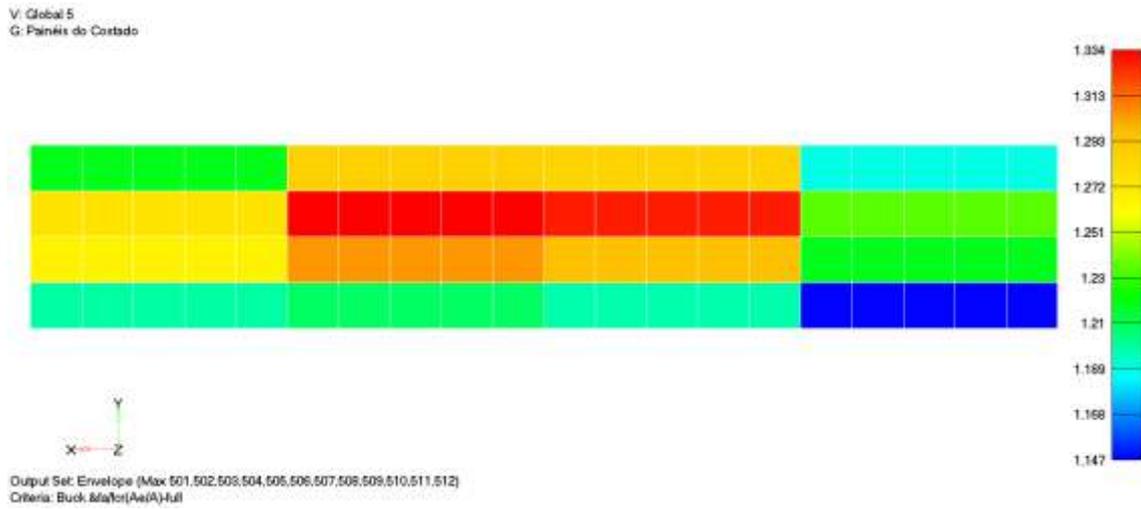


Figura 6-11 – Resultado de flambagem dos painéis do costado do exemplo 5 (UC de flambagem).

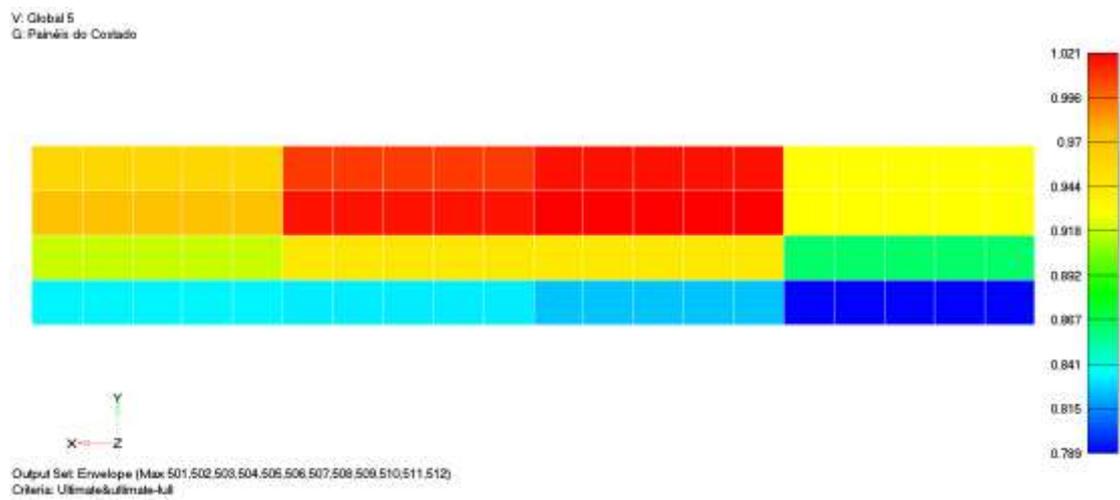


Figura 6-12 - Resultado de resistência última dos painéis do costado do exemplo 5 (UC de resistência última).

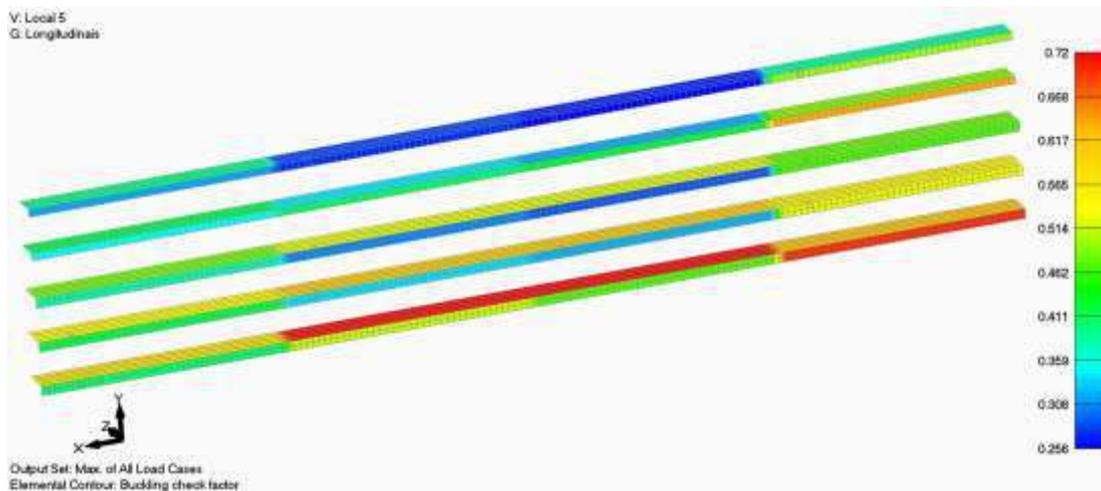


Figura 6-13 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 5 (UC de flambagem).

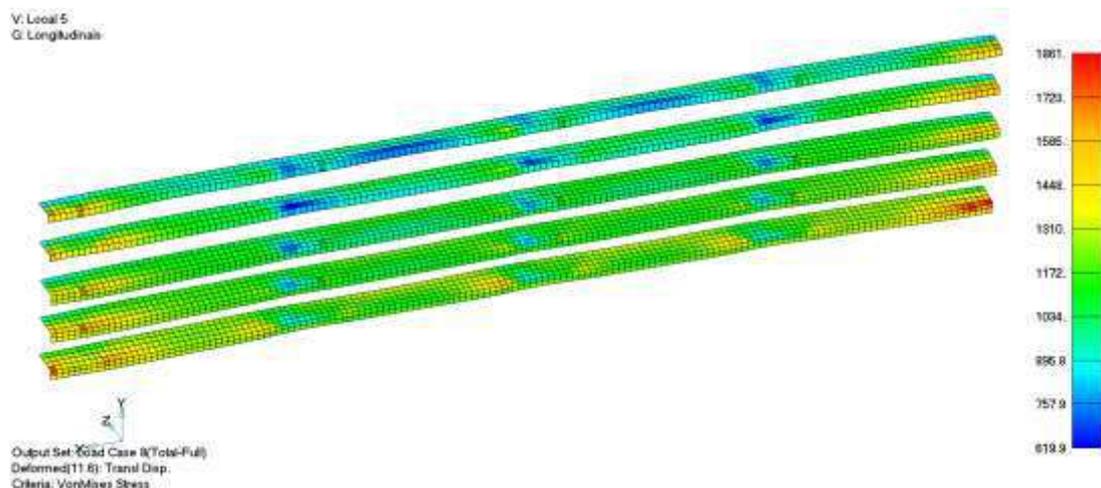


Figura 6-14 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

Neste exemplo, foi possível identificar o fenômeno de pós-flambagem. As tensões ultrapassaram a tensão crítica de flambagem, no entanto há uma redistribuição de tensões para a extremidade dos painéis, onde estão instalados os reforços, evitando o colapso dos painéis.

