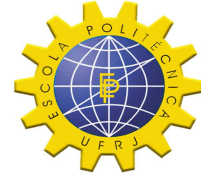


Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Projeto de Estruturas

Guilherme Lobo de Souza

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA VIDA À FADIGA DA ESTRUTURA
DE INTERFACE DO CASCO DE UM FPSO COM MÓDULOS DA PLANTA
COM SUPORTAÇÃO TIPO MULTICOLUNA SOB ESFORÇOS DE
VIGA-NAVIO**



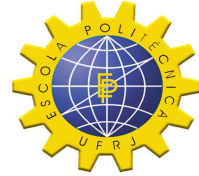
Guilherme Lobo de Souza

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA VIDA À FADIGA DA ESTRUTURA
DE INTERFACE DO CASCO DE UM FPSO COM MÓDULOS DA PLANTA COM
SUPORTAÇÃO TIPO MULTICOLUNA SOB ESFORÇOS DE VIGA-NAVIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientadores:
Gilberto Bruno Ellwanger
Carlos Alberto Bardanachvili

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2014



Souza, Guilherme Lobo de.

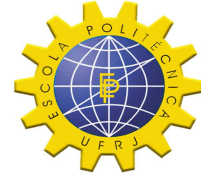
Metodologia para Estimativa da Vida à Fadiga da Estrutura de Interface do Casco de um FPSO com Módulos da Planta com Suportação Tipo Multicoluna sob Esforços de Viga-Navio / Guilherme Lobo de Souza – 2014.

110; il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2014.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger e Carlos Alberto Bardanachvili.

1. Fadiga, 2. Estruturas offshore, 3. Análise estocástica, 4. Análise Espectral. I. Ellwanger, Gilberto Bruno II. Bardanachvili, Carlos Alberto III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. IV. Título.



METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA VIDA À FADIGA DA ESTRUTURA DE INTERFACE DO CASCO DE UM FPSO COM MÓDULOS DA PLANTA COM SUPORTAÇÃO TIPO MULTICOLUNA SOB ESFORÇOS DE VIGA-NAVIO

Guilherme Lobo de Souza

Orientadores:

Gilberto Bruno Ellwanger
Carlos Alberto Bardanachvili

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D. Sc., UFRJ

Eng. Carlos Alberto Bardanachvili, D. Sc., PETROBRAS

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

Eng. Paulo Mauricio Videiro, D. Sc., PETROBRAS

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2014

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

Henry Ford

Aos meus pais, Sonia e Luiz.

À minha esposa, Bruna.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus.

Aos meus pais, Sonia e Luiz, ao meu irmão, Carlos Eduardo, por todo amor e carinho. Pelo suporte oferecido para que, durante toda minha vida, os estudos fossem priorizados.

À minha esposa Bruna, pela paciência demonstrada durante esse trabalho. Por tornar meus dias mais felizes.

A todos os meus familiares pelo carinho e apoio.

Aos orientadores Gilberto Bruno Ellwanger e Carlos Alberto Bardanachvili, pela indispensável ajuda na definição do tema de estudo, e, principalmente, pela dedicação e profissionalismo demonstrados durante a realização deste trabalho.

À PETROBRAS, pelo incentivo imprescindível na capacitação de seus empregados.

Ao engenheiro Paulo Mauricio Videiro, por permitir minha dedicação integral para a finalização deste trabalho.

Aos amigos do CENPES, por toda contribuição técnica e pelo ambiente de trabalho agradável e prazeroso.

E, por fim, a todos os amigos que contribuíram de alguma forma, mesmo que indireta, para a conclusão desta dissertação.

RESUMO

SOUZA, Guilherme Lobo de. **Metodologia para Estimativa da Vida à Fadiga da Estrutura de Interface do Casco de um FPSO com Módulos da Planta com Suportação tipo Multicoluna sob Esforços de Viga-Navio**. Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Nesta dissertação, é apresentada a metodologia para estimativa da vida à fadiga na estrutura de interface entre o casco de um FPSO e um módulo da planta de processo, feita através de chapas gusset, para os esforços de viga-navio. A concepção estrutural do módulo é do tipo multicoluna, que tem sido utilizada em algumas unidades.

Adicionalmente, é feita uma comparação, também para efeito de fadiga, entre as Bacias de Campos e Santos, esta última caracterizada por ondas extremas significativamente maiores. Este paralelo é motivado pela recente tendência de exploração dos campos do pré-sal, na Bacia de Santos.

Neste trabalho, são realizadas análises de fadiga estocástica, associadas a efeitos de primeira ordem das ondas, obtidos através de análise no domínio da frequência.

Palavras-chave: Fadiga, Estruturas Offshore, Análise Estocástica, Análise Espectral, Viga-Navio, Chapa Gusset.

ABSTRACT

SOUZA, Guilherme Lobo de. **Methodology for Fatigue Life Evaluation of the Interface Structure Between FPSO Main Deck and Multicolumn Supported Module Under Hull-Girder Bending Moments**. Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

In the present work, a methodology for fatigue life evaluation of the interface structure between hull and topside module, which includes gusset plates, under hull-girder bending moments, is presented. The type of module structural conception is the multicolumn suportation, that has been employed in some installed units.

Additionally, a comparison between fatigue lives of the unit in Campos and Santos Basins is carried out, the latter characterized by extreme waves significantly larger. This comparison is motivated by the recent trend of exploitation of pre-salt fields in Santos Basin.

Stochastic fatigue analyses are carried out, associated with first order wave effects, obtained through frequency domain analyses.

Keywords: Fatigue, Offshore Structures, Stochastic Analysis, Spectral-Based Analysis, Hull Girder, Gusset Plates.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	1
1.2	MOTIVAÇÃO.....	3
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO.....	4
2	PROCESSOS ALEATÓRIOS E AÇÕES AMBIENTAIS	6
2.1	CONCEITOS ESTATÍSTICOS	6
2.1.1	FUNÇÕES DE PROBABILIDADE	7
2.1.2	MEDIDAS DE UM PROCESSO ALEATÓRIO.....	9
2.1.3	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES	12
2.2	ANÁLISE ESPECTRAL.....	15
2.2.1	REPRESENTAÇÃO POR SÉRIES DE FOURIER.....	15
2.2.2	MOMENTOS ESPECTRAIS.....	20
2.2.3	LARGURA DE BANDA DE UM PROCESSO ALEATÓRIO	21
2.3	REPRESENTAÇÃO ESPECTRAL DE MARES ALEATÓRIOS.....	22
2.3.1	ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA.....	23
2.3.2	PERÍODOS MÉDIOS	23
2.3.3	FORMULAÇÕES PARA O MODELO ESPECTRAL	24
2.3.4	DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE ONDAS	26
3	COMPORTAMENTO DINÂMICO DE EMBARCAÇÕES.....	28

3.1	MOVIMENTOS, ACELERAÇÕES E FORÇAS INERCIAIS.....	28
3.2	ESFORÇOS SECCIONAIS DE VIGA-NAVIO.....	30
3.3	FUNÇÕES DE TRANSFERENCIA (RAO).....	32
3.3.1	GERAÇÃO DOS RAO'S DE ESFORÇOS SECCIONAIS.....	32
3.3.2	GERAÇÃO DOS RAO'S DE TENSÃO DA ESTRUTURA	33
4	ANÁLISE DE FADIGA.....	34
4.1	REGRA DE PALMGREN-MINER.....	34
4.2	CURVAS S-N	35
4.3	INFLUÊNCIA DA ESPESSURA	39
4.4	RELAÇÃO ENTRE AS CURVAS S-N E A METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DAS TENSÕES.....	40
4.5	PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE FADIGA	41
4.5.1	FADIGA SIMPLIFICADA	41
4.5.2	FADIGA ESTOCÁSTICA.....	41
4.6	ASPECTOS DE PROJETO.....	46
4.6.1	FATORES DE SEGURANÇA.....	46
4.6.2	CONSIDERAÇÃO DA COMPRESSÃO	46
4.6.3	EFEITO DA TENSÃO MÉDIA.....	46
4.6.4	SENSIBILIDADE DA RESPOSTA	47
5	METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS RAO's DE TENSÕES PRINCIPAIS	48
6	APLICAÇÃO	58

6.1	ESTIMATIVA DO DANO PARA BACIA DE CAMPOS.....	58
6.1.1	OBTENÇÃO DOS RAO'S DA EMBARCAÇÃO	58
6.1.2	OBTENÇÃO DOS RAO'S DE TENSÃO NA ESTRUTURA.....	65
6.1.3	DEFINIÇÃO DO DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE ONDAS.....	99
6.1.4	OBTENÇÃO DOS ESPECTROS DE RESPOSTA E CÁLCULO DO DANO	103
6.2	ESTIMATIVA DO DANO PARA BACIA DE SANTOS	104
7	CONCLUSÕES	106
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
	REFERÊNCIAS	108

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 – FPSO (PETROBRAS).</i>	1
<i>Figura 2 – Seção transversal típica de uma planta de processo de um FPSO (BATALHA, 2009).</i>	2
<i>Figura 3 – Transição módulo/casco – Chapa gusset.</i>	2
<i>Figura 4 – Realização de um processo determinístico.</i>	6
<i>Figura 5 – Realização de um processo aleatório.</i>	7
<i>Figura 6 – Função Densidade de Probabilidade.</i>	8
<i>Figura 7 – Função Cumulativa de Probabilidades.</i>	9
<i>Figura 8 – Conjunto de observações de um processo aleatório.</i>	11
<i>Figura 9 – Distribuição de probabilidades de um processo ergódico.</i>	13
<i>Figura 10 – Picos de um processo aleatório e sua função densidade de probabilidade.</i>	14
<i>Figura 11 – Representação de um sinal (tempo contínuo x tempo discreto).</i>	16
<i>Figura 12 – Harmônicos e energias associadas.</i>	20
<i>Figura 13 – Processo de banda estreita: (a) sinal no tempo; (b) densidade espectral.</i>	21
<i>Figura 14 – Processo de banda larga: (a) sinal no tempo; (b) densidade espectral.</i>	21
<i>Figura 15 – Registro de onda irregular (BATALHA, 2009).</i>	22
<i>Figura 16 – Graus de liberdade de um FPSO.</i>	29
<i>Figura 17 – Deformada do casco, condição sagging.</i>	30
<i>Figura 18 – Deformada do casco, condição hogging.</i>	31
<i>Figura 19 – Representação dos esforços seccionais M_v e M_h.</i>	31
<i>Figura 20 – Exemplo de curva SN.</i>	36
<i>Figura 21 – Dados experimentais.</i>	37
<i>Figura 22 – Curvas S-N (DNV, 2012) – Exposição ao ar.</i>	38
<i>Figura 23 – Espectro de resposta.</i>	43
<i>Figura 24 – Fluxo para obtenção dos danos parciais.</i>	43
<i>Figura 25 – Decomposição em Real e Imaginário.</i>	48
<i>Figura 26 – Modelo de barras, SACS.</i>	50
<i>Figura 27 – Detalhe – Modelo de barras, SACS.</i>	51
<i>Figura 28 – Modelo de elementos finitos, ANSYS.</i>	52
<i>Figura 29 – Detalhe – Pontos de estudo, ANSYS.</i>	53

<i>Figura 30 – Direções principais e eixos globais.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 31 – Componentes de tensão σ_Y, σ_Z e τ_{YZ} (Pa) em função do tempo (s).</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32 – Tensões Principais (Pa) em função do tempo (s).</i>	<i>55</i>
<i>Figura 33 – Resumo da metodologia.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 34 – Modelo de difração, WADAM.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 35 – Convenção para incidência de ondas, WADAM.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 22,5°.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 37 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 67,5°.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 38 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 112,5°.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 39 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 157,5°.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 40 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 202,5°.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 41 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 247,5°.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 42 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 292,5°.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 43 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 337,5°.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 44 – Seção transversal do navio.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 45 – Elevação do suporte estudado.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 46 – Planta do piso do módulo (SACS).</i>	<i>67</i>
<i>Figura 47 – Seção longitudinal: diagonais típicas entre “frames”.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 48 – Seção transversal: diagonais típicas entre “frames”.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 49 – Posição ocupada pelo módulo estudado.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 50 – Detalhe da chapa Gusset, em milímetros.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 51 – Modelo e condições de contorno (ANSYS).</i>	<i>71</i>
<i>Figura 52 – Refinamento da malha na região de interesse (ANSYS).</i>	<i>71</i>
<i>Figura 53 – Ação M_x, tensão σ_Y, face bottom (ANSYS).</i>	<i>72</i>
<i>Figura 54 – Ação M_x, tensão σ_Y, face top (ANSYS).</i>	<i>72</i>
<i>Figura 55 – Ação M_x, tensão σ_Z, face bottom (ANSYS).</i>	<i>73</i>
<i>Figura 56 – Ação M_x, tensão σ_Z, face top (ANSYS).</i>	<i>73</i>
<i>Figura 57 – Ação M_x, tensão τ_{YZ}, face bottom (ANSYS).</i>	<i>74</i>
<i>Figura 58 – Ação M_x, tensão τ_{YZ}, face top (ANSYS).</i>	<i>74</i>
<i>Figura 59 – Ação M_y, tensão σ_Y, face bottom (ANSYS).</i>	<i>75</i>
<i>Figura 60 – Ação M_y, tensão σ_Y, face top (ANSYS).</i>	<i>75</i>
<i>Figura 61 – Ação M_y, tensão σ_Z, face bottom (ANSYS).</i>	<i>76</i>
<i>Figura 62 – Ação M_y, tensão σ_Z, face top (ANSYS).</i>	<i>76</i>

<i>Figura 63 – Ação M_y, tensão τ_{YZ}, face bottom (ANSYS).</i>	77
<i>Figura 64 – Ação M_y, tensão τ_{YZ}, face top (ANSYS).</i>	77
<i>Figura 65 – Ação M_z, tensão σ_Y, face bottom (ANSYS).</i>	78
<i>Figura 66 – Ação M_z, tensão σ_Y, face top (ANSYS).</i>	78
<i>Figura 67 – Ação M_z, tensão σ_Z, face bottom (ANSYS).</i>	79
<i>Figura 68 – Ação M_z, tensão σ_Z, face top (ANSYS).</i>	79
<i>Figura 69 – Ação M_z, tensão τ_{YZ}, face bottom (ANSYS).</i>	80
<i>Figura 70 – Ação M_z, tensão τ_{YZ}, face top (ANSYS).</i>	80
<i>Figura 71 – Ação N_y, tensão σ_Y, face bottom (ANSYS).</i>	81
<i>Figura 72 – Ação N_y, tensão σ_Y, face top (ANSYS).</i>	81
<i>Figura 73 – Ação N_y, tensão σ_Z, face bottom (ANSYS).</i>	82
<i>Figura 74 – Ação N_y, tensão σ_Z, face top (ANSYS).</i>	82
<i>Figura 75 – Ação N_y, tensão τ_{YZ}, face bottom (ANSYS).</i>	83
<i>Figura 76 – Ação N_y, tensão τ_{YZ}, face top (ANSYS).</i>	83
<i>Figura 77 – Ação V_x, tensão σ_Y, face bottom (ANSYS).</i>	84
<i>Figura 78 – Ação V_x, tensão σ_Y, face top (ANSYS).</i>	84
<i>Figura 79 – Ação V_x, tensão σ_Z, face bottom (ANSYS).</i>	85
<i>Figura 80 – Ação V_x, tensão σ_Z, face top (ANSYS).</i>	85
<i>Figura 81 – Ação V_x, tensão τ_{YZ}, face bottom (ANSYS).</i>	86
<i>Figura 82 – Ação V_x, tensão τ_{YZ}, face top (ANSYS).</i>	86
<i>Figura 83 – Ação V_z, tensão σ_Y, face bottom (ANSYS).</i>	87
<i>Figura 84 – Ação V_z, tensão σ_Y, face top (ANSYS).</i>	87
<i>Figura 85 – Ação V_z, tensão σ_Z, face bottom (ANSYS).</i>	88
<i>Figura 86 – Ação V_z, tensão σ_Z, face top (ANSYS).</i>	88
<i>Figura 87 – Ação V_z, tensão τ_{YZ}, face bottom (ANSYS).</i>	89
<i>Figura 88 – Ação V_z, tensão τ_{YZ}, face top (ANSYS).</i>	89
<i>Figura 89 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 22,5°.</i>	90
<i>Figura 90 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 67,5°.</i>	91
<i>Figura 91 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 112,5°.</i>	91
<i>Figura 92 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 157,5°.</i>	92
<i>Figura 93 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 202,5°.</i>	92
<i>Figura 94 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 247,5°.</i>	93
<i>Figura 95 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 292,5°.</i>	93

<i>Figura 96 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 337,5°.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 97 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 22,5°.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 98 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 67,5°.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 99 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 112,5°.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 100 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 157,5°.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 101 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 202,5°.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 102 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 247,5°.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 103 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 292,5°.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 104 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 337,5°.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 105 – Aproamento da unidade.</i>	<i>102</i>

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Diagrama de dispersão HS x TP (BATALHA, 2009).</i>	26
<i>Tabela 2 – Diagrama de dispersão HS x direção de incidência (BATALHA, 2009).</i>	27
<i>Tabela 3 – Parâmetros das curvas S-N – Exposição ao ar (DNV, 2012).</i>	38
<i>Tabela 4 – Esforços extraídos no ponto de interesse, em kN.</i>	70
<i>Tabela 5 – Diagrama de dispersão HS x TP, Bacia de Campos (BOMOS, 1999).</i>	100
<i>Tabela 6 – Diagrama de dispersão HS x direção, Bacia de Campos (BOMOS, 1999).</i>	101
<i>Tabela 7 – Associação entre as direções de incidência.</i>	102
<i>Tabela 8 – Danos obtidos para Bacia de Campos.</i>	103
<i>Tabela 9 – Diagrama de dispersão HS x TP, Bacia de Santos (BOMOS, 1999).</i>	104
<i>Tabela 10 – Diagrama de dispersão HS x direção, Bacia de Santos (BOMOS, 1999).</i>	105
<i>Tabela 11 – Danos obtidos para Bacia de Santos.</i>	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia para estimar a vida à fadiga, baseada em conceitos estocásticos, da estrutura encarregada de realizar a transição entre o casco de um FPSO – “*Floating Production Storage and Offloading*” – (Figura 1) e os módulos da planta de processo com suportação tipo multicolumna. Também é realizado um estudo comparativo entre os danos de fadiga causados pela incidência de ondas nas bacias de Campos e Santos.