6.8 Exemplo 6 – Falha

Após a falha dos painéis, a espessura bruta foi reduzida para 17,85 milímetros e outra análise foi realizada.

Após a redução, foi constatada a falha de todos os painéis. Os painéis foram reprovados em ambos os critérios de flambagem e resistência última. Os elementos longitudinais não apresentaram resultados abaixo do limite esperado.

A Tabela 6-12 mostra os piores cenários da análise. As Figura 6-15 e Figura 6-16 mostram, respectivamente, os resultados de flambagem e resistência dos painéis do costado, enquanto as Figura 6-17 e Figura 6-18 destacam a flambagem e a deformação dos longitudinais nessa ordem.

Tabela 6-12 – Resultados da 6ª análise (Pós flambagem dos painéis)

PAINEL		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	1,59	1,31	L-37	0,39	0,32
	2	1,65	1,32	L-36	0,41	0,35
	3	1,63	1,25	L-35	0,49	0,38
	4	1,53	1,13	L-34	0,54	0,42
				L-33	0,58	0,41
Cv140-145	5	1,71	1,41	L-37	0,28	0,28
	6	1,76	1,42	L-36	0,35	0,41
	7	1,70	1,32	L-35	0,53	0,31
	8	1,55	1,14	L-34	0,61	0,34
				L-33	0,72	0,52
Cv145-150	9	1,71	1,42	L-37	0,27	0,26
	10	1,76	1,43	L-36	0,32	0,43
	11	1,70	1,32	L-35	0,53	0,29
	12	1,54	1,13	L-34	0,61	0,32
				L-33	0,72	0,47
Cv150-155	13	1,56	1,28	L-37	0,38	0,50
	14	1,60	1,27	L-36	0,49	0,64
	15	1,57	1,18	L-35	0,48	0,47
	16	1,46	1,07	L-34	0,55	0,53
				L-33	0,62	0,70

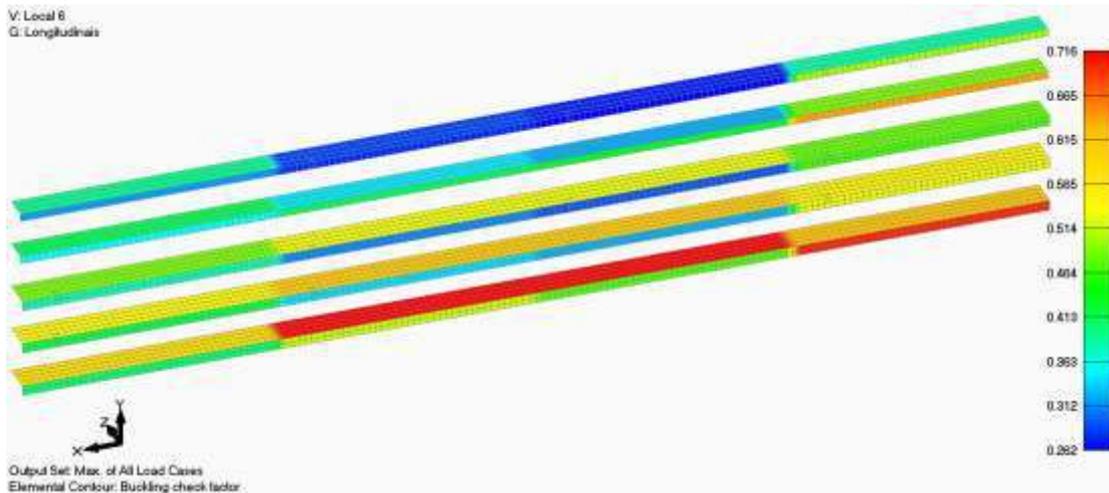


Figura 6-17 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 6(UC de flambagem).

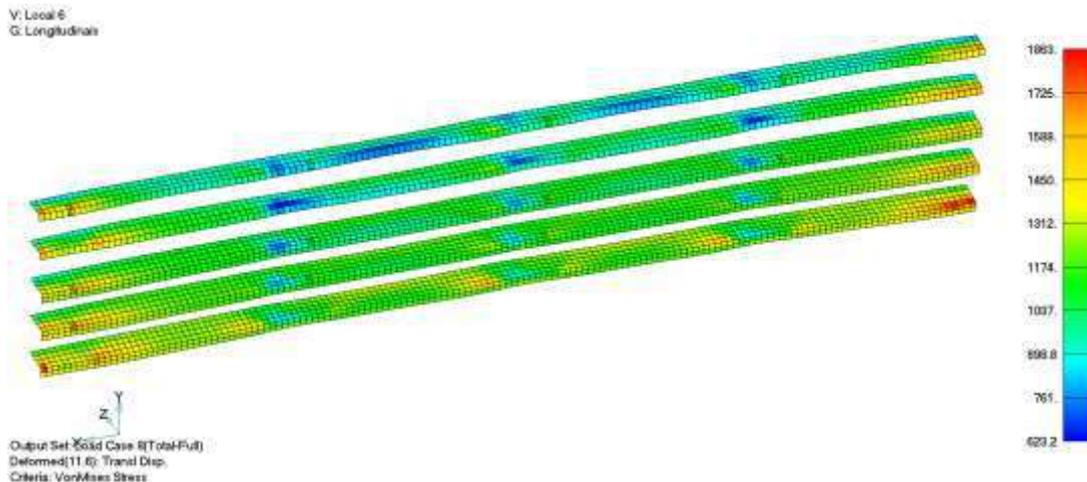


Figura 6-18 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

6.9 Exemplo 7 – Aumento do espaçamento (1800 mm)

Utilizando a mesma espessura de chapa do exemplo 3 ($t_{bruta} = 21,85 \text{ mm}$), cujos painéis não apresentaram comportamento de flambagem, e aumentando o espaçamento entre reforçadores para 1800 milímetros, o dobro utilizado nas análises anteriores, a sétima análise possui a configuração de painéis apresentada na Figura 6-19.

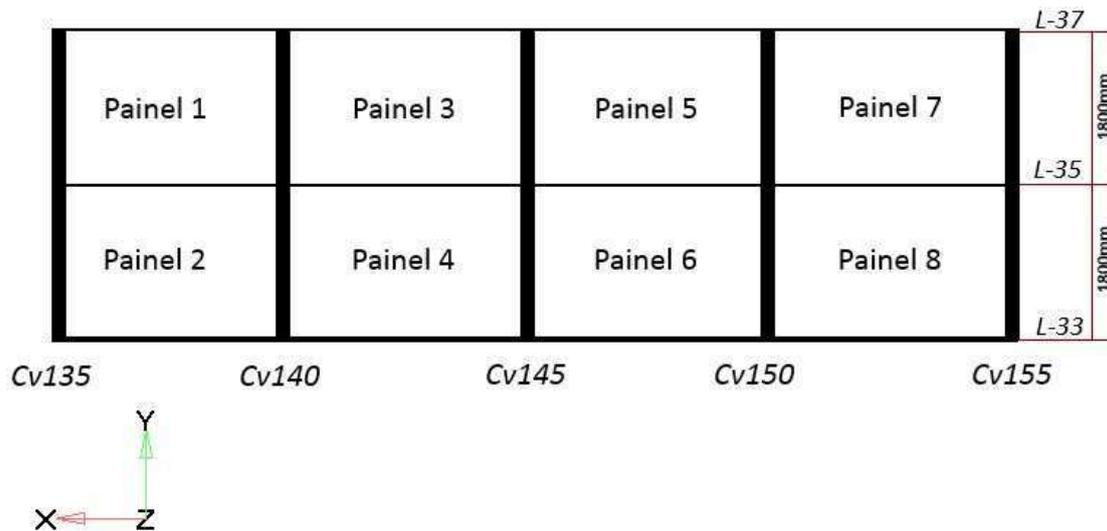


Figura 6-19 – Painéis com espaçamento entre reforçadores de 1800mm.

Os reforçadores longitudinais utilizados possuem as mesmas características dos reforçadores originais: alma com 14 mm e flange com 28 mm.

A Tabela 6-13 apresenta os resultados da sétima análise, considerando o pior cenário dentre os 8 casos de carregamento. As Figura 6-20 e Figura 6-21 ilustram os resultados de flambagem e resistência dos painéis do costado, e as Figura 6-22 e Figura 6-23 mostram a flambagem e a deformação dos longitudinais, respectivamente.

Tabela 6-13 – Resultados da 7ª análise (aumento do espaçamento)

CHAPEAMENTO			REFORÇO			
PAINEL		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv135-140	1	5,23	1,52	L-37	0,41	0,36
	2	5,05	1,55	L-35	0,56	0,41
				L-33	0,62	0,55
Cv140-145	3	5,50	1,58	L-37	0,27	0,26
	4	5,22	1,60	L-35	0,51	0,28
				L-33	0,71	0,47
Cv145-150	5	5,50	1,57	L-37	0,26	0,24
	6	5,18	1,59	L-35	0,51	0,28
				L-33	0,70	0,51
Cv150-155	7	5,09	1,48	L-37	0,41	0,64
	8	4,85	1,51	L-35	0,57	0,47
				L-33	0,69	0,56

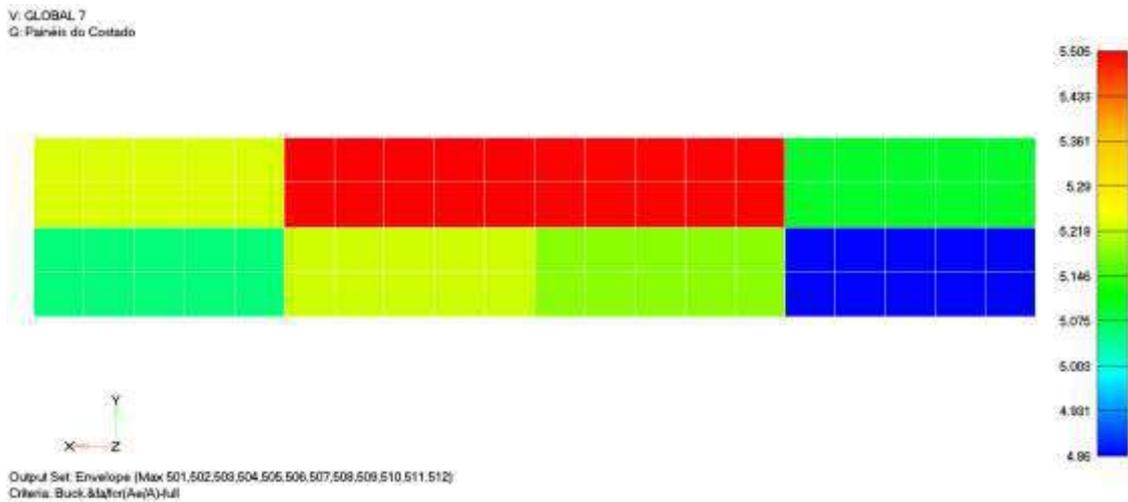


Figura 6-20 - Resultado de Flambagem dos painéis do costado do exemplo 7 (UC de Flambagem).

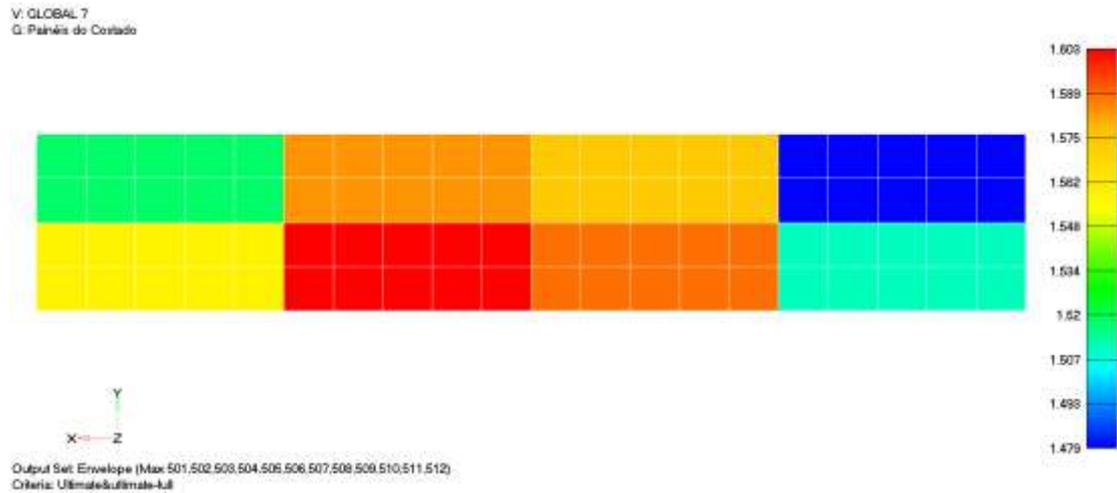


Figura 6-21 - Resultado de Resistência Última dos painéis do costado do exemplo 7 (UC de resistência última).

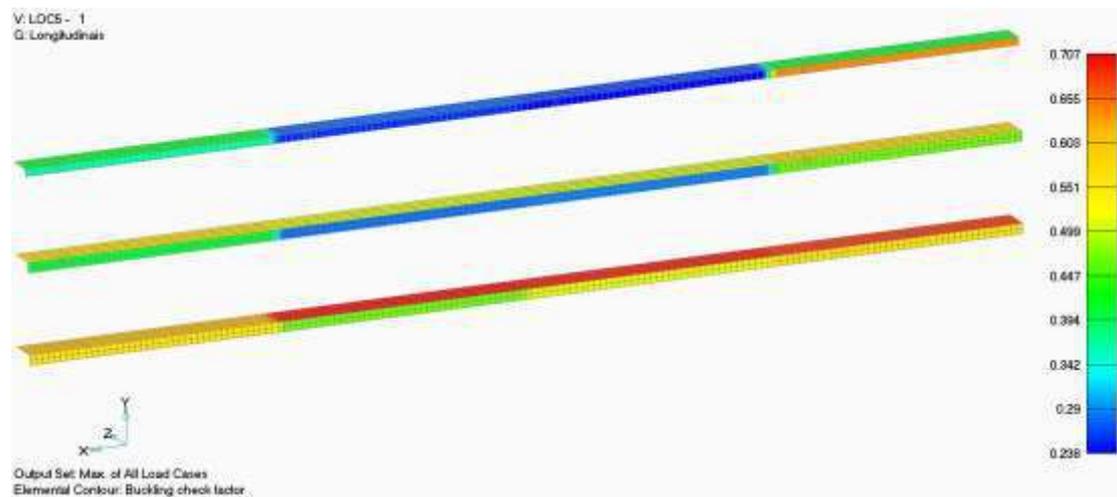


Figura 6-22 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 7 (UC de flambagem).