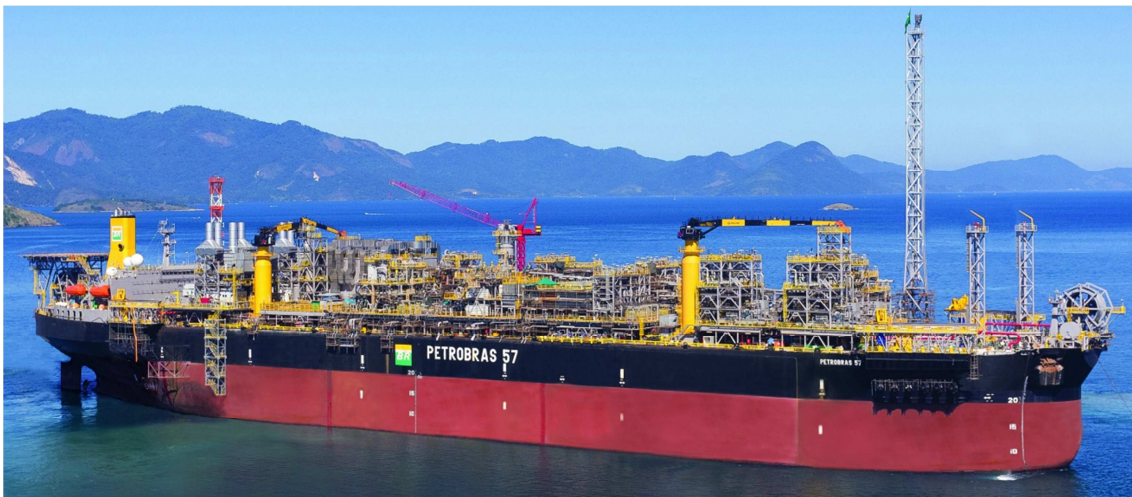


Figura 1 – FPSO (PETROBRAS).

Cabe ressaltar que este trabalho se desenvolve baseado nos métodos no domínio da frequência e, sempre que cabível, é feito um paralelo com a análise no domínio do tempo.

São apresentados os processos aleatórios que definem o comportamento dos estados de mar, assim como todo tratamento estatístico necessário para obtenção dos efeitos causados pela fadiga durante a vida útil da unidade.

A Figura 2 apresenta uma seção transversal típica de uma planta de processo de um FPSO, com destaque para um ponto de interface casco/módulo. Este ponto é apresentado na Figura 3.

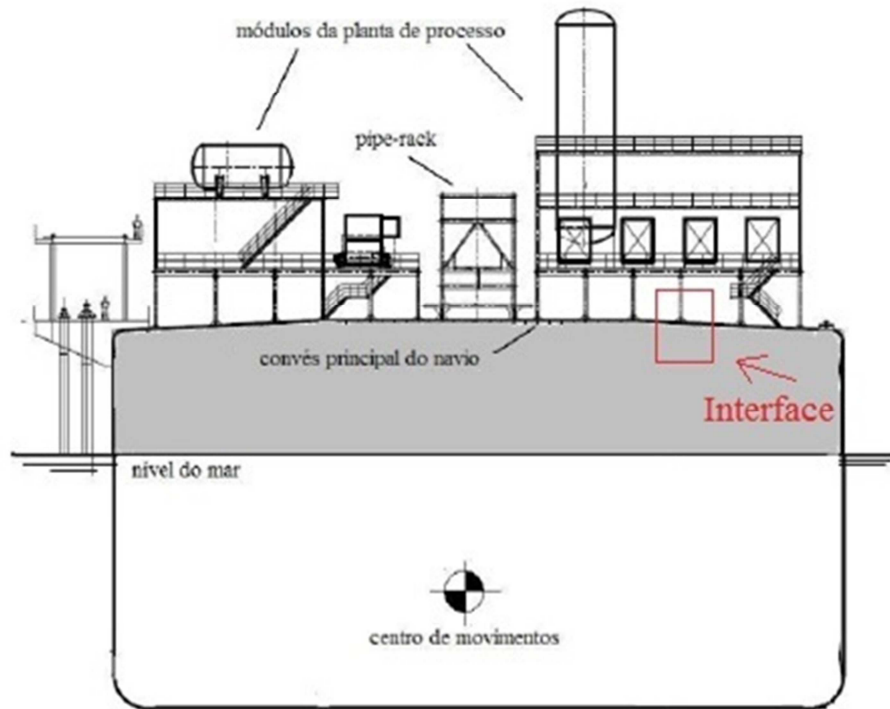


Figura 2 – Seção transversal típica de uma planta de processo de um FPSO (BATALHA, 2009).

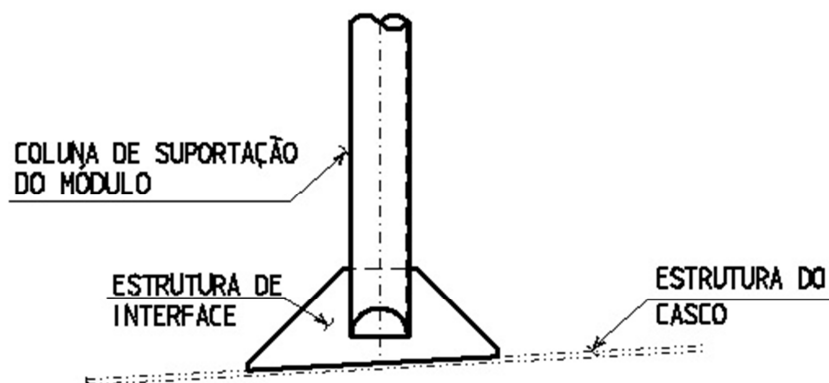


Figura 3 – Transição módulo/casco – Chapa gusset

1.2 MOTIVAÇÃO

O fenômeno da fadiga é responsável pela maioria dos problemas relacionados à integridade estrutural de membros solicitados por carregamentos cíclicos. Em estruturas oceânicas isto se torna relevante, devido às particularidades das cargas ambientais. As consequências de um colapso estrutural podem se tornar catastróficas, devido à imensa dificuldade de resgate, fato agravado por atividades exploratórias cada vez mais distantes da costa.

Além dos custos diretos envolvidos em prevenção e reparo de danos estruturais, a eventual necessidade de uma parada de produção pode gerar grandes prejuízos operacionais e, conseqüentemente, financeiros.

O emprego de aços especiais, de alta resistência, assim como a utilização de técnicas avançadas de dimensionamento, conduzem a estruturas cada vez mais esbeltas, requerendo maior atenção na prevenção dos problemas decorrentes do fenômeno de fadiga, pois a resistência à fadiga em juntas soldadas não acompanha o aumento na resistência última ou na tensão de escoamento do material.

O principal produto deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da vida à fadiga para os esforços de viga-navio. A região de estudo é a estrutura de transição (chapa “gusset”) entre o casco da embarcação e um módulo suportado segundo a concepção multicoluna, caracterizada pela transferência das cargas em diversos pontos, e não apenas através de 4 ou 6 colunas, conforme solução em “stools”. De uma maneira geral, os estudos de fadiga estocástica para módulos são realizados apenas para análise de movimentos da unidade, devido principalmente à implementação disponível nos programas de cálculo estrutural voltados para área “offshore”.

Outra questão abordada é a avaliação da diferença entre as respostas, à fadiga, para as Bacias de Campos e Santos. Esta comparação é motivada pela concentração de investimentos em exploração e produção de petróleo nos campos do pré-sal, localizados na Bacia de Santos.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO

No Capítulo 2, são introduzidos os conceitos relacionados aos processos aleatórios estacionários, ergódicos e gaussianos. Serão definidos os processos de banda estreita e banda larga, assim como a representação matemática no domínio do tempo a partir das séries de Fourier. É apresentada a relação entre a representação de uma realização de um processo aleatório no domínio do tempo e sua representação no domínio da frequência. São apresentados os conceitos de análise espectral, assim como a representação espectral de mares aleatórios.

No Capítulo 3, é apresentado o comportamento dinâmico de uma embarcação, conceituando a análise de movimentos e os esforços de viga-navio.

No Capítulo 4, serão introduzidos os conceitos básicos relacionados ao fenômeno da fadiga e a imprescindibilidade de sua consideração em projetos de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos. Será feita uma pequena introdução sobre indicadores de dano e regra de Palmgren-Miner juntamente com as curvas S-N para a obtenção do dano acumulado.

É apresentado o processo de geração de carregamentos devido às ondas – caracterizando o longo prazo como um conjunto de processos aleatórios de curto prazo – e sua aplicação ao cálculo de fadiga.

Será enfatizado o cálculo do dano acumulado baseado em métodos no domínio da frequência, apresentando suas limitações. Mostra-se um comentário sobre os métodos no domínio do tempo, que utilizam o histórico de tensão na estrutura aliado a algum método de contagem de ciclos para a estimativa do dano acumulado.

No Capítulo 5, é apresentada toda metodologia utilizada neste trabalho para obtenção da resposta da estrutura estudada aos carregamentos cíclicos. São apresentados os *softwares* utilizados e atuação de cada um.

No Capítulo 6, serão apresentados dois exemplos. No primeiro, será calculado o dano à fadiga considerando um diagrama de dispersão de ondas referente à Bacia de Campos. Para o segundo, o diagrama representará a Bacia de Santos.

No Capítulo 7, serão apresentadas as conclusões finais do trabalho e sugestões para temas futuros.

2 PROCESSOS ALEATÓRIOS E AÇÕES AMBIENTAIS

As principais ações ambientais consideradas no projeto de estruturas marítimas são causadas por efeitos como ondas, ventos e correntes. São de natureza cíclica e aleatória, sendo avaliadas através de estudos estatísticos.

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos necessários para o tratamento estatístico de um processo aleatório.

Um processo aleatório é um espaço de amostras em que cada elemento é associado a uma função do tempo. Da mesma forma que para uma variável aleatória o resultado de um experimento é mapeado em um número, em um processo aleatório cada resultado é associado a uma função do tempo.

2.1 CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Em um processo determinístico, podemos definir o valor exato de uma variável em qualquer instante de tempo. Por exemplo, a função $f(t) = 5\cos(3t)$. O valor da função é conhecido para todo “t”, conforme Figura 4.

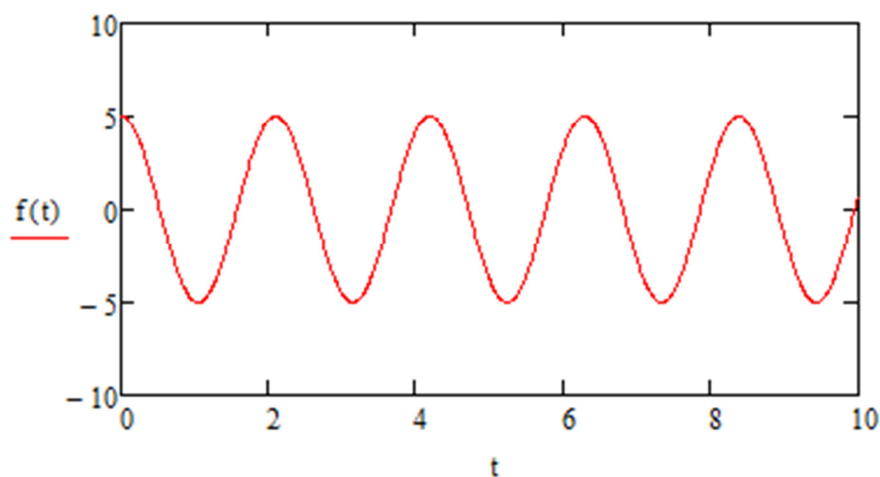


Figura 4 – Realização de um processo determinístico.

Já em um processo de natureza randômica, seu valor exato não pode ser calculado para um dado instante. Portanto, fenômenos deste tipo são caracterizados por processos aleatórios e devem ser descritos por seus parâmetros estatísticos. A Figura 5 ilustra tal comportamento.

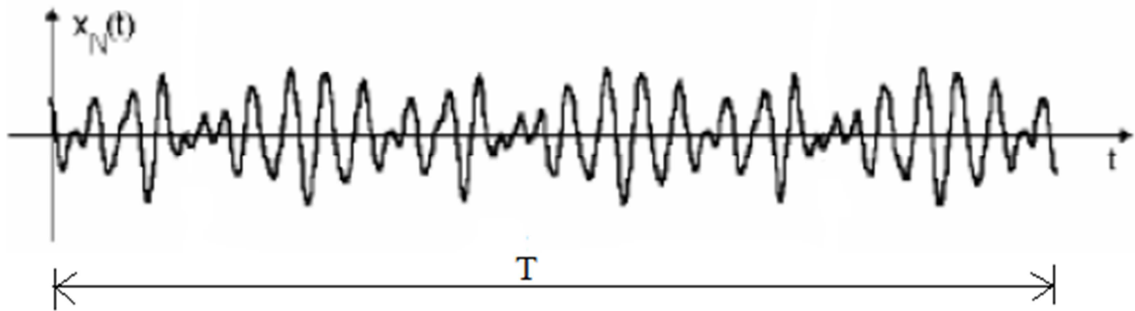


Figura 5 – Realização de um processo aleatório.

2.1.1 FUNÇÕES DE PROBABILIDADE

Os vários resultados de um fenômeno aleatório podem ser vistos como resultado de uma função caracterizada através de uma variável aleatória. Em um dado processo randômico, podemos observar as seguintes características para uma variável aleatória:

- A probabilidade de ocorrência está relacionada com a frequência de ocorrência do evento;
- A probabilidade de ocorrência está definida entre 0 e 1;
- A soma das probabilidades de todos os resultados possíveis é igual a 1.

A Função Densidade de Probabilidade (PDF, em Inglês) de um dado processo randômico pode ser definida como:

$$Prob[y \leq \mathbf{y}(t) \leq (\mathbf{y} + \Delta\mathbf{y})] = \int_{\mathbf{y}}^{\mathbf{y}+\Delta\mathbf{y}} \mathbf{p}(\mathbf{y})d\mathbf{y} \quad (\text{Equação 2. 1})$$

A área sob a curva da PDF é a probabilidade de ocorrência do valor de $y(t)$ no intervalo considerado na integração. Portanto, a área total sob a curva apresentada a seguir deverá ser igual a 1,0. A Figura 6 mostra uma curva típica desta função.