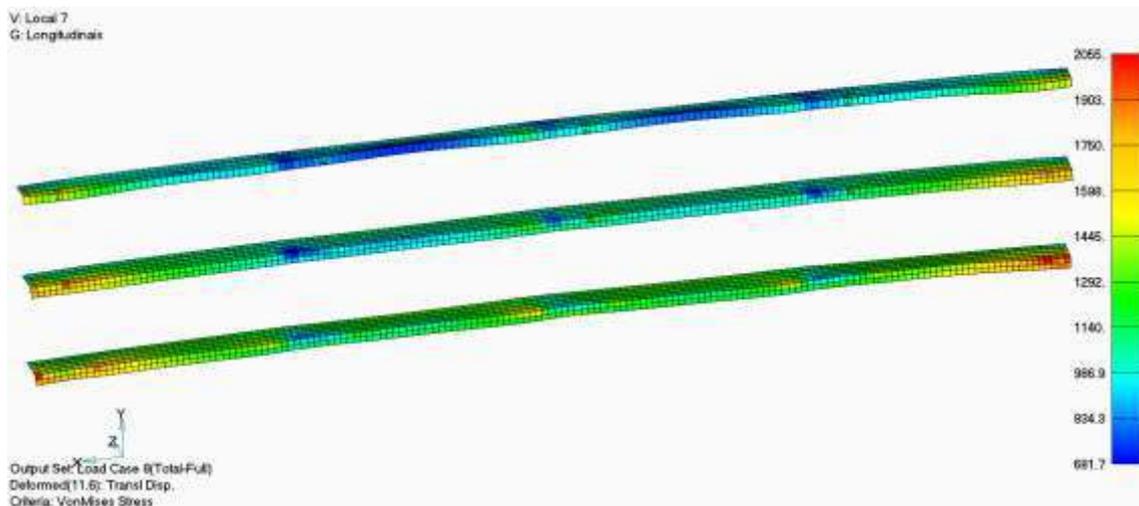


Figura 6-23 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

Os resultados apontados nesse item indicam que, mesmo com o aumento da espessura, a configuração de painel com 1800 x 5000 milímetros não é efetivo para suportar os efeitos de flambagem e resistência última, devido à discrepância na relação entre largura do painel pela espessura, causado aumento excessivo do espaçamento entre os reforçadores. Todos os painéis ultrapassaram o critério de resistência última em torno de 50%. Os reforçadores permanecem íntegros, porém este requisito, por si só, não é suficiente para assegurar a integridade da estrutura, visto que para os elementos unidimensionais, um pequeno acréscimo de tensão pode resultar em grandes deslocamentos transversais.

Para atender a regra, a espessura mínima de projeto segundo ABS (2014) para este espaçamento deveria ser de 41,08 mm, como mostra o cálculo a seguir.

$$t_{1800} = 0,73 s \frac{k_1 p^{1/2}}{f_1} = 0,73 \times 1800 \times \left(\frac{0,342 \times 2,949}{1032} \right)^{1/2} = 41,08 \text{ mm}$$

6.10 Exemplo 8 – Redução do espaçamento (450 mm)

Por último, o exemplo 8 utiliza as propriedades do exemplo 6 (pós flambagem), onde ocorreu a falha dos painéis pelos dois critérios de regra. A espessura de 17,85 mm

combinada a um espaçamento menor, com 450 mm, pode ser observada na Figura 6-24 abaixo.

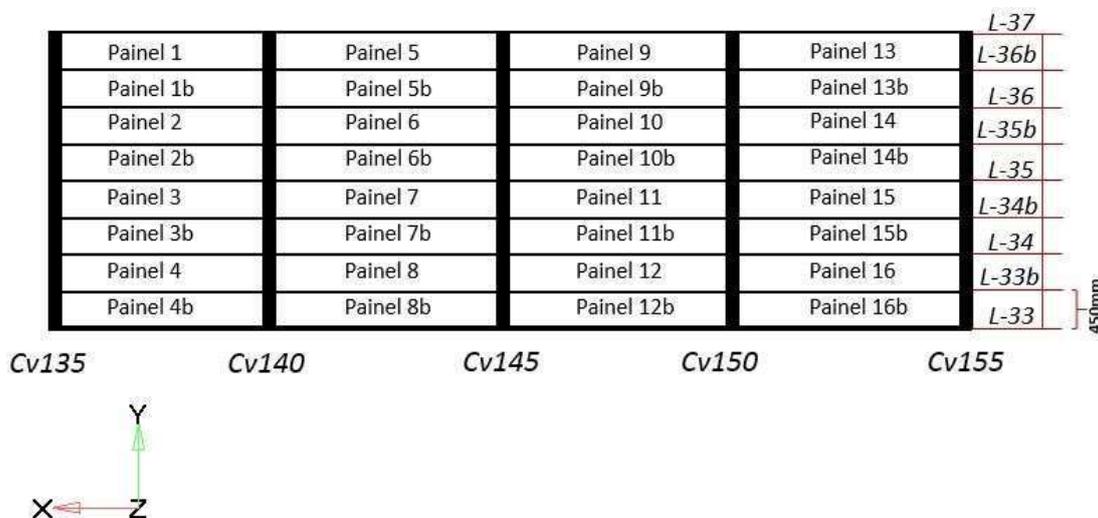


Figura 6-24 – Painéis com espaçamento entre reforçadores de 450 mm.

A nova configuração de painéis para análise é composta por reforçadores longitudinais semelhantes aos do exemplo 6 ($t_{\text{alma}} = 12,5$ mm e $t_{\text{flange}} = 26,0$ mm), e os reforçadores intermediários acrescentados possuem as mesmas características do seu antecessor (exemplo: L36b é igual ao L36).

As Tabela 6-14 e Tabela 6-15 mostram os resultados encontrados, considerando o pior resultado dentre os 8 casos de carregamento.

Tabela 6-14 – Resultados da 8ª análise (redução do espaçamento)

		CHAPEAMENTO		REFORÇO		
PAINEL		Flambagem	Resistência	ID.	Flambagem	Flambagem
		(UC)	(UC)		Alma (UC)	Flange (UC)
Cv135-140	1	0,42	0,27	L-37	0,40	0,28
	2	0,43	0,27	L-37a	0,24	0,23
	3	0,43	0,26	L-36	0,37	0,32
	4	0,44	0,26	L-36a	0,28	0,25
	5	0,43	0,24	L-35	0,30	0,30
	6	0,43	0,22	L-35a	0,49	0,20
	7	0,43	0,22	L-34	0,60	0,32
	8	0,43	0,23	L-34a	0,59	0,22
				L-33	0,77	0,38

Tabela 6-15 – Resultados da 8ª análise (redução do espaçamento) (Cont.).

CHAPEAMENTO				REFORÇO		
PAINEL		Flambagem (UC)	Resistência (UC)	ID.	Flambagem Alma (UC)	Flambagem Flange (UC)
Cv140-145	1	0,40	0,24	L-37	0,29	0,20
	2	0,41	0,25	L-37a	0,33	0,32
	3	0,42	0,25	L-36	0,36	0,26
	4	0,43	0,25	L-36a	0,35	0,36
	5	0,44	0,24	L-35	0,73	0,23
	6	0,44	0,23	L-35a	0,80	0,34
	7	0,44	0,21	L-34	0,85	0,28
	8	0,43	0,22	L-34a	0,97	0,40
			L-33	1,17	0,41	
Cv145-150	1	0,39	0,24	L-37	0,28	0,28
	2	0,40	0,25	L-37a	0,32	0,23
	3	0,41	0,25	L-36	0,35	0,54
	4	0,42	0,25	L-36a	0,35	0,26
	5	0,41	0,24	L-35	0,74	0,29
	6	0,41	0,22	L-35a	0,82	0,29
	7	1,45	0,21	L-34	0,85	0,34
	8	0,41	0,22	L-34a	0,97	0,33
			L-33	1,17	0,49	
Cv150-155	1	0,39	0,24	L-37	0,42	0,55
	2	0,40	0,25	L-37a	0,35	0,11
	3	0,41	0,24	L-36	0,51	0,63
	4	0,42	0,24	L-36a	0,37	0,11
	5	0,41	0,22	L-35	0,60	0,49
	6	0,41	0,20	L-35a	0,62	0,12
	7	1,45	1,13	L-34	0,68	0,55
	8	0,41	0,23	L-34a	0,74	0,15
			L-33	0,85	0,66	

As Figura 6-25 e Figura 6-26 ilustram, respectivamente, os resultados de flambagem e resistência dos painéis do costado e as Figura 6-27 e Figura 6-28 mostram a flambagem e a deformação dos elementos longitudinais nessa ordem.