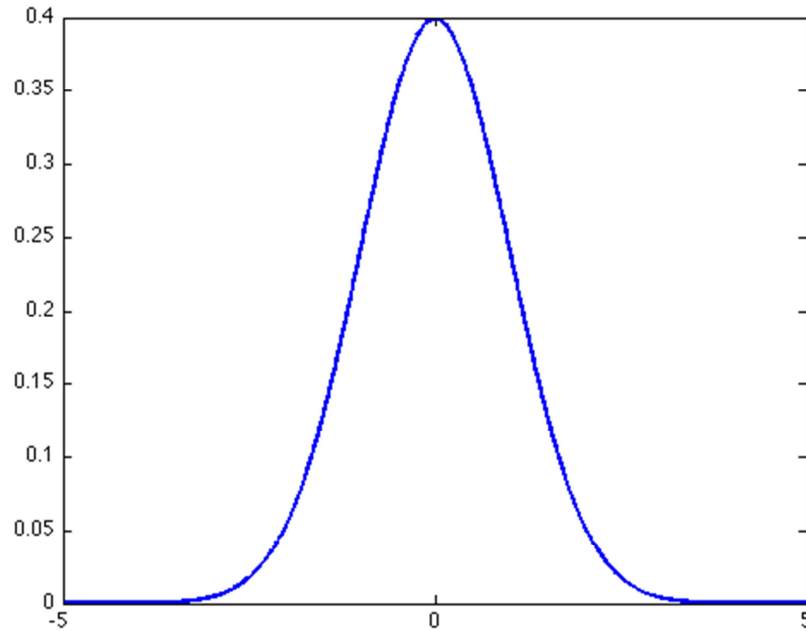


Figura 6 – Função Densidade de Probabilidade.

Associada à Função Densidade de Probabilidades, existe a Função Cumulativa de Probabilidades (CDF, em Inglês). Ela fornece a probabilidade de $y(t)$ ser menor ou igual a um dado valor de y e é definida como:

$$P(y) = Prob[y(t) \leq y]$$

$$P(y) = \int_{-\infty}^y p(y)dy \quad (\text{Equação 2. 2})$$

Uma função cumulativa de probabilidade deve satisfazer às seguintes relações:

$$P_y(-\infty) = 0$$

$$0 \leq P_y(y) \leq 1$$

$$P_y(\infty) = 1$$

A Figura 7 ilustra esta função.

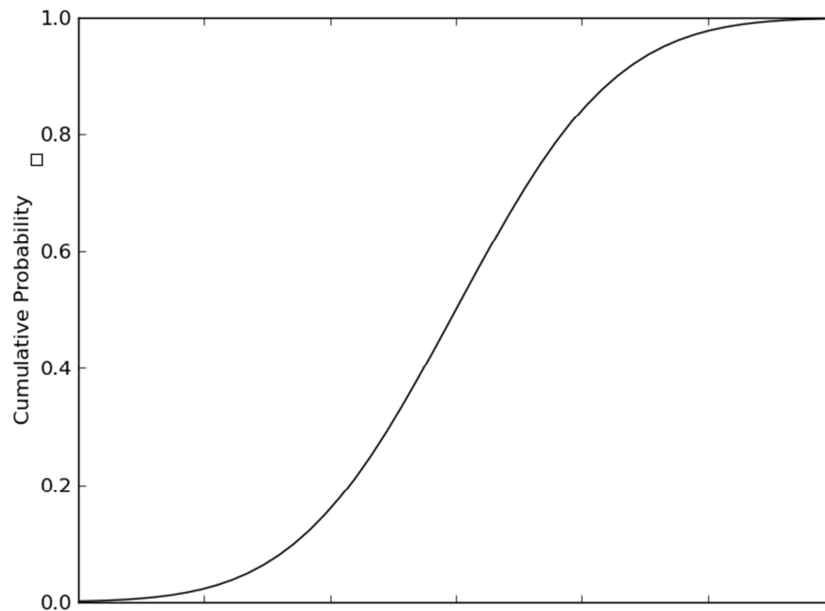


Figura 7 – Função Cumulativa de Probabilidades.

2.1.2 MEDIDAS DE UM PROCESSO ALEATÓRIO

Podemos obter diversas medidas de um processo aleatório. A mais simples é a **média ou valor esperado**, que consiste no valor de y correspondente ao centro de gravidade da função PDF que descreve $p(y)$.

É representada matematicamente por:

$$\mu(y) = E[y] = \bar{y} = \int_{-\infty}^{\infty} y * p(y) dy = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (\text{Equação 2. 3})$$

O **valor médio quadrático** representa a dispersão em torno do eixo $y = 0$ de uma variável aleatória e é dado por:

$$E(y^2) = \overline{y^2} = \int_{-\infty}^{\infty} y^2 * p(y) dy \quad (\text{Equação 2. 4})$$

A **variância mede** a dispersão dos valores da distribuição em torno do valor médio.

É igual ao valor médio quadrático menos o quadrado do valor médio:

$$VAR(y) = E(y^2) - (\bar{y})^2 \quad (\text{Equação 2. 5})$$

O **desvio padrão** é definido como a raiz quadrada da variância:

$$\sigma(y) = \sqrt{VAR(y)} \quad (\text{Equação 2. 6})$$

Dado um sinal em função do tempo, a **autocovariância** de um processo fornece uma medida direta da influência de um dado valor $y(t)$ sobre um valor futuro, denominado $y(t + \Delta t)$.

$$C_{yy}(\Delta t) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T y(t) * y(t + \Delta t) dt \right] - (\bar{y})^2 \quad (\text{Equação 2. 7})$$

- PROCESSOS ESTACIONÁRIOS

Digamos que a elevação de um dado ponto na superfície do mar $X(t)$ tenha sido observada durante diversos anos, e que o tempo inicial (t_0) de cada medição seja a hora zero de cada ano.

Se armazenarmos os valores deste processo, a cada ano, no mesmo instante ($t_0 + \Delta t$), e os parâmetros estatísticos da amostra não dependerem do incremento Δt , o processo é dito estacionário.

A Figura 8 ilustra este conceito.

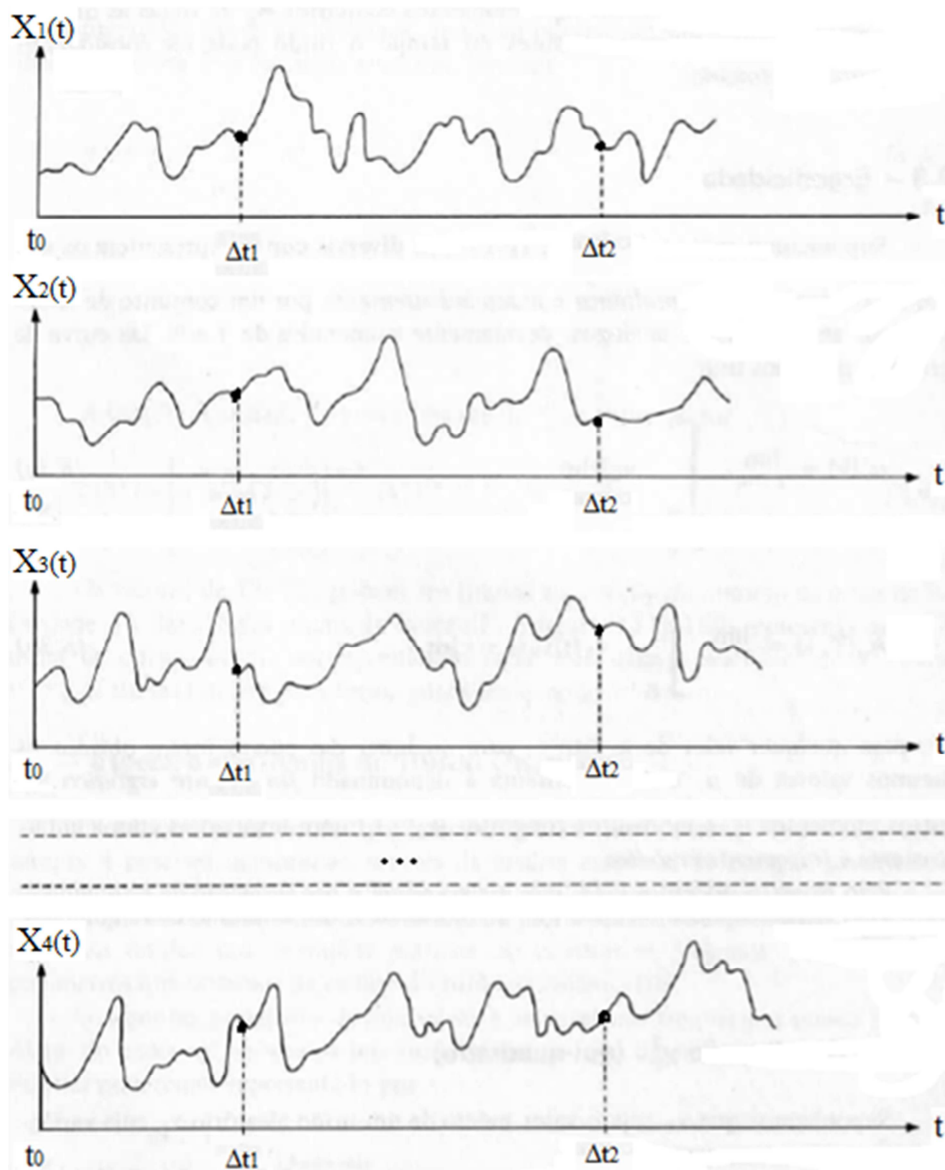


Figura 8 – Conjunto de observações de um processo aleatório.

As propriedades estatísticas valem, então:

$$E[X(t_o + \Delta t_1)] = E[X(t_o + \Delta t_2)] = E[X(t)] = \mu_X \quad (\text{Equação 2. 8})$$

$$VAR[X(t_o + \Delta t_1)] = VAR[X(t_o + \Delta t_2)] = VAR[X(t)] = \sigma_X^2 \quad (\text{Equação 2. 9})$$

- PROCESSOS ERGÓDIGOS

Um processo aleatório é dito ergódigo se, além de suas propriedades estatísticas serem as mesmas em qualquer instante de tempo (em infinitas realizações), elas forem iguais às propriedades estatísticas medidas ao longo do tempo e determinadas a partir de uma única realização.

Todo processo ergódigo e também estacionário, mas um processo estacionário nem sempre é ergódigo. Quando é possível assumir que um processo estacionário é ergódigo, o esforço necessário para descrevê-lo é drasticamente reduzido.

Neste caso, as propriedades estatísticas tornam-se propriedades temporais de uma única realização $x(t)$ e são redefinidas como:

$$E[X(t)] = E[x(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \mu \quad (\text{Equação 2.10})$$

$$E[X^2(t)] = E[x(t)^2] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (\text{Equação 2.11})$$

$$VAR[X(t)] = VAR[X(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu]^2 dt = E[x(t)^2] - \mu^2$$

(Equação 2.12)

A ergodicidade é um sinônimo de estabilidade probabilística de uma realização.

2.1.3 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES

Serão apresentados os dois tipos de distribuição das funções densidade de probabilidade que são utilizados neste trabalho.

- DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA

As funções densidade de probabilidade e cumulativa de probabilidades são apresentadas a seguir.

PDF

$$p(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (\text{Equação 2.13})$$

CDF

$$P(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp \left[-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2} \right] dy \quad (\text{Equação 2.14})$$

Cabe ressaltar que não há uma expressão analítica explícita para a função cumulativa, que deve ser avaliada via integração numérica.

Este tipo de distribuição torna-se importante para o presente trabalho, pois podemos assumir que a elevação da superfície do mar, numa dada locação do oceano, é um processo ergódico gaussiano com média zero, conforme a Figura 9.

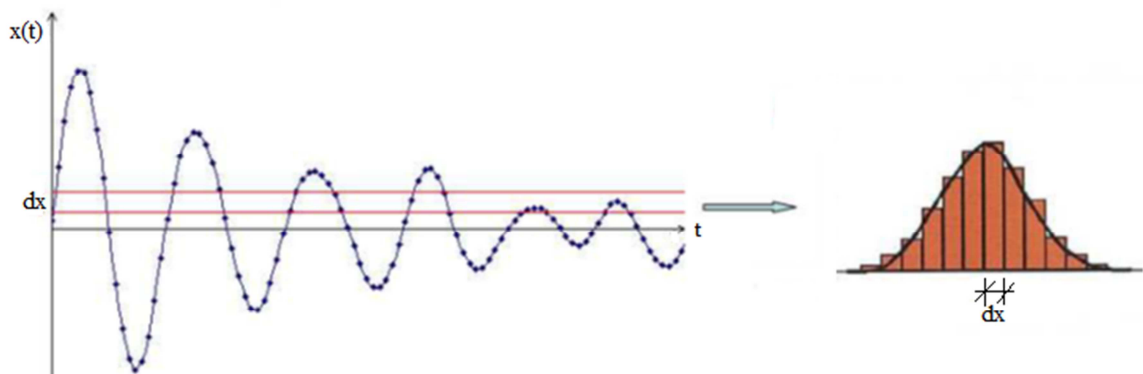


Figura 9 – Distribuição de probabilidades de um processo ergódico.

- DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH

No projeto de estruturas marítimas, é de suma importância conhecer a distribuição dos valores máximos (ou picos) de um processo aleatório que caracteriza o comportamento do mar, por exemplo. A Figura 10 ilustra uma distribuição e sua respectiva função densidade de probabilidade.

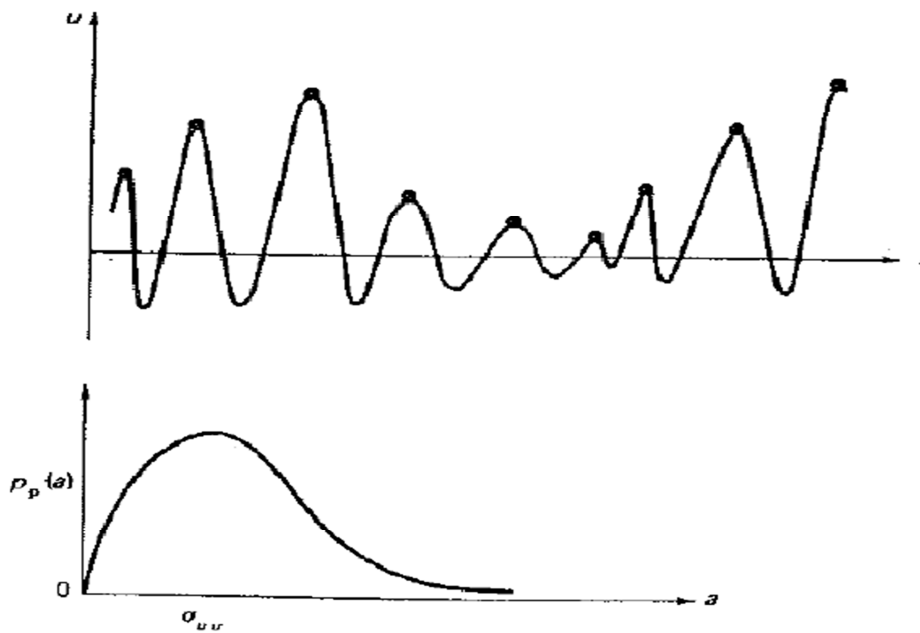


Figura 10 – Picos de um processo aleatório e sua função densidade de probabilidade.

Para um processo Gaussiano com média zero e banda estreita, a distribuição dos máximos segue aproximadamente a distribuição de Rayleigh.

As funções densidade de probabilidade e cumulativa de probabilidades são apresentadas a seguir.

PDF

$$p(y) = \frac{y}{\sigma_y^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (\text{Equação 2.15})$$

CDF

$$P(y) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (\text{Equação 2.16})$$

2.2 ANÁLISE ESPECTRAL

2.2.1 REPRESENTAÇÃO POR SÉRIES DE FOURIER

A representação de um espectro geralmente é dada da seguinte forma: a ordenada é composta por valores de energia ou densidade de energia e a abscissa é expressa em termos de frequência, que pode ser cíclica (Δf em ciclos/s) ou circular ($\Delta\omega$ em rad/s). A densidade de energia é obtida através da divisão do valor da ordenada de energia pelo incremento de frequência (Δf ou $\Delta\omega$).

A vantagem da representação do espectro em termos de densidade de energia é que a área sob a curva resulta na energia total do sistema. Por este motivo, essa representação é a mais encontrada na bibliografia.

Um processo randômico, como a representação das elevações de ondas do mar $x(t)$, por exemplo, pode ser representado por uma série de funções em senos e cossenos.

A série de Fourier é uma ferramenta bastante útil para vários problemas nas áreas de matemática, ciências e engenharia. Um sinal $x(t)$, com média zero, é expresso através de uma série de Fourier por:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (\text{Equação 2.17})$$

Onde:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (\text{Equação 2.18})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (\text{Equação 2.19})$$

O parâmetro T representa o período da série de Fourier (intervalo de integração) e n é o número dos pontos de integração, definido pela discretização do problema.

Podemos observar que um sinal contínuo no tempo pode ser adequadamente processado por um sistema que opera em tempo discreto, desde que a taxa de amostragem seja suficientemente grande para representar bem o sinal temporal $x(t)$. Ou seja, o intervalo entre as medições Δt deve ser suficientemente pequeno, conforme a Figura 11.

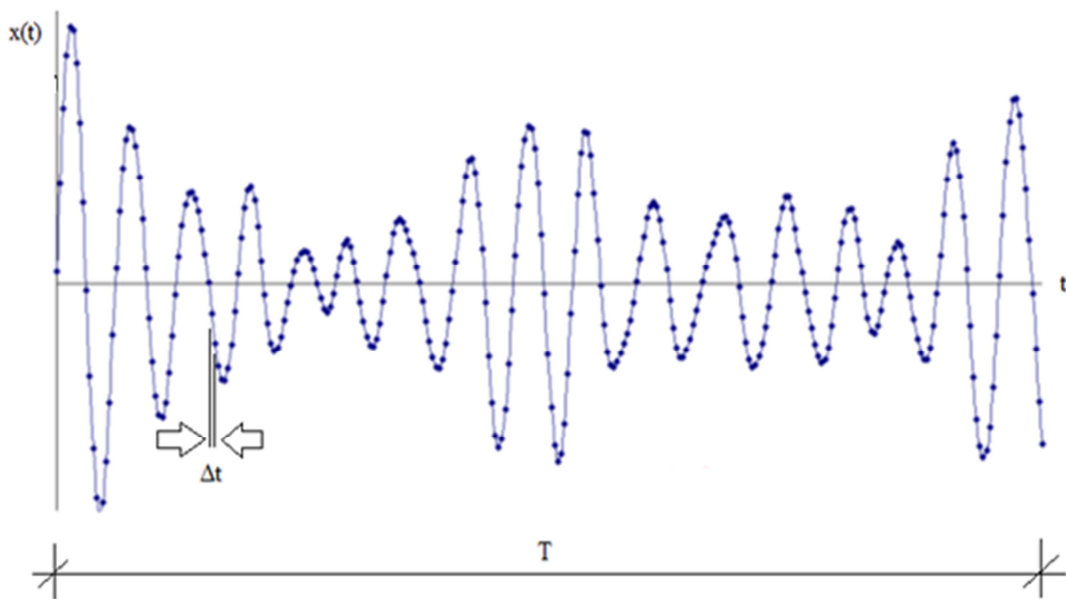


Figura 11 – Representação de um sinal (tempo contínuo x tempo discreto).

Utilizando a conhecida identidade trigonométrica para somarmos dois harmônicos de mesma frequência:

$$a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) = C \cos \theta \cos(\omega t) - C \sin \theta \sin(\omega t) = C \cos(\omega t + \theta)$$

Onde:

$$a = C \cos \theta$$

$$b = -C \sin \theta$$

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-b}{a}\right)$$

Podemos agora reescrever a série de Fourier em sua forma trigonométrica compacta, e a equação 2.17 torna-se:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (\text{Equação 2.20})$$

Sendo $\omega_n = n\omega_0$

Onde:

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{Equação 2.21})$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{-b_n}{a_n}\right) \quad (\text{Equação 2.22})$$

A frequência ω_0 é chamada de fundamental circular e é dada por:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Uma propriedade muito importante das séries de Fourier é que elas representam bem o sinal temporal contínuo no intervalo $[0, T]$, mas fora desse intervalo elas são periódicas e de período T , enquanto que se continuássemos a medir uma realização física de um processo aleatório qualquer além do período T ele nunca se repetiria. Para provarmos isso basta provarmos que numa série de Fourier $x(t) = x(t + T)$.

$$\begin{aligned} x(t + T) &= \sum_{n=1}^N \{a_n \cos[n\omega_0(t + T)] + b_n \sin[n\omega_0(t + T)]\} \\ &= \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega_0 t + n\omega_0 T) + b_n \sin(n\omega_0 t + n\omega_0 T)] \end{aligned}$$

Sabemos que $T\omega_n = 2\pi$, então, $n\omega_0 T = 2\pi \quad \forall n = 1, 2, 3, \dots$, logo:

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega_0 t + 2\pi) + b_n \sin(n\omega_0 t + 2\pi)] \\
&= \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \\
&= x(t)
\end{aligned}$$

Podemos fazer a seguinte interpretação: em um período fundamental T , o harmônico de ordem n executa n ciclos completos. Portanto, para $t = T$, todo harmônico começa como se estivesse na origem e repete a mesma sequência durante os próximos T segundos e assim por diante. Logo, a soma de todos os harmônicos resulta em um sinal periódico de período T .

- RELAÇÃO ENTRE O DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Pelo teorema de Parseval (SAGRILO e ELLWANGER, 2008), a energia média de um sinal periódico é igual à soma das energias de suas componentes de Fourier. Sabendo que a energia média ou potência de um sinal é dada pela expressão:

$$P_X = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (\text{Equação 2.23})$$

Aplicando a integral acima a um sinal com o formato dado pela (Equação 2.20), temos como resultado:

$$P_X = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N C_n^2 = \sum_{n=1}^N \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} \quad (\text{Equação 2.24})$$

Como a integral da (Equação 2.23) é exatamente a definição da média quadrática de $x(t)$, então:

$$E[x(t)^2] = \sum_{n=1}^N \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} \quad (\text{Equação 2.25})$$

O teorema de Wiener-Khintchine (LIN, 1967) constrói a ponte entre um sinal no domínio do tempo e sua representação no domínio da frequência. Ele estabelece a seguinte relação para a função de autocovariância do processo:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega\tau) Sp(\omega) d\omega \quad (\text{Equação 2.26})$$

Onde $Sp(\omega)$ é chamada densidade espectral de $x(t)$.

Fazendo $\tau = 0$, temos:

$$R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} Sp(\omega) d\omega \quad (\text{Equação 2.27})$$

Mas $R(0) = E[x(t)^2]$, então, reescrevendo o lado direito da equação como uma somatória e nos aproveitando do teorema de Parseval, temos:

$$\sum_{n=1}^N \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} = \sum_{n=1}^N Sp(n\omega_0) \Delta\omega \quad (\text{Equação 2.28})$$

A partir da relação da equação anterior e com $\omega_n = n\omega_0$, podemos reescrever:

$$Sp(\omega_n) = \frac{a_n^2 + b_n^2}{2\Delta\omega} \quad (\text{Equação 2.29})$$

A fórmula acima relaciona o espectro de $x(t)$ com suas componentes da série de Fourier. Se escrevermos a parte direita da equação 2.29 em termos da forma compacta da série de Fourier teremos:

$$Sp(\omega_n) = \frac{C_n^2}{2\Delta\omega} \quad \text{ou} \quad C_n = \sqrt{2\Delta\omega * Sp(\omega_n)} \quad (\text{Equação 2.30})$$

Onde C_n é a amplitude do harmônico de frequência ω_n .

A equação 2.30 estabelece uma relação entre a contribuição para a energia total do espectro pelo harmônico de frequência ω_n e a sua amplitude (ver Figura 12), definindo uma forma bastante eficiente de passarmos um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa.

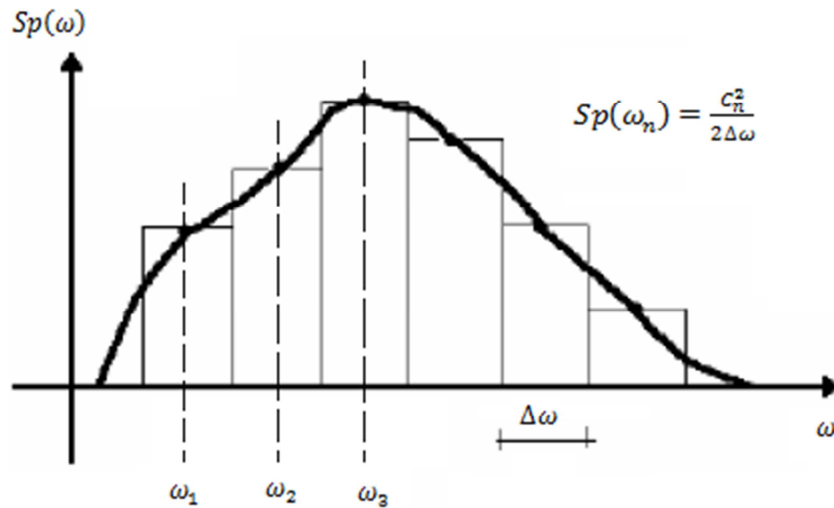


Figura 12 – Harmônicos e energias associadas.

2.2.2 MOMENTOS ESPECTRAIS

Nos itens anteriores, foram definidos os principais parâmetros estatísticos de um processo aleatório.

Usualmente, estes parâmetros podem ser determinados em função dos momentos espectrais, que são momentos de área do espectro em relação à linha de frequência zero.

O n-ésimo momento de $S(\omega)$ é dado por:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n * S(\omega) d\omega \quad (\text{Equação 2.31})$$

Os momentos espectrais mais utilizados são m_0, m_1, m_2 e m_4 , pois eles definem as seguintes características de um sinal no domínio do tempo (PRICE, 1974):

m_0 = variância da distribuição de picos

$\frac{m_0}{m_1}$ = período médio do sinal

$\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$ = período médio de cruzamento "zero ascendente", denominado T_z

$$\sqrt{\frac{m_2}{m_4}} = \text{período médio entre máximos, denominado } T_c$$

2.2.3 LARGURA DE BANDA DE UM PROCESSO ALEATÓRIO

Os momentos espectrais também são utilizados para definir a largura de banda de um processo (PRICE, 1974), através do indicador parâmetro de banda, ε .

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(m_0 * m_4 - m_2^2)}{(m_0 * m_4)}} \quad ; \text{ onde } \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad \text{(Equação 2.32)}$$

Quando a energia de um espectro está concentrada em um pequeno intervalo de frequências, dizemos que este espectro é de banda estreita (ver Figura 13). Caso contrário é de banda larga (ver Figura 14).

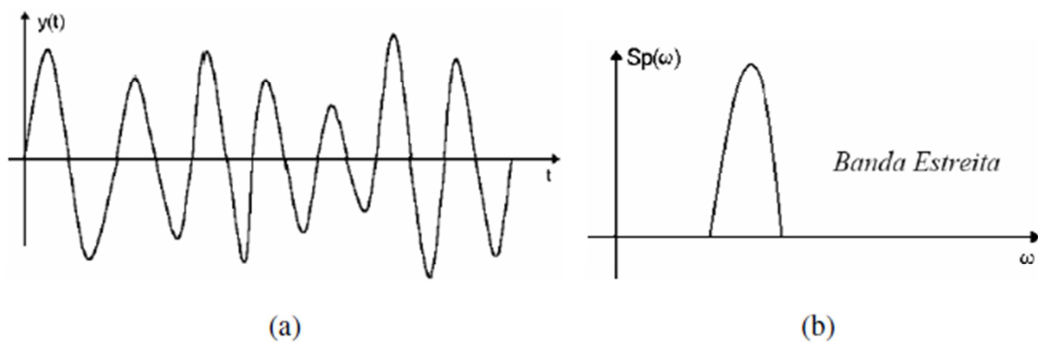


Figura 13 – Processo de banda estreita: (a) sinal no tempo; (b) densidade espectral.

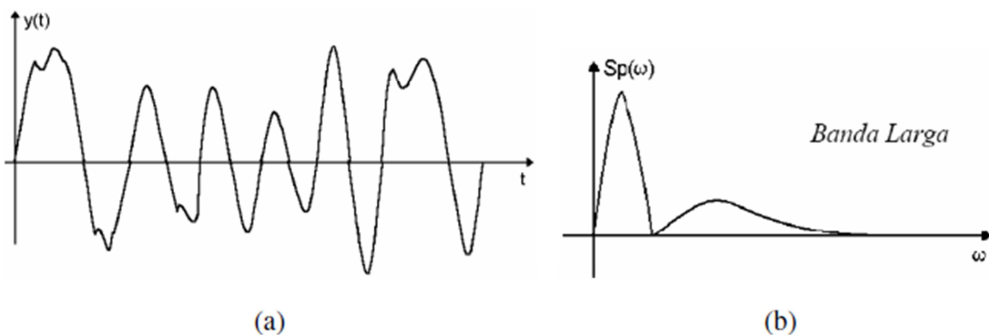


Figura 14 – Processo de banda larga: (a) sinal no tempo; (b) densidade espectral.

É importante mencionar que o processo de banda estreita possui, de maneira geral, apenas um máximo para cada período de cruzamento “zero ascendente”.

2.3 REPRESENTAÇÃO ESPECTRAL DE MARES ALEATÓRIOS

Neste item, serão determinadas as propriedades estatísticas aplicadas à teoria de ondas, com base nos conceitos apresentados anteriormente. O comportamento real das ondas do mar constitui um processo aleatório, ilustrado pela Figura 15.

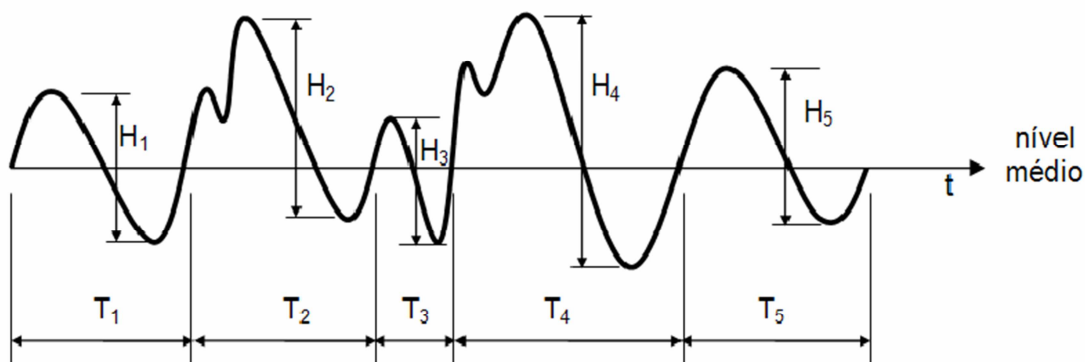


Figura 15 – Registro de onda irregular (BATALHA, 2009).

No registro da Figura 15, os valores T_1 a T_5 são referentes a períodos de cruzamento zero ascendente de ondas individuais, e H_1 a H_5 são as respectivas alturas de onda, que são definidas como sendo a diferença entre as elevações máximas e mínimas para um dado período de cruzamento.

Como visto anteriormente, processos estacionários ergódigos são aqueles onde as propriedades estatísticas são constantes ao longo do tempo.

Analisando um registro das elevações do mar, há variações destas propriedades para períodos superiores a poucas horas. Entretanto, podemos dividir este processo infinito em segmentos de poucas horas, onde estas medidas estatísticas permanecem constantes. Estes períodos são denominados estados-de-mar e, geralmente, sua duração é definida como 3 horas.

É importante ressaltar que são feitas medições, através de bóias oceanográficas ou outros métodos, durante aproximadamente 20 minutos, tempo considerado suficiente para representar estas 3 horas.

Um estado de mar é representado basicamente por dois parâmetros: altura significativa de onda, H_S , e período médio de cruzamento “zero ascendente”, T_z (ou alternativamente período de pico, T_p). Estes parâmetros podem ser calculados a partir do registro de elevações de um determinado ponto no oceano, exceto T_p , calculado somente via espectro, e representa o período associado ao pico do espectro de energia.