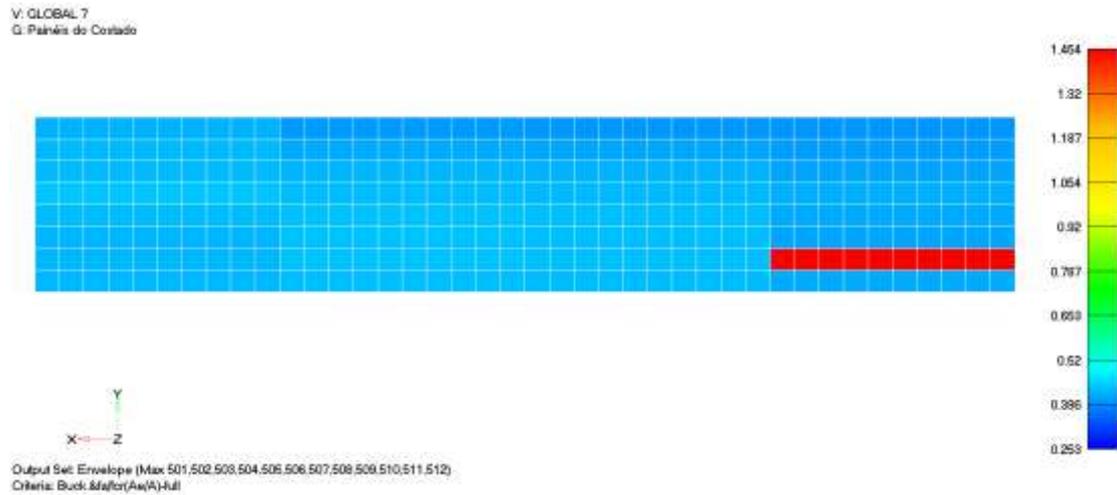


Figura 6-25 - Resultado de Flambagem dos painéis do costado do exemplo 8 (UC de flambagem).

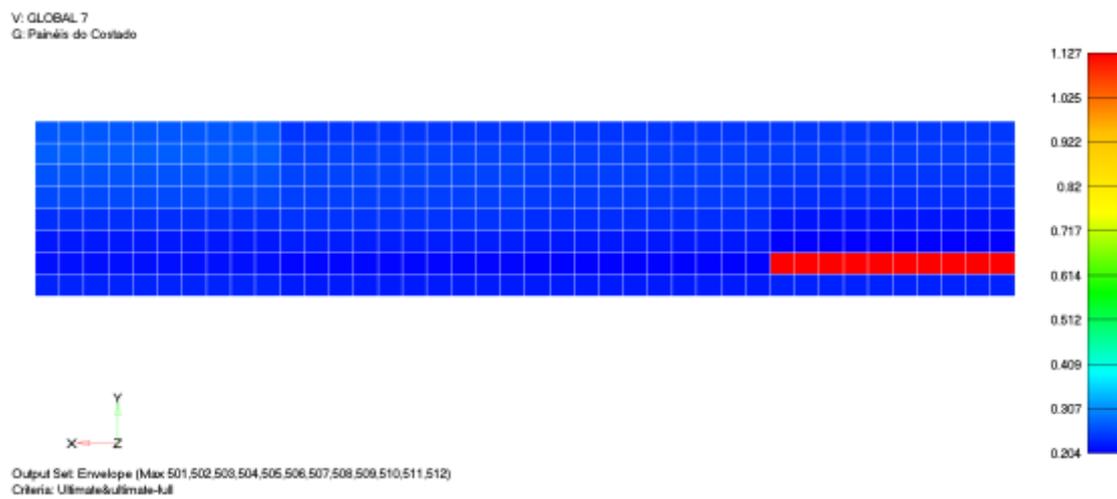


Figura 6-26 - Resultado de Resistência Última dos painéis do costado do exemplo 8 (UC de resistência última).

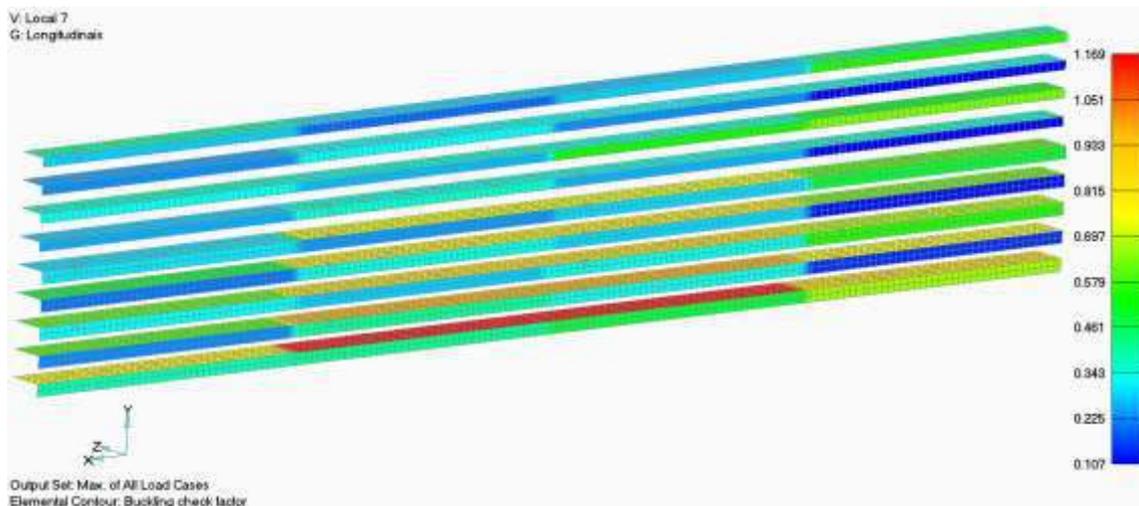


Figura 6-27 - Resultado da análise de flambagem dos longitudinais do modelo local 8 (UC de flambagem).

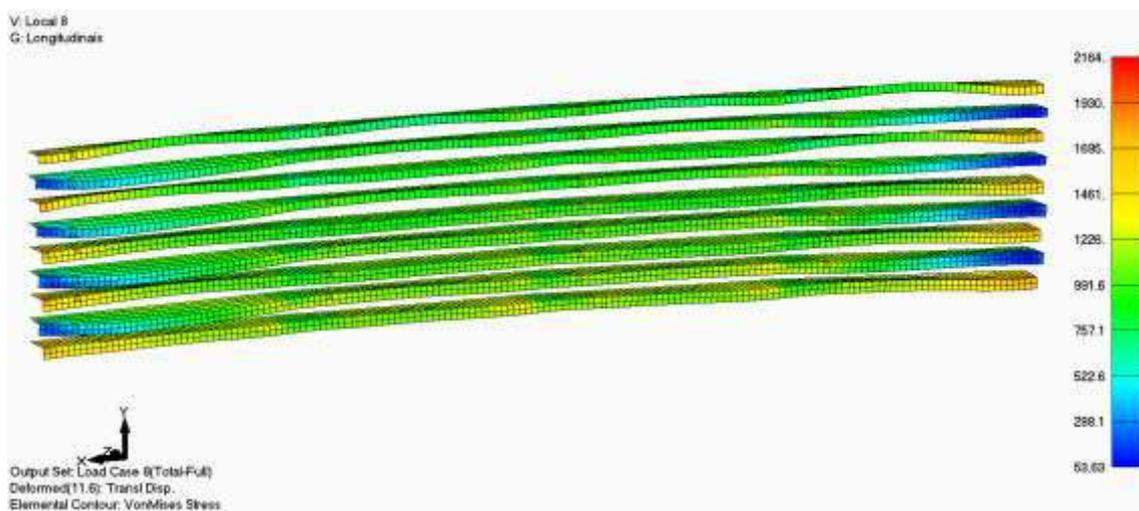


Figura 6-28 - Deformada dos reforçadores ampliada 10 vezes para o caso de carga 8 (tensão de Von Mises).

Utilizando o espaçamento de projeto e espessura de 17,85 mm, onde os painéis colapsam (exemplo 6). Ao adicionar reforçadores à região, reduzindo o espaçamento para 450 mm, apenas um painel não atende aos critérios de flambagem do ABS. A alma dos reforçadores inferiores entre as cavernas 140 e 150 falham por flambagem, no entanto, os flanges e o chapeamento dessa região permanecem dentro do limite de aceitação.