2.3.1 ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA

A altura significativa é tida como a média das alturas do terço superior das ondas.

Em uma análise espectral, é relacionada com a energia total contida no espectro de mar. Se m_0 é a área total do espectro de densidade de energia, então:

$$H_S = 4\sqrt{m_0} \quad (\text{Equação 2.33})$$

Lembrando que esta expressão é válida para um processo Gaussiano de banda estreita.

2.3.2 PERÍODOS MÉDIOS

Conforme visto anteriormente (item 2.2.2), os períodos médios podem ser obtidos a partir dos momentos espectrais.

Quando obtidos a partir de um determinado sinal, são calculados da seguinte forma:

$$T_z = \frac{T_T}{N_z} \quad (\text{Equação 2.34})$$

$$T_c = \frac{T_T}{N_c} \quad (\text{Equação 2.35})$$

Onde:

T_T é o tempo total do registro;

N_z é a quantidade contabilizada de cruzamentos “zero ascendentes”;

N_c é a quantidade contabilizada de máximos.

A convergência nos valores de T_c e T_z determina a largura de banda de um espectro de mar. Se o valor de T_c se aproxima do valor de T_z , isto significa que a maioria das ondas individuais do processo cruza o nível médio do mar. Neste caso, o espectro de mar é considerado como de banda estreita (CHAKRABARTI, 1987).

2.3.3 FORMULAÇÕES PARA O MODELO ESPECTRAL

A Figura 12 mostra a construção, através de um modelo discreto, de um espectro de energia a partir dos diversos harmônicos que compõem o sinal.

Como, na prática, há um grande número de frequências presentes em um sinal, é mais conveniente trabalhar com um espectro representado por uma função contínua.

Este item tratará das duas principais formulações.

- ESPECTRO DE PIERSON-MOSKOWITZ

O modelo espectral de proposto por PIERSON-MOSKOWITZ (1964) é descrito, em função de H_S e T_p , da seguinte forma:

$$S(\omega) = \frac{5}{32\pi} H_S^2 T_p \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \exp\left[\frac{-5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \quad (\text{Equação 2.36})$$

- ESPECTRO DE JONSWAP

O espectro de JONSWAP (JOint North Sea Wave Project) resultou originalmente de um JIP executado no Mar do Norte, onde foram posicionadas estações de medição na costa da Alemanha.

Esta formulação possui a expressão a seguir, onde os parâmetros são ajustados em função da locação de estudo.

$$S(\omega) = \frac{5}{32\pi} H_S^2 T_p \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \exp\left[\frac{-5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] (1 - 0,287 \ln \gamma) \gamma^a \quad (\text{Equação 2.37})$$

Onde:

$$a = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right]$$

$$\sigma = 0,07 \text{ para } \omega \leq \omega_p$$

$$\sigma = 0,09 \text{ para } \omega > \omega_p$$

$$\gamma = \text{parâmetro de forma do pico} = 6,4 \times T_p^{-0,491}$$

$$\omega_p = \text{frequência de pico do espectro} = \frac{2\pi}{T_p}$$

Cabe ressaltar que a formulação de Pierson-Moskowitz é um caso particular de JONSWAP para $\gamma = 1$.

2.3.4 DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE ONDAS

A análise de fadiga espectral requer um grande número de medições de estados-de-mar.

Este conjunto de dados pode ser apresentado por diagramas de dispersão ou, após tratamento matemático, por distribuição conjunta de probabilidades de H_S e T_z (ou T_p).

As tabelas 1 e 2 ilustram uma forma de apresentação de um diagrama de dispersão.

No capítulo 6, são apresentados os diagramas utilizados neste trabalho, referentes às Bacias de Campos e Santos.

Tabela 1 – Diagrama de dispersão $H_S \times T_p$ (BATALHA, 2009).

T_p (seg)		Número de Ocorrências por Período de Pico Espectral																	TOTAL
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
H_s (m)		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0,0	0,5	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0,5	1,0	0	20	25	59	87	41	18	13	14	7	3	5	1	0	0	0	0	293
1,0	1,5	1	157	431	541	725	469	247	224	197	83	18	13	12	3	4	0	0	3125
1,5	2,0	0	62	681	964	811	678	460	377	317	189	83	36	16	8	14	0	0	4696
2,0	2,5	0	1	169	565	565	431	343	282	300	209	89	33	16	13	6	1	0	3023
2,5	3,0	0	0	12	167	293	201	165	180	186	148	73	32	14	6	8	0	0	1485
3,0	3,5	0	0	1	28	88	87	71	73	102	73	35	22	15	3	5	1	0	604
3,5	4,0	0	0	0	0	14	22	26	32	41	44	20	12	9	2	2	0	0	224
4,0	4,5	0	0	0	0	0	4	12	17	13	22	14	10	5	1	1	0	0	99
4,5	5,0	0	0	0	0	0	0	2	7	4	9	8	4	5	0	0	0	0	39
5,0	5,5	0	0	0	0	0	0	1	1	3	1	4	2	1	0	0	0	0	13
5,5	6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
6,0	6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
TOTAL		1	240	1320	2324	2583	1934	1345	1206	1178	786	350	169	94	36	40	2	0	13608

Tabela 2 – Diagrama de dispersão H_S x direção de incidência (BATALHA, 2009).

Direção Hs (m)		Número de Ocorrências por Direção de Incidência de Ondas								TOTAL
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0,0	0,5	1	0	0	0	2	0	0	0	3
0,5	1,0	16	84	72	57	50	10	3	1	293
1,0	1,5	276	922	681	504	574	142	14	12	3125
1,5	2,0	502	1368	849	626	981	335	31	4	4696
2,0	2,5	377	658	481	387	732	378	8	2	3023
2,5	3,0	146	237	207	265	374	255	0	1	1485
3,0	3,5	53	52	56	111	162	170	0	0	604
3,5	4,0	7	10	10	37	69	91	0	0	224
4,0	4,5	0	1	0	12	34	52	0	0	99
4,5	5,0	0	0	0	2	13	24	0	0	39
5,0	5,5	0	0	0	1	4	8	0	0	13
5,5	6,0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
6,0	6,5	0	0	0	0	0	2	0	0	2
TOTAL		1378	3332	2356	2002	2996	1468	56	20	13608

As direções de incidência de ondas da Tabela 2 são relativas a um sistema global fixo, portanto devem ser associadas à direção de aproamento da unidade.

3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE EMBARCAÇÕES

Neste capítulo, serão estudados os principais efeitos gerados pela incidência de ondas sobre um FPSO.

Como o foco desta dissertação são esforços seccionais de viga-navio, no próximo item será introduzido, superficialmente, o conceito das forças inerciais decorrentes da análise de movimentos.

3.1 MOVIMENTOS, ACELERAÇÕES E FORÇAS INERCIAIS

O FPSO apresenta movimento de copo rígido quando sofre incidência das ondas.

Portanto, a unidade flutuante pode apresentar seis tipos de movimentos oscilatórios diferentes (ver Figura 16), sendo eles:

- **SURGE**: movimento de translação que não provoca mudança no plano de flutuação do navio. Corresponde ao deslocamento longitudinal do casco.
- **SWAY**: assim como no “surge”, o navio mantém seu plano de flutuação. Corresponde ao movimento de translação na direção transversal.
- **HEAVE**: movimento de translação vertical que provoca uma mudança do volume de deslocamento. O navio perde seu plano de flutuação, reconstituído por ação da gravidade.
- **YAW**: movimento de rotação em torno do eixo vertical. Não provoca mudança no plano de flutuação da embarcação.
- **PITCH**: movimento de rotação em torno do eixo transversal. Provoca variações na distribuição do volume submerso.

- ROLL: movimento de rotação em torno do eixo longitudinal. Assim como o movimento de pitch, provoca variações na distribuição do volume submerso.

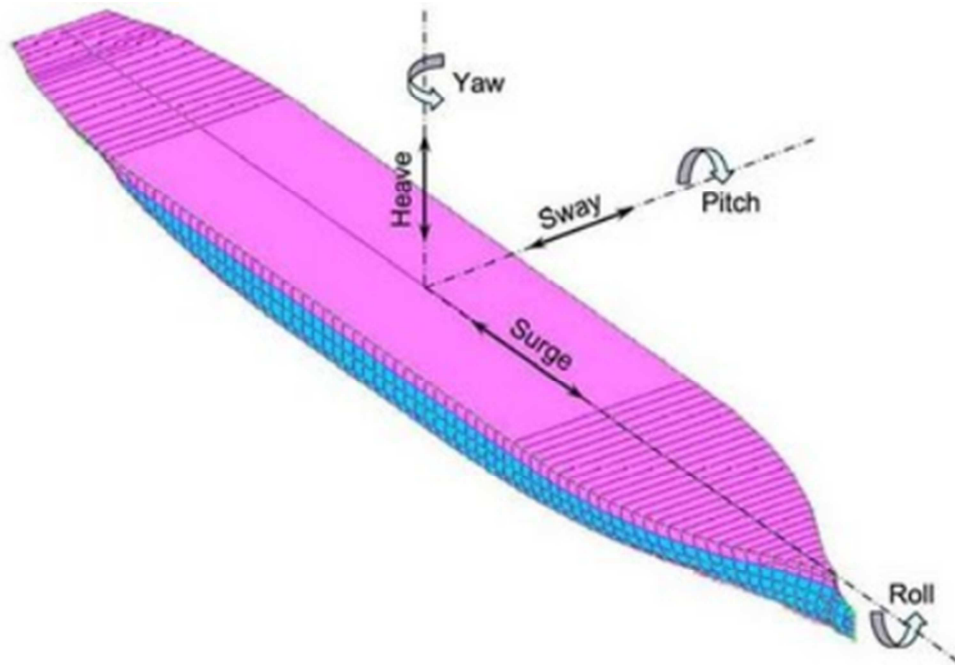


Figura 16 – Graus de liberdade de um FPSO.

O princípio D'Alembert estabelece que o equilíbrio dinâmico de um sistema pode ser obtido adicionando-se às forças externas aplicadas uma força fictícia, chamada de força de inércia, proporcional à aceleração e com sentido contrário a ela, sendo a constante de proporcionalidade igual à massa do sistema (PAZ, 1997).

As equações do movimento e acelerações da unidade são determinadas em termos de amplitude e fase, para cada um dos seis graus de liberdade, em função das seguintes condições:

- Posição do centro do movimento (variando de acordo com o calado);
- Ângulo de incidência das ondas;
- Frequência das ondas.

Apesar de um navio realizar todos os seis movimentos simultaneamente, geralmente, com a hipótese de pequenas rotações, eles são considerados isoladamente, caracterizando uma análise desacoplada, mas com as fases relativas levadas em conta.

3.2 ESFORÇOS SECCIONAIS DE VIGA-NAVIO

É dado o nome de viga-navio à idealização do casco do navio, com seus reforços longitudinais, como uma viga, a fim de determinar a sua resistência estrutural aos esforços que nele atuam, provenientes da distribuição de seu peso/carga e da ação do meio em que flutua.

As figuras 17 e 18 ilustram situações de deformação do casco em função da passagem de uma onda, caracterizando as situações conhecidas como *sagging* e *hogging*.

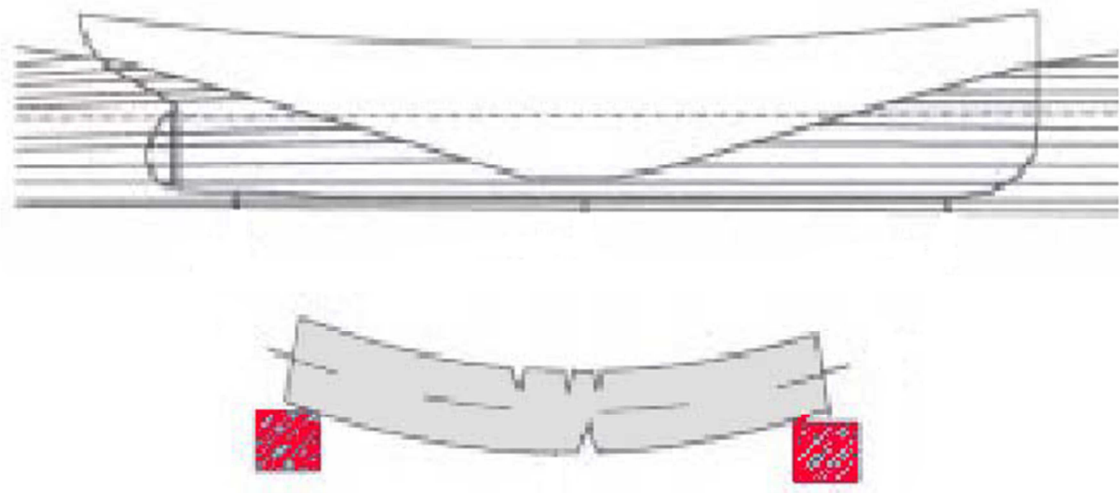


Figura 17 – Deformada do casco, condição *sagging*.

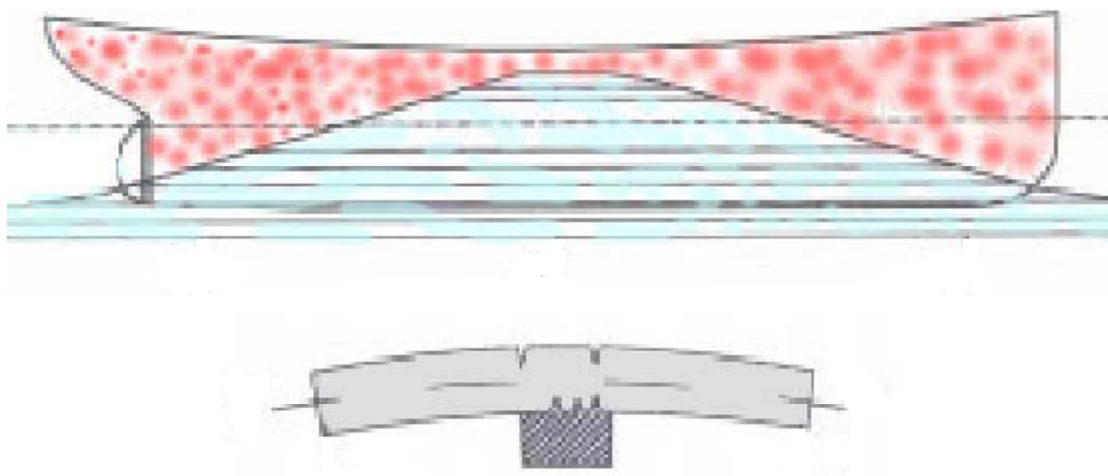


Figura 18 – Deformada do casco, condição *hogging*.

Dos esforços de viga-navio, destacam-se os momentos fletores vertical (denominado VWBM) e horizontal (denominado HWBM), utilizados na análise de fadiga presente nesta dissertação e indicados na Figura 19.

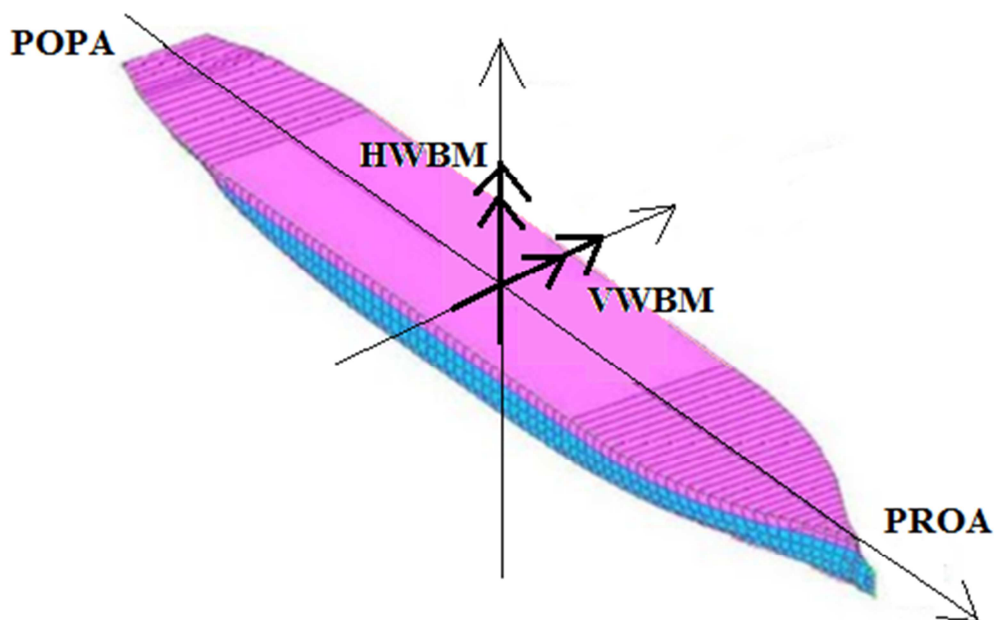


Figura 19 – Representação dos esforços seccionais M_v e M_h .