Ao adicionar mais reforçadores à região e reduzir a razão de aspecto dos painéis, é possível recompor a estabilidade da estrutura, no que diz respeito ao comportamento de

flambagem das placas. No entanto, há um aumento de resistência na região refletindo da tensão exercida sobre os reforçadores. Os reforçadores da região inferior da placa não são capazes de resistir às forças adicionais, e falham por flambagem.

O painel 7, compreendido entre as cavernas 150 e 155 apresenta resultados inconsistentes, devido à convergência numérica do modelo. O modelo numérico da região analisada foi refinado a partir do modelo global e a transferência de carregamento é feita através de elementos rígidos, conforme indicado no item 5.4. Esta transferência de carregamento pode ter sido comprometida pela transição repentina de elementos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram realizadas análises de flambagem no chapeamento do costado de boreste de um FPSO. No total, oito diferentes exemplos foram testados na região compreendida entre as cavernas 135 e 155 e entre os reforçadores longitudinais L33 e L37. O Método adotado para análise de flambagem dos painéis do costado de um FPSO, considerando a reavaliação estrutural dessa região, foi o Método dos Elementos Finitos. As análises foram realizadas com o auxílio dos programas FPSO, FEMAP e NASTRAN.

A análise realizada dividiu-se em três etapas. A primeira etapa consistiu no dimensionamento da embarcação e análise inicial dos escantilhões. A primeira parte da análise consiste apenas em cálculos prescritivos. Na segunda etapa, deu-se a confecção e análise do modelo global para obtenção das tensões de viga navio, deformações, e condições de contorno. A terceira parte da análise foi subdividida em duas etapas: a análise de flambagem do chapeamento do costado e a análise dos reforçadores longitudinais do costado.

A análise de flambagem dos painéis do costado foi realizada da seguinte forma: a primeira análise foi feita com a espessura de projeto; em seguida, as espessuras foram reduzidas e foi possível verificar o comportamento da estrutura diante de uma redução máxima de 32% da espessura mínima exigida pela regra. Foram utilizadas 6 espessuras diferentes e três espaçamentos entre reforçadores.

A primeira análise (exemplo 1), como esperado, apresentou resultados dentro do limite permitido, uma vez que foi utilizada uma espessura acima da espessura de projeto calculada. Todos os painéis analisados passaram nos critérios de flambagem e resistência última, assim como os reforçadores dos painéis.

No exemplo 2, mesmo com a redução de espessura para espessura mínima de projeto, os painéis e os reforçadores analisados permanecem dentro do limite exigido pela Regra. Este resultado também era esperado visto que nenhum requisito da regra foi desobedecido.

Nos exemplos 3 e 4, tanto as espessuras dos painéis, quanto os reforçadores, sofreram redução. Os reforçadores agora não atendem aos requisitos de inércia e proporcionalidade exigidos pela regra ABS. Mesmo com a redução das espessuras na

chapa e reforçadores, a região continua sendo capaz de suportar as cargas e não falha por flambagem.

Apenas na quinta redução das espessuras, como mostra o exemplo 5, é que a estrutura atinge o limite máximo de flambagem. Os painéis enrijecidos deixam de atender ao critério de flambagem, apesar de não atingirem os limites de pós-flambagem.

O fenômeno de pós-flambagem, ou colapso, ocorre quando a espessura dos painéis é reduzida em 23% da espessura original, como indicado no sexto exemplo deste trabalho. Os longitudinais permanecem suportando os esforços, apesar de não atenderem aos requisitos da regra. Ou seja, ocorre apenas a falha à nível do painel.

Os painéis cujo a razão de aspecto foi reduzida, devido ao aumento do espaçamento, mostrado no exemplo 7, apresentou resultados muito acima dos limites permitidos. Os reforçadores permanecem íntegros, no entanto, este requisito por si só não é suficiente para assegurar a integridade da estrutura.

Por outro lado, a instalação de reforçadores intermediários nos painéis onde ocorreram o colapso, foram capazes de suportar o carregamento adicional, como mostrado no exemplo 8.

Em todos os exemplos estudados que sofreram falha, todos os modos de falha foram na placa, do ponto de vista global, onde o chapeamento sofre deformação, mas os reforçadores permanecem suportando os esforços.

Apesar da alma do reforçador L33 entre as cavernas 140 e 150 fletir, o chapeamento desta região e o flange permanecem dentro do limite esperado. Este ocorrido por si só, não configura falha à nível do painel e trata-se apenas de uma falha local.

Mesmo com a maior redução de espessura, onde ocorre o colapso da placa, os reforçadores são capazes de suportar a carga adicional não permitindo a flambagem além do nível da placa. Isto confirma que os conceitos de controle de flambagem utilizados, quando atendidos os critérios por eles impostos, são confiáveis.

Além disso, a análise de flambagem pelo método de elementos finitos mostrou-se muito eficiente para reavaliação estrutural de FPSOs que estão em operação, considerando que a troca de um painel é extremamente onerosa e muitas vezes inviável,

no que diz respeito a complexidade do processo de reparo. Como por exemplo, a troca de um painel do costado localizado abaixo da linha d'água.

Este tipo de reavaliação estrutural, combinada com outras análises, como por exemplo a análise de fadiga das conexões críticas, pode ser muito útil para o estudo de extensão de vida útil dos FPSOs. Os FPSOs são normalmente projetos para operar por 20 ou 25 anos e muitas vezes precisam continuar sua operação devido a produtividade do poço.

Para estudos futuros, recomenda-se:

- Aplicação do método de elementos finitos para análise de flambagem de painéis enrijecidos, utilizando a instalação de reforços adicionais, tanto no sentido vertical, quanto horizontal, reduzindo a relação altura x comprimento. Como por exemplo, adicionar reforços verticais aos painéis dos exemplos 6 e 7 e verificar se mesmo com os reforços essas regiões ainda falharão por flambagem ou resistência.
- Refinamento da malha e extensão do modelo local para avaliar a influência das condições de contorno na região analisada como, por exemplo, o comportamento da distribuição de tensões no flange dos exemplos 1 e 2.
- Modelar imperfeições geométricas como furos na malha dos elementos longitudinais e estudar o comportamento de flambagem da estrutura pelo Método de Elementos Finitos. As regras do ABS fornecem formulações com fatores de correção que compensam essas imperfeições.
- Análise de flambagem através de outros softwares de elementos finitos, considerando as tolerâncias de fabricação permitidas pelas normas, uma vez que imperfeições iniciais tem um efeito considerável na capacidade dos elementos à flambagem. Fazer uma comparação dos resultados obtidos entre os softwares de elementos finitos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARTON, C., HAMBLING, H., 2016. Disponível em: <https://www.offshore-mag.com/content/dam/offshore/print-articles/volume-76/08/2016FPSO080816IAAds.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2016.
- [2] OFFSHORE MAGAZINE. Disponível em: <https://www.offshore-mag.com/content/dam/offshore/print-articles/volume-77/08/2017FPSO-072017-Ads.pdf>. Acesso em: 20 out. 2017
- [3] ABS, 2005, Commentary on the guide for buckling and ultimate strength assessment for offshore structures, Houston, American Bureau of Shipping.
- [4] SIEMENS, P. L. M. "Software Inc." FEMAP – Finite Element Modeling And Post processing v 10.2.0., (2010)
- [5] SIEMENS, P. L. M. "Software Inc." NX Nastran User's Guide (2008).
- [6] GIGANTES DA Engenharia – *Plataformas de Petróleo*. Produção de Bollere Group e divulgado por National Geographic Channel. [2011]. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ierscRhp9j8>>. Acesso em: out. 2017.
- [7] ABS, 2014, **Floating Production Installations**, Houston, American Bureau of Shipping.
- [8] JACOB, B.P, 2014, Notas de aula de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore* do Programa de Engenharia Civil – Área de Estruturas, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- [9] FLOATED Product Line Why a Spar. Divulgado por Tecnip. 29 set. 2004. Disponível em: <https://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2004/dfd_spars_tecnip.pdf> Acesso em: 2 out. 2018.
- [10] BARROS, M.R.C., Análise de fadiga em estruturas offshore tipo unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO), Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/PEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