Cabe ressaltar que, mesmo na ausência de ondas, o FPSO está submetido a um grande momento fletor vertical, conhecido como “*still water bending moment, SWBM*”, ocasionado pela distribuição não uniforme das cargas ao longo do navio.

Apesar de representar uma solicitação de baixo ciclo (da ordem de uma semana), associada principalmente aos níveis de utilização dos tanques, possui uma grande variação de tensões, podendo contribuir para o dano por fadiga.

3.3 FUNÇÕES DE TRANSFERENCIA (RAO)

Nos itens anteriores, foram apresentados os diferentes tipos de comportamento de um navio submetido à ação de ondas.

A amplitude da resposta dinâmica de uma unidade flutuante, seja ela referente à análise de movimentos ou de esforços seccionais, geralmente é normalizada com relação à amplitude da onda. Se uma função desta resposta dinâmica for construída a partir de um intervalo de frequências de interesse, então esta é chamada de “*Response-Amplitude Operator*” (RAO) ou Função de Transferência (CHAKRABARTI, 1987).

3.3.1 GERAÇÃO DOS RAO’S DE ESFORÇOS SECCIONAIS

Quando computados os RAO’s, as ondas são consideradas regulares e o intervalo de frequências é discretizado de tal forma que a função de transferência seja gerada para o intervalo de frequências com respostas dinâmicas relevantes para o problema.

Neste trabalho, os RAO’s de esforços seccionais foram gerados com a utilização do programa WADAM do Sistema SESAM e serão apresentados no capítulo 6.

3.3.2 GERAÇÃO DOS RAO'S DE TENSÃO DA ESTRUTURA

A partir dos RAO's de esforços seccionais de viga-navio, são gerados os RAO's de tensão em um determinado ponto de estudo, constituindo uma etapa importante deste trabalho. O capítulo 5 foi destinado a detalhar esse processo.

4 ANÁLISE DE FADIGA

Fadiga é um fenômeno caracterizado pela atuação de cargas dinâmicas de natureza cíclica em um material, podendo levá-lo à falha pelo processo de acúmulo de danos, mesmo sendo submetido a uma tensão inferior à de escoamento.

O problema surge devido ao aparecimento de pequenas trincas. Caso não haja intervenção, estes defeitos podem se propagar levando à ruptura da estrutura.

A importância de se estimar a vida à fadiga na fase de projeto é ressaltada para que possamos obter soluções estruturais viáveis do ponto de vista técnico e econômico, considerando a vida útil do empreendimento. A necessidade de inspeções durante a operação da unidade é função direta das estimativas da vida à fadiga para os diversos pontos da estrutura. Além disso, durante a fase de projeto, deve-se sempre buscar uma concepção estrutural que prolongue ao máximo a vida à fadiga, visto que otimizar o projeto é muito mais barato do que efetuar reparos devido à iniciação de trincas de fadiga posteriores ao início de operação da unidade.

A análise de fadiga em estruturas soldadas é baseada em curvas de amplitude constante de tensão por número de ciclos até a falha, conhecidas como curvas S-N, apresentadas no item 4.2.

4.1 REGRA DE PALMGREN-MINER

Devido à fadiga ser um processo de alteração estrutural permanente e progressivo, torna-se necessária a introdução do conceito do acúmulo de dano.

Segundo a Regra de Palmgren-Miner (MINER, 1945), o dano total, ou dano acumulado devido à fadiga, é a soma linear dos danos parciais, gerados por cada um dos intervalos de ciclos de carga. Pelo método, um ciclo de carga é representado através da variação de tensão causada em um dado ponto da estrutura e o dano total é definido por:

$$D = \sum_{i=1}^J d_i = \sum_{i=1}^J \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{Equação 4. 1})$$

Onde:

- d_i = dano associado a uma certa amplitude de variação de tensão $\Delta\sigma_i$
- n_i = número de ciclos associados a $\Delta\sigma_i$
- N_i = número de ciclos que levaria à falha estrutural devido a $\Delta\sigma_i$
- J = número de intervalos de variação de tensão

Em princípio, assume-se que a falha por fadiga ocorra para $D=1$.

Entretanto, em um histórico estocástico de tensões, como o dano em um ciclo depende também dos ciclos anteriores, observa-se que a estrutura pode falhar com um dano acumulado menor que 1 pela soma de Miner, que não leva em conta a interação entre ciclos (ALMAR-NAESS, 1985).

Assim, a partir da média de testes recomenda-se trabalhar no projeto com um valor limite de 0,5, apesar de algumas normas admitirem a soma unitária para caracterizar a falha.

Além disso, o fator de segurança pode ser ainda maior, como será mostrado no item 4.6.

4.2 CURVAS S-N

As normas utilizadas atualmente para projeto de estruturas “offshore” apresentam uma série de curvas S-N para detalhes típicos encontrados nas mais diversas situações, e indicam o número de ciclos admissíveis para uma determinada variação de tensões, conforme Figura 20.

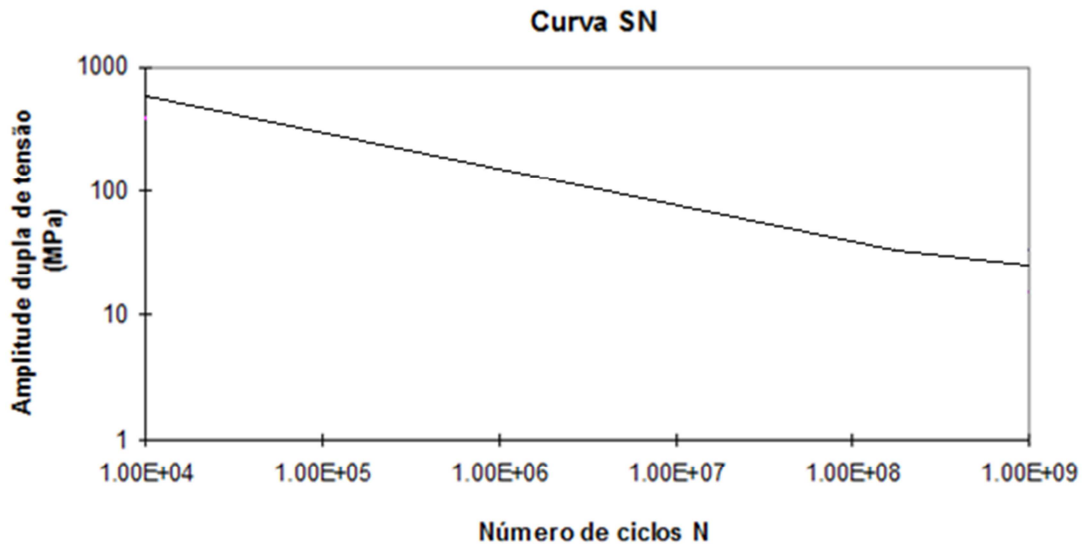


Figura 20 – Exemplo de curva SN.

A classificação para estas curvas se dá em função de diversos fatores, tais como:

- A geometria do detalhe ou junta de conexão;
- Direção de aplicação da variação de tensões;
- Método de execução e nível de inspeção do detalhe;
- Ambiente onde estará a estrutura (no ar, na água);
- Presença de proteção anti-corrosão (proteção catódica);
- Tipo de solda (penetração total, parcial, filete, etc.), dentre outros fatores.

Seus dados são derivados normalmente de testes de várias amostras em condições controladas, onde são ensaiadas através de tensões cíclicas de amplitude constante até a falha.

Vários testes são realizados em amostras idênticas com diferentes amplitudes para que se possa obter a curva (ver Figura 21).

Nota-se que, quando os resultados experimentais são apresentados em escala logarítmica, os dados tendem a se ajustar a uma reta, sendo amplamente utilizado o modelo linear abaixo:

$$\log(N) = \log(a) - m \log(\Delta\sigma) \quad (\text{Equação 4. 2})$$

Onde a e m são parâmetros empíricos a serem obtidos a partir dos dados, geralmente ajustados através de uma regressão pelo Método dos Mínimos Quadrados.

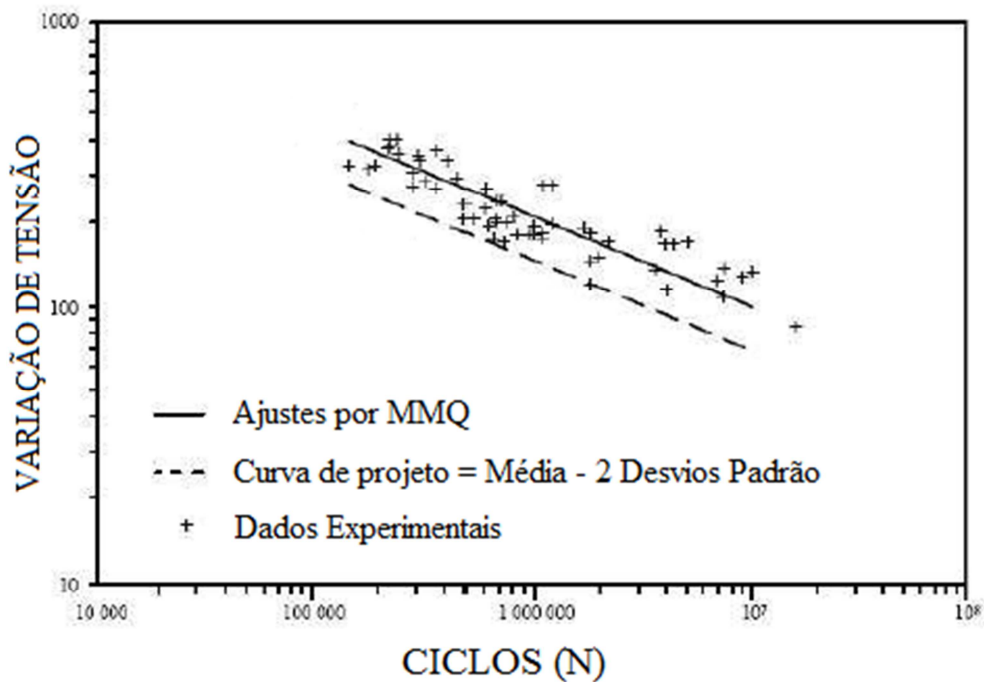


Figura 21 – Dados experimentais.

Outra característica é a bilinearidade destas curvas. A norma DNV (2012) define para cada tipo de curva S-N um ponto de mudança de inclinação. Para detalhes expostos ao ar, esta transição se dá em $N = 10^7$ ciclos. Já para detalhes submersos e com proteção catódica, em $N = 10^6$. Esta bilinearidade se refere à amplitude variável de tensões, observada na resposta das estruturas “offshore” sob ação de ondas.

Como a estrutura a ser estudada neste trabalho se localiza acima do nível d’água, serão apresentados somente os parâmetros das curvas de exposição ao ar, conforme Tabela 3 e Figura 22.

Tabela 3 – Parâmetros das curvas S-N – Exposição ao ar (DNV, 2012).

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

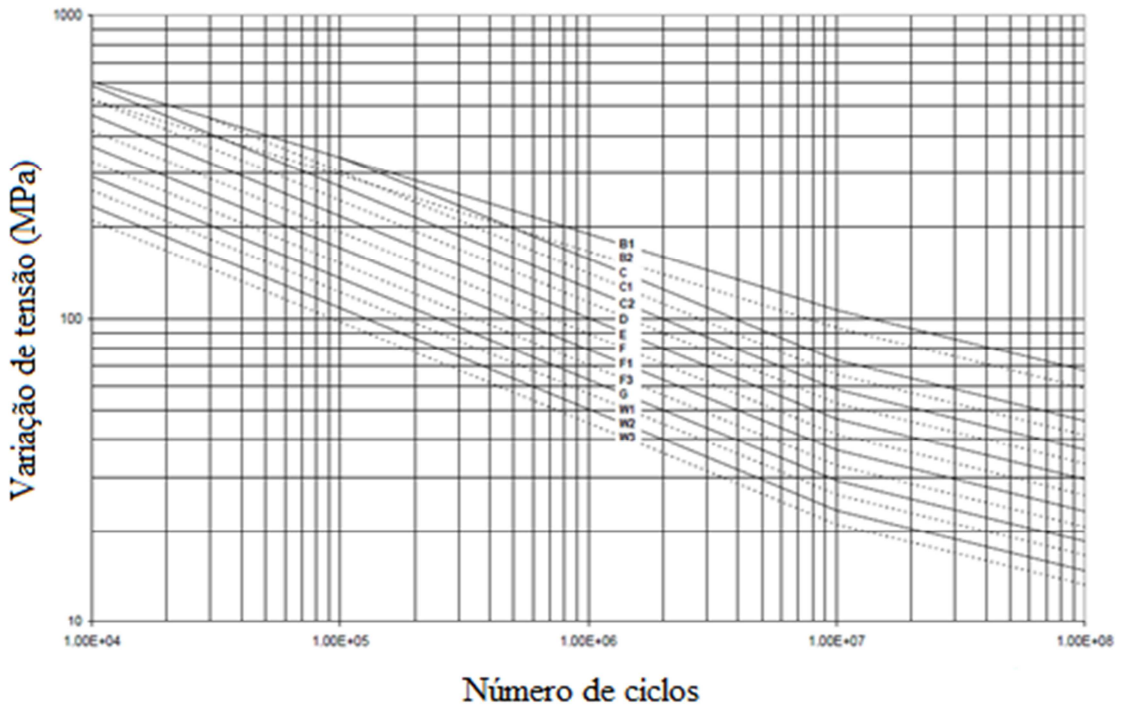


Figura 22 – Curvas S-N (DNV, 2012) – Exposição ao ar.

Cabe ressaltar que a condição de falha contida nas curvas SN é relativa ao número de ciclos necessários para se obter uma trinca passante.

4.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA

A resistência à fadiga de juntas soldadas depende da espessura das chapas. Isto ocorre em função da geometria da solda e das chapas a serem unidas e uma queda de resistência está associada ao gradiente de tensões ao longo da espessura (DNV, 2012).

Outro fator importante é que, quanto mais espessa a chapa, maiores serão as chances de surgimento de trincas devido à maior probabilidade de ocorrência de defeitos ou danos devidos ao ambiente ou processos de fabricação inadequados.

Além disso, para o processo de soldagem de elementos mais espessos, geralmente são exigidos procedimentos mais complexos de execução, que eventualmente ocasionam níveis mais elevados de tensões residuais.

As curvas S-N apresentadas na Tabela 3 foram geradas em função de ensaios de laboratório para elementos com uma espessura máxima de referência. Para espessuras superiores, a variação de tensões deve ser corrigida, conforme apresentado na equação 4.3, para consideração dos efeitos mencionados anteriormente:

$$\Delta\sigma_{corrigida} = \Delta\sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \quad (\text{Equação 4. 3})$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = variação de tensão calculada;

t = espessura real;

t_{ref} = espessura de referência dos ensaios;

k = fator de correção de espessura, ver Tabela 3.

4.4 RELAÇÃO ENTRE AS CURVAS S-N E A METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DAS TENSÕES

A análise de fadiga pode ser baseada em algumas metodologias, dependendo do que seja mais eficiente ou adequado para o detalhe estrutural a ser estudado. Diferentes conceitos de curvas S-N estão desenvolvidos na literatura.

É fundamental que as curvas S-N sejam utilizadas em concordância com a metodologia adotada para obtenção das tensões, tais como:

Tensões nominais: são obtidas através de modelos estruturais gerados pelos métodos clássicos de análise de estruturas, como por exemplo, um modelo de barras.