- [11] ANÔNIMO. Conhecendo a História da Plataforma P 34. 15 nov. 2010. Disponível em: <http://cciviles.blogspot.com/2010/11/conhecendo-historia-da-plataforma-p-34.html>. Acesso em: out. 2017.
- [12] SOUZA, V.V.C., *Análise estrutural para conversão de FPSO*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/PEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- [13] ANÔNIMO. Módulos da plataforma P-66 seguem rumo ao estaleiro integrador. 28 out. 2014. Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/modulos-da-plataforma-p-66-seguem-rumo-ao-estaleiro-integrador.htm>>. Acesso em: nov. 2016.
- [14] GROVE, M.A., *Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs*. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005.
- [15] NETO, T.G., PORTELLA, R.B., “FPSOs para Operação em Águas Profundas – Experiências Adquiridas em Desenvolvimentos de Projetos”, **TN Petróleo**, nº 23, pp 44-54, 2002.
- [16] RAWSON, K.J. e TUPPER E.C., 2001, **Basic ship theory**, 5th ed., United Kingdom, Butterworth Heinemann.
- [17] PETROBRAS. Disponível em: <www.petrobras.com.br>. Acesso em: 1 set. 2016.
- [18] FONSECA, M.M., 2002, **Arte Naval**, 6a ed., Rio de Janeiro, Serviço de Documentação da Marinha.
- [19] BAI, Y., 2003, **Marine Structural Design**, 1st ed., United Kingdom, Elsevier.
- [20] ABS, 2010, Guide for Dynamic loading approach for FPSO installations, Houston, American Bureau of Shipping.
- [21] TIMOSHENKO S.P. AND WOINOWSKY-KRIEGER, S. (1959). **Theory of Plates and Shells**, McGraw-Hill Book Company, New York
- [22] UGURAL, A.C. (2010). **Stress in Beam, Plates and Shells**, 3rd edition, CRC Press by Taylor & Francis Group, New York.

- [23] TIMOSHENKO, S.P. AND GERE, J.M. (1961), **Theory of Elastic Stability**, Second Edition, Engineering Societies Monographs, McGraw Hill, N.Y.
- [24] ABS, 2016, **Rules for building and classing steel vessels**, Houston, American Bureau of Shipping.
- [25] API, 2000. Bulletin on Design of Stability Design of Cylindrical Shells, API BULLETIN 2U.
- [26] API, 2000. Bulletin on Design of Flat Plate Structures, API BULLETIN 2V.
- [27] ABS, 2004, Guide for buckling and ultimate strength assessment for offshore.
- [28] GIACCHINI, B.L., 2002, “Uma breve Introdução ao Método dos Elementos Finitos”. Notas de aula de Elementos finitos do Instituto de Ciências Exatas, UFMG, Belo Horizonte/MG.
- [29] ABS, 2012, FPSO Eagle versão 2.0.
- [30] ABS, 1992, Analysis Procedure Manual for the Dynamic Loading Approach (DLA) for Tankers. Houston, American Bureau of Shipping.
- [31] ABS, 1999, Commentary on Load Criteria SafeHull Load Criteria for Tanker Structures. Houston, American Bureau of Shipping.
- [32] ABS, 2000, SEAS/ESFactor User’s Guide of SafeHull for FPSO, American Bureau of Shipping.structures, Houston, American Bureau of Shipping.
- [33] ABS, 2012, FPSO Eagle versão 2.0.
- [34] API, 2000. Bulletin on Design of Flat Plate Structures, API BULLETIN 2V.
- [35] DNV. Recommended Practice DnV-RP-C201. **Buckling Strength of Plated Structures**. Norway. Part 1- 7.5. October 2002.
- [36] ANÔNIMO, 2017. Disponível em: <https://www.offshore-mag.com/articles/2017/04/jubilee-fps0-faces-extended-shutdown-for-mooring-realignment.html>. Acesso em: 27 set. 2018.
- [37] MODEC. Disponível em: <www.modec.com>. Acesso em: 20 ago. 2016.

- [38] OFFSHORE ENERGY. Disponível em: <www.offshoreenergytoday.com/tag/troll-a/>. Acesso em: 21 ago. 2016.
- [39] OFFSHORE MAGAZINE. Disponível em: <www.offshore-mag.com>. Acesso em: 9 ago. 2016.
- [40] OFFSHORE MAGAZINE. Disponível em: <https://www.offshore-mag.com/content/dam/offshore/print-articles/volume-77/08/2017FPSO-072017-Ads.pdf>. Acesso em: 20 out. 2017
- [41] Plataforma TLP. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>. Acesso em: 2 out, 2018.

APÊNDICE I – Cálculo prescritivo dos reforços

De acordo com os conceitos de controle de flambagem, os reforçadores devem atender aos requisitos de inércia e proporcionalidade, como indica o item 4.3.3 b) e e) deste trabalho.

O cálculo de proporcionalidade e momento de inércia dos reforços utilizados no Costado são apresentados nas Figuras A1 1 a A1 4.

Item	Profile				Attached Plate		Y1	Y2	Y4	Y	Inércia			Inércia
	H	B	t3	t2	w cm	tk cm					J1	J2	J4	
	c	f	i	g							J1	J2	J4	
AS-BUILT														
L54	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.12	1.06	30.77	60.77	24.11	56219.05	21861.91	72601.06	150682.02
L55	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.12	1.06	30.77	60.77	24.11	56219.05	21861.91	72601.06	150682.02
L56	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.12	1.06	30.77	60.77	24.11	56219.05	21861.91	72601.06	150682.02
L57	50.0	15.0	1.2	2.7	50.00	2.12	1.06	25.77	50.77	17.88	29973.59	14109.50	43816.79	87899.88
L58	50.0	15.0	1.2	2.7	50.00	2.12	1.06	25.77	50.77	17.88	29973.59	14109.50	43816.79	87899.88
1ª REDUÇÃO														
L54	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.05	1.03	30.70	60.70	24.39	55986.71	21552.15	71232.44	148771.31
L55	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.05	1.03	30.70	60.70	24.39	55986.71	21552.15	71232.44	148771.31
L56	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.05	1.03	30.70	60.70	24.39	55986.71	21552.15	71232.44	148771.31
L57	50.0	15.0	1.2	2.7	50.00	2.05	1.03	25.70	50.70	18.11	29946.44	13854.41	43046.71	86847.56
L58	50.0	15.0	1.2	2.7	50.00	2.05	1.03	25.70	50.70	18.11	29946.44	13854.41	43046.71	86847.56
2ª REDUÇÃO														
L54	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	2.00	1.00	30.75	60.75	23.74	51738.23	19602.50	68517.82	139858.54
L55	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	2.00	1.00	30.75	60.75	23.74	51738.23	19602.50	68517.82	139858.54
L56	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	2.00	1.00	30.75	60.75	23.74	51738.23	19602.50	68517.82	139858.54
L57	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	2.00	1.00	25.75	50.75	17.54	27405.48	12735.61	41367.15	81508.24
L58	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	2.00	1.00	25.75	50.75	17.54	27405.48	12735.61	41367.15	81508.24
3ª REDUÇÃO														
L54	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.80	0.90	30.55	60.55	24.72	51082.90	18687.75	64221.10	133991.75
L55	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.80	0.90	30.55	60.55	24.72	51082.90	18687.75	64221.10	133991.75
L56	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.80	0.90	30.55	60.55	24.72	51082.90	18687.75	64221.10	133991.75
L57	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.80	0.90	25.55	50.55	18.33	27360.51	11978.87	38954.15	78293.53
L58	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.80	0.90	25.55	50.55	18.33	27360.51	11978.87	38954.15	78293.53

Figura A1 1 – Cálculo do momento de Inércia dos reforçadores do Costado.

Item	Profile				Attached Plate		Y1	Y2	Y4	Y	Inércia			Inércia
	H	B	t3	t2	w cm	tk cm					J1	J2	J4	
	c	f	i	g							J1	J2	J4	
L54	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.70	0.85	30.45	60.45	25.25	50625.01	18267.27	61978.94	130871.22
L55	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.70	0.85	30.45	60.45	25.25	50625.01	18267.27	61978.94	130871.22
L56	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.70	0.85	30.45	60.45	25.25	50625.01	18267.27	61978.94	130871.22
L57	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.70	0.85	25.45	50.45	18.76	27280.26	11610.95	37683.43	76574.64
L58	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.70	0.85	25.45	50.45	18.76	27280.26	11610.95	37683.43	76574.64

4ª REDUÇÃO

Item	Profile				Attached Plate		Y1	Y2	Y4	Y	Inércia			Inércia
	H	B	t3	t2	w cm	tk cm					J1	J2	J4	
	c	f	i	g							J1	J2	J4	
L54	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	30.35	60.35	25.81	50063.43	17878.12	59671.13	127612.69
L55	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	30.35	60.35	25.81	50063.43	17878.12	59671.13	127612.69
L56	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	30.35	60.35	25.81	50063.43	17878.12	59671.13	127612.69
L57	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	25.35	50.35	19.22	27152.13	11253.48	36366.77	74772.38
L58	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	25.35	50.35	19.22	27152.13	11253.48	36366.77	74772.38

5ª REDUÇÃO

Item	Profile				Attached Plate		Y1	Y2	Y4	Y	Inércia			Inércia
	H	B	t3	t2	w cm	tk cm					J1	J2	J4	
	c	f	i	g							J1	J2	J4	
L54	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	2.12	1.06	30.87	60.87	23.22	51984.20	20162.68	70881.04	143027.92
L55	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	2.12	1.06	30.87	60.87	23.22	51984.20	20162.68	70881.04	143027.92
L56	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	2.12	1.06	30.87	60.87	23.22	51984.20	20162.68	70881.04	143027.92
L57	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	2.12	1.06	25.87	50.87	17.14	27375.87	13178.26	42682.61	83236.74
L58	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	2.12	1.06	25.87	50.87	17.14	27375.87	13178.26	42682.61	83236.74

6ª REDUÇÃO

Item	Profile				Attached Plate		Y1	Y2	Y4	Y	Inércia			Inércia
	H	B	t3	t2	w cm	tk cm					J1	J2	J4	
	c	f	i	g							J1	J2	J4	
L54	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.00	1.00	30.65	60.65	24.61	55786.52	21319.97	70164.19	147270.68
L55	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.00	1.00	30.65	60.65	24.61	55786.52	21319.97	70164.19	147270.68
L56	60.0	20.0	1.2	2.7	50.00	2.00	1.00	30.65	60.65	24.61	55786.52	21319.97	70164.19	147270.68
L57	50.0	15.0	1.2	2.7	50.00	2.00	1.00	25.65	50.65	18.29	29916.06	13659.87	42443.83	86019.76
L58	50.0	15.0	1.2	2.7	50.00	2.00	1.00	25.65	50.65	18.29	29916.06	13659.87	42443.83	86019.76

7ª REDUÇÃO

Item	Profile				Attached Plate		Y1	Y2	Y4	Y	Inércia			Inércia
	H	B	t3	t2	w cm	tk cm					J1	J2	J4	
	c	f	i	g							J1	J2	J4	
L54	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	30.35	60.35	25.81	50063.43	17878.12	59671.13	127612.69
L55	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	30.35	60.35	25.81	50063.43	17878.12	59671.13	127612.69
L56	60.0	20.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	30.35	60.35	25.81	50063.43	17878.12	59671.13	127612.69
L57	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	25.35	50.35	19.22	27152.13	11253.48	36366.77	74772.38
L58	50.0	15.0	1.1	2.5	50.00	1.60	0.80	25.35	50.35	19.22	27152.13	11253.48	36366.77	74772.38

8ª REDUÇÃO

Figura A1 2 - Cálculo do momento de Inércia dos reforçadores do Costado.

OBS: espessura líquida

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.20	2.70	90	2.115	14434	150682	44.15	Acceptable	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.20	2.70	90	2.115	14434	150682	44.15	Acceptable	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.20	2.70	90	2.115	14434	150682	44.15	Acceptable	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.20	2.70	90	2.115	13271	87900	36.46	Acceptable	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.20	2.70	90	2.115	13271	87900	36.46	Acceptable	Acceptable

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.20	2.70	90	2.05	13307	148771	44.15	Acceptable	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.20	2.70	90	2.05	13307	148771	44.15	Acceptable	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.20	2.70	90	2.05	13307	148771	44.15	Acceptable	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.20	2.70	90	2.05	12214	86848	36.46	Acceptable	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.20	2.70	90	2.05	12214	86848	36.46	Acceptable	Acceptable

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.05	2.50	90	2	11893	139859	54.86	Not Accept	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.05	2.50	90	2	11893	139859	54.86	Not Accept	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.05	2.50	90	2	11893	139859	54.86	Not Accept	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.05	2.50	90	2	10965	81508	45.33	Not Accept	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.05	2.50	90	2	10965	81508	45.33	Not Accept	Acceptable

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.8	9032	133992	54.86	Not Accept	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.8	9032	133992	54.86	Not Accept	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.8	9032	133992	54.86	Not Accept	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.05	2.50	90	1.8	8281	78294	45.33	Not Accept	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.05	2.50	90	1.8	8281	78294	45.33	Not Accept	Acceptable

Figura A1 3 – Cálculo da proporcionalidade dos reforçadores do Costado.

4ª Análise

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.7	7789	130871	54.86	Not Accept	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.7	7789	130871	54.86	Not Accept	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.7	7789	130871	54.86	Not Accept	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.05	2.50	90	1.7	7119	76575	45.33	Not Accept	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.05	2.50	90	1.7	7119	76575	45.33	Not Accept	Acceptable

5ª Análise

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.6	6662	127613	54.86	Not Accept	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.6	6662	127613	54.86	Not Accept	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.05	2.50	90	1.6	6662	127613	54.86	Not Accept	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.05	2.50	90	1.6	6069	74772	45.33	Not Accept	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.05	2.50	90	1.6	6069	74772	45.33	Not Accept	Acceptable

6ª Análise

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.05	2.50	90	2.115	13776	143028	54.86	Not Accept	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.05	2.50	90	2.115	13776	143028	54.86	Not Accept	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.05	2.50	90	2.115	13776	143028	54.86	Not Accept	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.05	2.50	90	2.115	12740	83237	45.33	Not Accept	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.05	2.50	90	2.115	12740	83237	45.33	Not Accept	Acceptable

7ª Análise

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.20	2.70	180	2	24961	147271	44.15	Acceptable	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.20	2.70	180	2	24961	147271	44.15	Acceptable	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.20	2.70	180	2	24961	147271	44.15	Acceptable	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.20	2.70	180	2	22881	86020	36.46	Acceptable	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.20	2.70	180	2	22881	86020	36.46	Acceptable	Acceptable

8ª Análise

Item	Perfil				s	t net chapa	I req	I oferec	Proporc.		I oferecido
	H	B	t3	t2							
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴			
L.33	60.00	20.00	1.05	2.50	45	1.6	3331	127613	54.86	Not Accept	Acceptable
L.34	60.00	20.00	1.05	2.50	45	1.6	3331	127613	54.86	Not Accept	Acceptable
L.35	60.00	20.00	1.05	2.50	45	1.6	3331	127613	54.86	Not Accept	Acceptable
L.36	50.00	15.00	1.05	2.50	45	1.6	3034	74772	45.33	Not Accept	Acceptable
L.37	50.00	15.00	1.05	2.50	45	1.6	3034	74772	45.33	Not Accept	Acceptable

Figura A1 4 - Cálculo da proporcionalidade dos reforçadores do Costado