Como pode ser visto na Tabela 3, na última coluna, algumas curvas S-N possuem fatores de concentração de tensão intrínsecos, em função do tipo de detalhe de conexão utilizado para geração das curvas. As curvas classificadas como “E” até “W3” possuem, já embutidos nas curvas, SCF’s variando de 1,13 a 2,50, em relação à curva D. Para estas curvas, as variações de tensões a serem utilizadas devem ser variações de tensões nominais.

Tensões de *hot spot*: são obtidas a partir dos níveis nominais majorados por um fator de concentração (SCF), levando-se em conta não só mudanças bruscas de geometria local, como também defeitos na solda de diversas origens.

Estas tensões podem ser determinadas por um modelo de elementos finitos, através de uma modelagem detalhada, podendo contemplar as descontinuidades geométricas e demais fatores que possam causar concentração de tensões. Quando a modelagem é realizada desta forma, nos deparamos com as possíveis situações:

- O modelo já contempla todos os SCF’s esperados, até mesmo possíveis desalinhamentos, para o caso de modelos com elementos sólidos. Neste caso, o projetista deve utilizar uma curva S-N que não possua qualquer SCF intrínseco, a fim de evitar duplicidade de efeitos. Segundo DNV (2012), a curva “D” deve ser usada (ver Tabela 3).

- Caso as características estruturais do detalhe não estejam integralmente presentes no modelo de elementos finitos, a tensão de *hot spot* deve ser associada também a um SCF adicional, calculado manualmente, antes da utilização da curva “D”. Este SCF pode ser proveniente, por exemplo, do desalinhamento entre chapas unidas por solda de topo ou em uma junta cruciforme.

4.5 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE FADIGA

4.5.1 FADIGA SIMPLIFICADA

A análise de fadiga simplificada emprega uma distribuição (geralmente Weibull de dois parâmetros) de longo prazo para a variação de tensões, fornecendo uma fórmula fechada para o dano. A vida à fadiga é bastante sensível ao parâmetro de forma da distribuição, que é calibrado para cada posição da estrutura. Esta análise é bastante empregada em detalhes estruturais navais (FPSO's e semi-submersíveis) e até mesmo no pré-dimensionamento de jaquetas à fadiga. Esta metodologia não será empregada neste trabalho.

4.5.2 FADIGA ESTOCÁSTICA

- ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Por ser a metodologia utilizada neste trabalho, serão descritas detalhadamente as etapas necessárias para realização de uma análise de fadiga estocástica no domínio da frequência.

Esse método é aplicável quando existe linearidade entre as ações e as respostas na estrutura analisada. A grande vantagem dessa teoria é que ela exige recursos computacionais mais modestos quando comparada aos métodos baseados no domínio do tempo, tornando-a uma excelente ferramenta de projeto.

Primeira etapa – Obtenção dos RAO's da embarcação

Este passo foi introduzido no capítulo anterior. Cabe ressaltar que nesta dissertação serão utilizados apenas os RAO's de esforços seccionais (viga-navio), apresentados no próximo capítulo.

Segunda etapa – Obtenção dos RAO's de tensão na estrutura

Esta fase corresponde, provavelmente, à tarefa mais trabalhosa da análise.

Devemos obter a relação entre a resposta da embarcação à ação das ondas (amplitude unitária) e a resposta da estrutura, nos pontos escolhidos para estudo.

No próximo capítulo, será apresentada toda a metodologia utilizada para obter esta relação.

Terceira etapa – Definição do diagrama de dispersão de ondas

Nesta fase são escolhidos os diagramas de dispersão disponíveis para a locação de estudo.

Quarta etapa – Obtenção dos espectros de resposta

Os RAO's são então multiplicados pelos espectros de mar, que definem a real contribuição das diversas ondas regulares para o estado-de-mar sob análise.

Matematicamente, os espectros de resposta são obtidos de acordo com a seguinte expressão:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 * S_\eta(\omega) \quad (\text{Equação 4. 4})$$

Onde $S_\eta(\omega)$ representa o espectro de mar.

A Figura 23 ilustra, esquematicamente, este cruzamento.

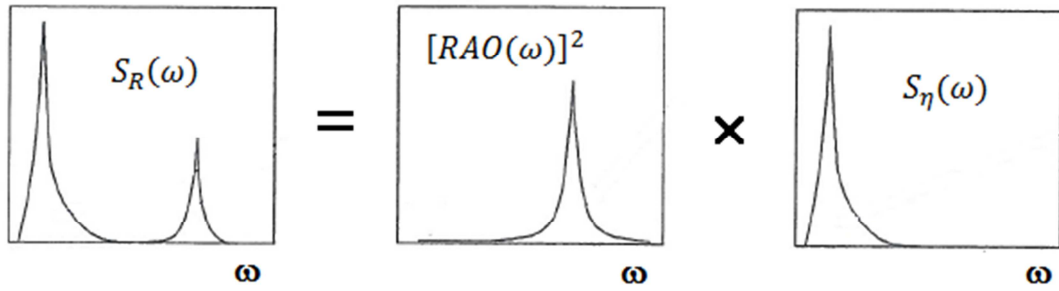


Figura 23 – Espectro de resposta.

Quinta etapa – Cálculo dos danos parciais

Primeiramente, é definida a curva S-N adequada ao detalhe estrutural estudado.

De posse do espectro de resposta, assumindo uma distribuição de Rayleigh para as amplitudes da resposta, monta-se a uma função densidade de probabilidade para variação de tensões (amplitude dupla), onde a variância da distribuição é igual ao momento espectral m_0 .

De posse desta função, e da relação entre os momentos espectrais apresentada no capítulo 2 (obtenção de Tz e, conseqüentemente, número de ciclos), chega-se a um dano parcial, conforme esquematizado na figura a seguir.

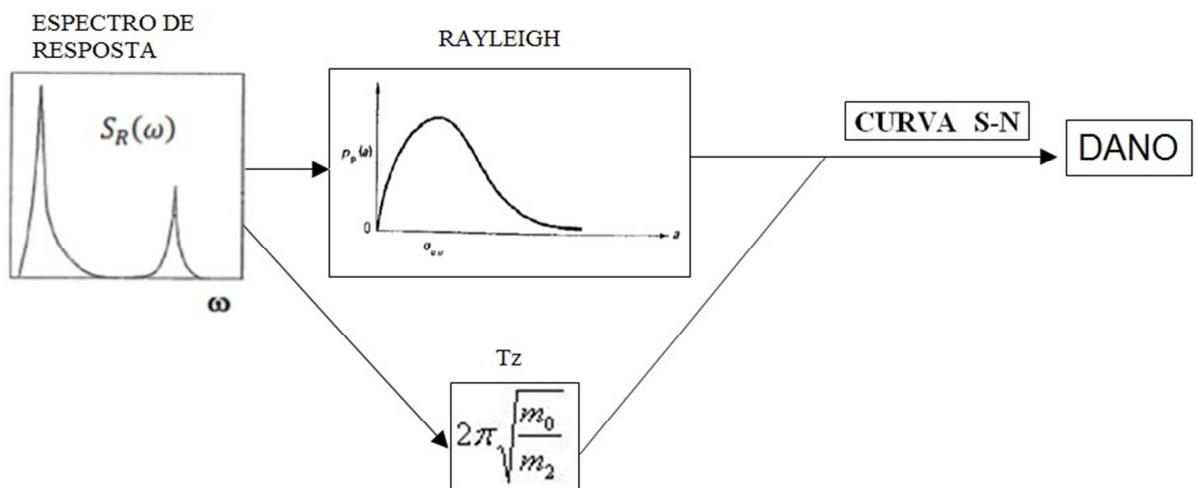


Figura 24 – Fluxo para obtenção dos danos parciais.

Sexta etapa – Correção dos danos parciais

O tratamento estatístico definido anteriormente é apropriado para casos em que o espectro de resposta seja de banda estreita. No caso de espectros de banda larga, deve-se definir um método apropriado para corrigir o dano estimado.

Um dos métodos mais usados é o proposto por WIRSCHING e LIGHT (1980), que possui a seguinte forma:

$$D_{RF} = D_{BE} * \lambda(m, \varepsilon) \quad (\text{Equação 4. 5})$$

Onde:

D_{RF} é o dano corrigido para espectro de banda larga;

D_{BE} é o dano obtido para banda estreita;

$\lambda(m, \varepsilon)$ é o fator de correção, calculado em função do parâmetro de largura de banda ε e do valor m , obtido a partir da inclinação da curva S-N.

A equação do fator de correção é dada por:

$$\lambda(m, \varepsilon) = a(m) + [1 - a(m)] * (1 - \varepsilon)^{c(m)} \quad (\text{Equação 4. 6})$$

$$a(m) = 0,926 - 0,033m \quad (\text{Equação 4. 7})$$

$$c(m) = 1,587m - 2,323 \quad (\text{Equação 4. 8})$$

Como a curva é bilinear, a norma ABS (2013) recomenda que o fator de correção seja calculado com os parâmetros do primeiro trecho da curva S-N, que retorna valores mais conservadores.

O dano corrigido é sempre menor que o dano obtido segundo a premissa de espectro de banda estreita, ou seja, $\lambda(m, \varepsilon)$ é sempre menor que 1,0.

Sétima etapa – Cálculo do dano final

O dano final será o somatório de todos os danos obtidos (eventualmente corrigidos) para cada estado de mar (Regra de Palmgren-Miner).

Uma questão importante a mencionar é que o volume de observações apresentadas nos diagramas de dispersão é, geralmente, inferior à vida útil da unidade. A prática comum de projeto é multiplicar o número de ocorrências registradas pela razão entre a vida útil da unidade e o período total da coleta de dados.

Nesta etapa é considerado o fator de segurança (ver item 4.6.1), da seguinte forma: supondo que este fator seja igual a 2, o dano previsto acumulado para vida útil da unidade deve estar limitado a 0,5.

- ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

Os métodos de cálculo de fadiga no domínio do tempo são utilizados quando não há linearidade entre a resposta da estrutura e o carregamento aplicado e não é possível aplicar procedimentos de linearização.

Nesse caso, a informação de longo prazo contida no diagrama de dispersão é transformada em realizações no domínio do tempo para cada estado de mar a partir dos seus espectros. Uma série temporal de cargas hidrodinâmicas é gerada a partir das realizações de cada estado de mar, sendo utilizada uma análise estrutural no domínio do tempo para obter um sinal de tensões correspondente a cada estado de mar.

Para cada sinal de tensões no domínio do tempo, um método de contagem de ciclos é aplicado para obter um histograma de ciclos. O dano acumulado é calculado com a ajuda da regra de Palmgren-Miner e das curvas S-N.

Conforme mencionado anteriormente, este método demanda recursos computacionais relativamente grandes.

4.6 ASPECTOS DE PROJETO

Neste item serão apresentados alguns aspectos importantes sobre o projeto de estruturas à fadiga.

4.6.1 FATORES DE SEGURANÇA

As normas de projeto definem fatores de segurança a serem aplicados no cálculo da vida à fadiga de estruturas em função alguns aspectos, tais como acessibilidade e importância estrutural da junta (consequências de uma eventual ruptura).

Em situações onde não há acesso para inspeção e a falha é de substancial consequência, este fator pode chegar a 10,0. Porém, na maioria das situações de projeto, está entre 2,0 e 5,0.

4.6.2 CONSIDERAÇÃO DA COMPRESSÃO

A propagação de trincas ocorre apenas sob esforços de tração.

Após o processo de soldagem de um determinado detalhe estrutural, grandes tensões residuais de tração podem surgir, fazendo com que o ciclo de tensão resultante seja todo trativo, mesmo sob esforços solicitantes compressivos. Em virtude disto, os esforços de compressão são considerados em uma análise de fadiga.

Algumas normas admitem, para material base, fatores de redução do ciclo de tensões para consideração da compressão.

4.6.3 EFEITO DA TENSÃO MÉDIA

Na maioria das situações práticas de projeto, os carregamentos apresentam um valor de tensão média não nula, em torno do qual a carga varia ciclicamente.

De acordo com algumas referências, a presença de uma tensão média diferente de zero altera a resistência à fadiga em material base, sendo importante para estudo de componentes mecânicos.

Porém, para elementos soldados, este efeito não é levado em consideração.

4.6.4 SENSIBILIDADE DA RESPOSTA

De forma geral, o dano por fadiga é proporcional a uma potência entre 3 e 5 do ciclo de tensão, de acordo com a declividade da curva SN.

Portanto, pequenas variações do nível de tensão, por mudança em seu método de cálculo ou por outras incertezas, levam a grandes variações na vida à fadiga calculada. Por este motivo, todas as premissas devem ser definidas cuidadosamente, no sentido de garantir a segurança das estruturas.

5 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS RAO's DE TENSÕES PRINCIPAIS

Este capítulo apresentará todas as ações envolvidas para obtenção dos RAO's de tensões principais no ponto escolhido, através de funções de transferência.

Das etapas necessárias para realização de uma análise de fadiga estocástica no domínio da frequência, detalhadas no capítulo anterior, a metodologia apresentada neste capítulo corresponde à segunda.

As dimensões estruturais dos elementos serão descritas no próximo capítulo, através de desenhos de engenharia e ilustrações. O presente serve para esclarecer o método.

Uma questão importante a mencionar é que, numa dada seção, os momentos fletores vertical e horizontal de viga-navio não estão em fase, ou seja, as amplitudes destes esforços ocorrem em instantes diferentes para uma determinada excitação. A consideração desta defasagem foi feita utilizando o conceito de números reais e imaginários, conforme Figura 25.

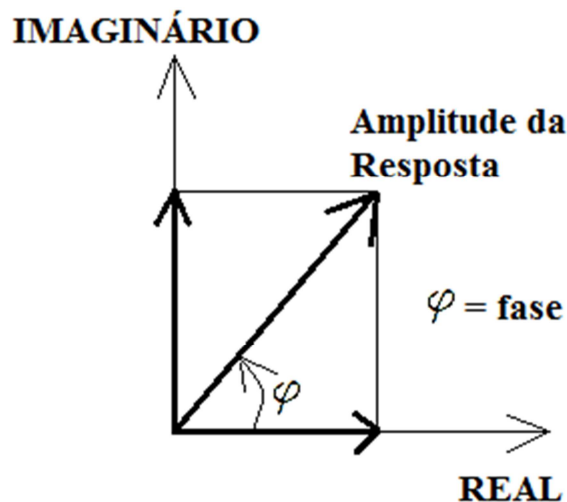


Figura 25 – Decomposição em Real e Imaginário.

De acordo com DNV (2010), as funções de transferência de tensão expressam a relação entre as ondas (para cada direção e frequência) e a resposta de tensões em um ponto específico na estrutura, e podem ser determinadas de duas maneiras:

- “*Component Stochastic Analysis*”

Este método é baseado na combinação de funções de transferência em frequência de variáveis de resposta globais (momentos fletores de viga-navio, acelerações, pressões) e fatores de resposta de tensão provenientes de modelos estruturais para variáveis globais unitárias.

- “*Full Stochastic Analysis*”

Neste método, as cargas provenientes da análise hidrodinâmica são transferidas diretamente para um modelo de elementos finitos. A análise é geralmente baseada em um modelo global de elementos finitos associado a submodelos refinados nas regiões de interesse.

Nesta dissertação é utilizado o primeiro método.

A seguir será introduzido o passo-a-passo para obtenção das diversas funções de transferência presentes neste trabalho.

Passo 1

Criação de um modelo de barras representando o módulo estudado e a seção da viga navio (Figura 26).

Este modelo foi feito no *software* SACS (BENTLEY SYSTEMS, 2013) e consiste na aplicação de momentos fletores unitários vertical (VWBM) e horizontal (HWBM) de viga-navio.

A partir destes momentos são lidos todos os esforços (N_y , V_x , V_z , M_y , M_x e M_z) em um dado ponto (P) de uma coluna localizada sobre a chapa “gusset” estudada.

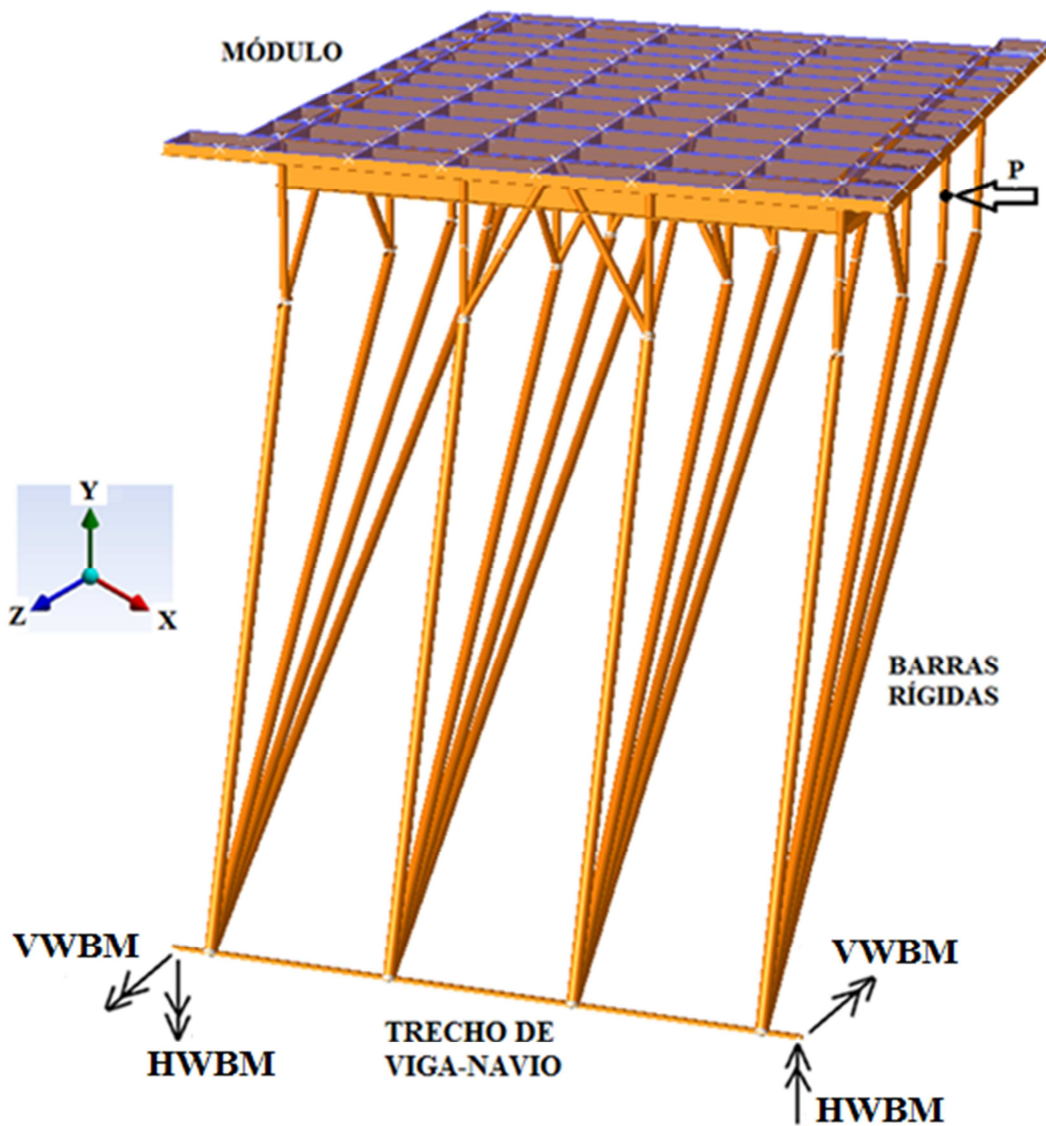


Figura 26 – Modelo de barras, SACs.

A Figura 27 ilustra um detalhe do suporte estudado, sendo o trecho livre entre o final do tubo e a estrutura do casco, neste modelo, representado por um elemento de barra.

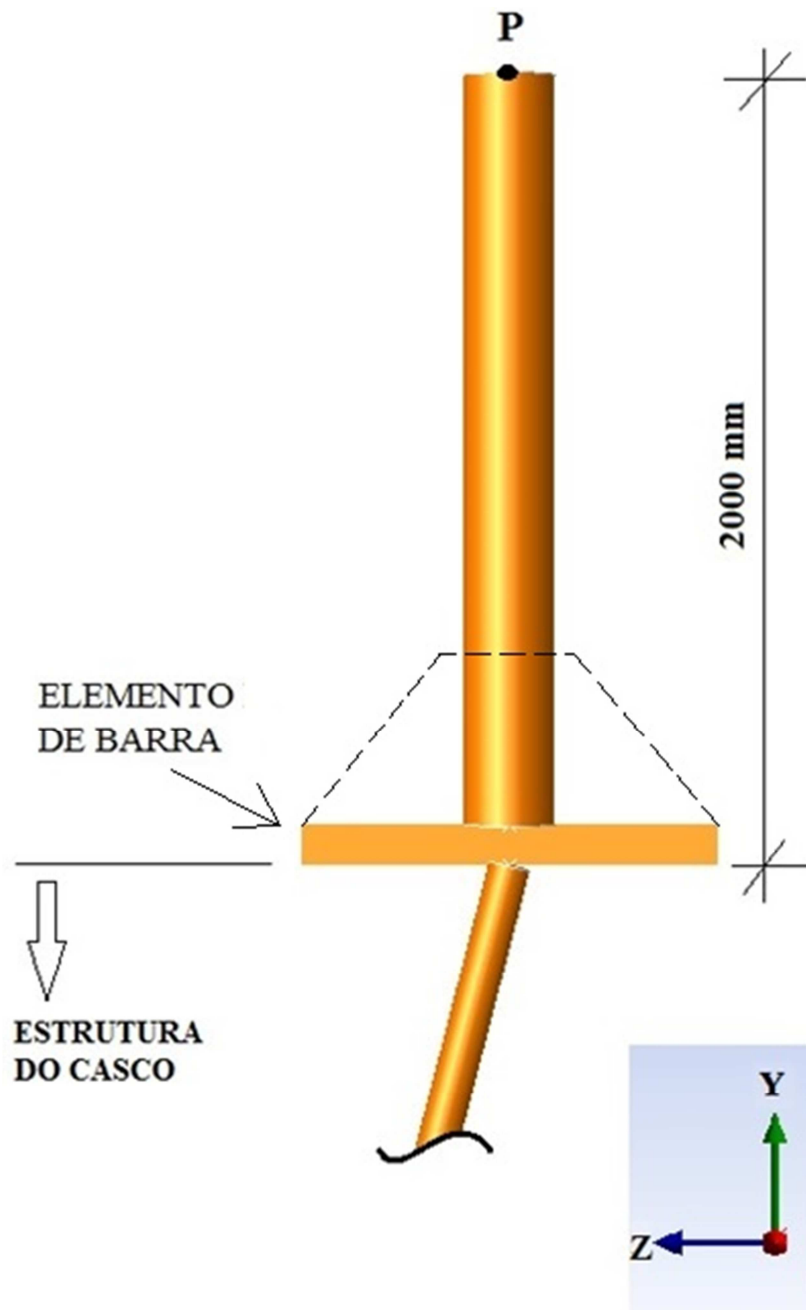


Figura 27 – Detalhe – Modelo de barras, SACS.

Passo 2

Criação de um modelo de elementos finitos (elementos 2D) representando o conjunto coluna/chapa “gusset” e um trecho da estrutura do casco do FPSO (Figura 28).

Este modelo foi feito no *software* ANSYS e consiste na aplicação de forças e momentos unitários (N_y , V_x , V_z , M_y , M_x e M_z) no topo da coluna deste modelo, equivalente ao ponto “P” do modelo de barras.

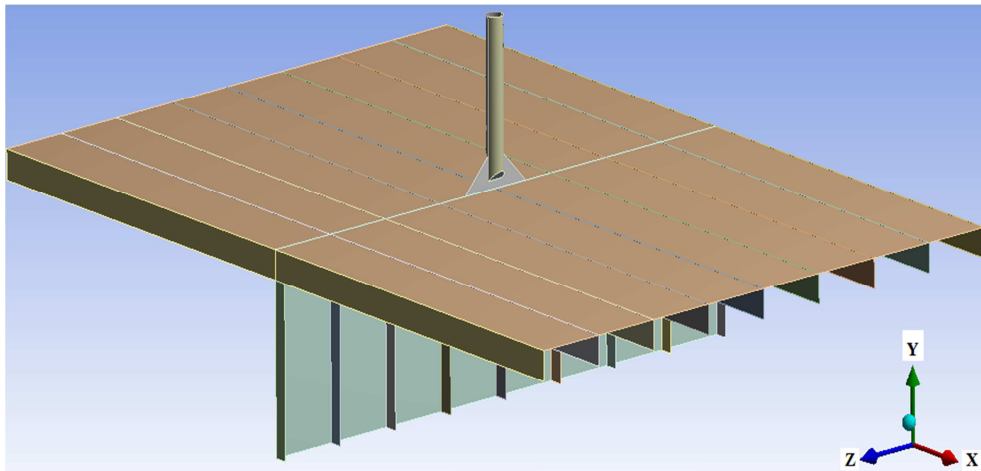


Figura 28 – Modelo de elementos finitos, ANSYS.

Para cada ação aplicada, são lidas as tensões normais σ_Y e σ_Z , e a tensão cisalhante τ_{YZ} . Essas leituras são feitas nas faces “top” e “bottom” dos pontos estudados, detalhados na Figura 29 e denominados pontos “S1” e “S2”.

O método de leitura foi feito de acordo com o “método B” que consta em DNV (2012).

Esse método consiste na leitura das tensões a uma distância de $0,5t$ da interseção entre elementos estruturais, onde t é a espessura do elemento, neste caso a chapa “gusset”. Trata-se de uma simplificação, objetivando dispensar a realização de extrapolação em casos onde há pico de tensão. Porém, para compensar a leitura feita fora deste ponto, as tensões devem ser multiplicadas pelo fator de 1,12 antes da utilização da curva “D”.

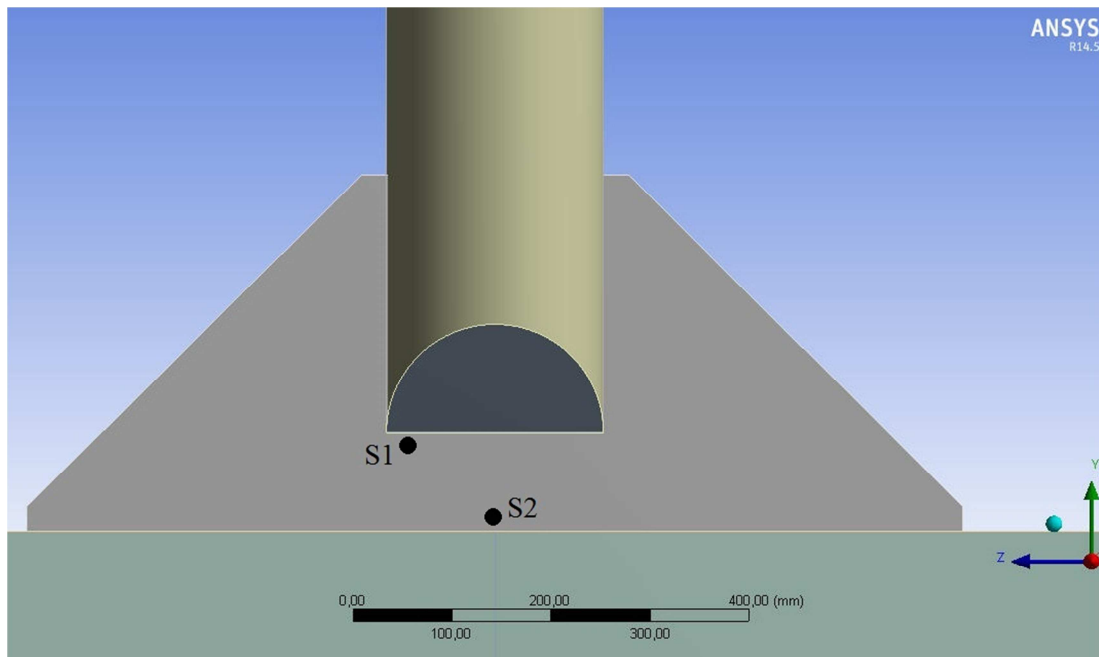


Figura 29 – Detalhe – Pontos de estudo, ANSYS.

Passo 3

De posse das tensões calculadas no Passo 2, chega-se em uma etapa importante da análise, o cálculo das tensões principais, utilizadas para o cálculo de fadiga.

Neste momento, surge uma complicação, visto que σ_Y , σ_Z e τ_{YZ} variam no tempo, fazendo com que as direções principais também variem. A referência DNV (2012) permite que, caso o ângulo entre a perpendicular à trinca (neste caso, eixo Y) e a direção principal seja maior que 30 graus, seja aplicada uma redução na tensão de entrada na curva “D”, pois seria um aspecto favorável.

Porém, não foi possível lançar mão deste recurso, pois neste trabalho foram observados três aspectos:

- A tensão cisalhante é baixa quando comparada às tensões normais;
- A tensão normal vertical (σ_Y) é sempre maior, em módulo, que a tensão normal horizontal (σ_Z);
- As tensões normais estão aproximadamente em fase.

A partir destas observações, podemos tirar as seguintes conclusões:

- As direções principais pouco variam em relação aos eixos Y e Z (ilustrado na figura seguinte);

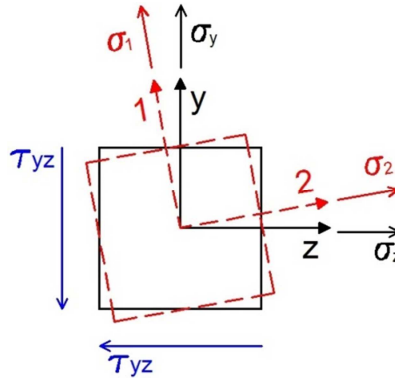


Figura 30 – Direções principais e eixos globais.

- A tensão principal associada à direção principal que pouco varia em torno do eixo Y é sempre maior, em módulo.

As figuras 31 e 32 ilustram estas conclusões e foram extraídas do exemplo de aplicação deste trabalho. Representam a resposta da estrutura para incidência de ondas regulares, com amplitude unitária, a 45 graus em relação à popa do FPSO e frequência circular de 0,45 rad/s, no ponto de estudo S1.

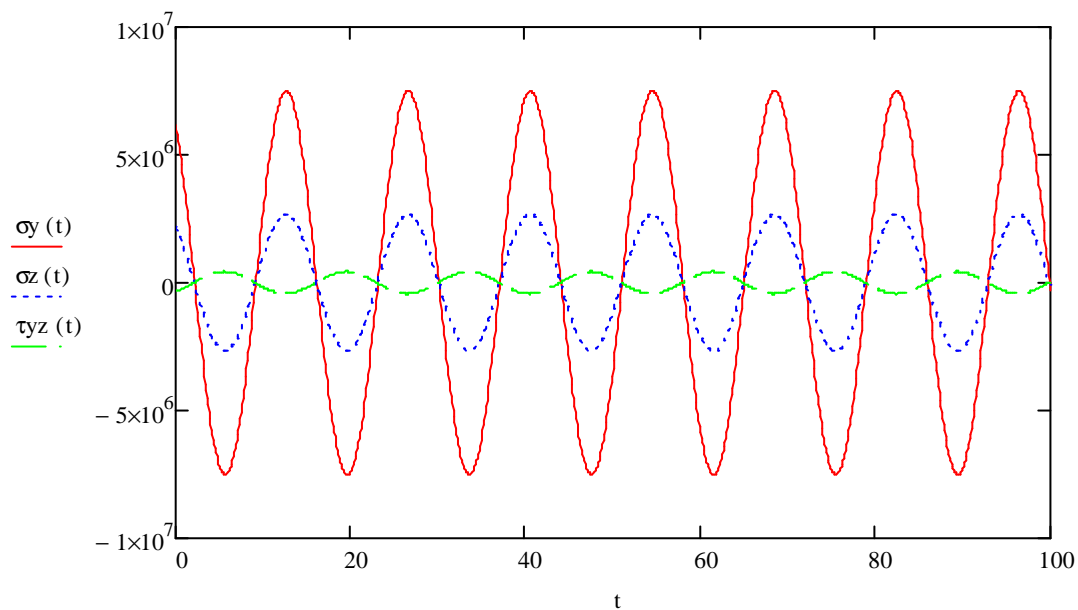


Figura 31 – Componentes de tensão σ_Y , σ_Z e τ_{YZ} (Pa) em função do tempo (s).

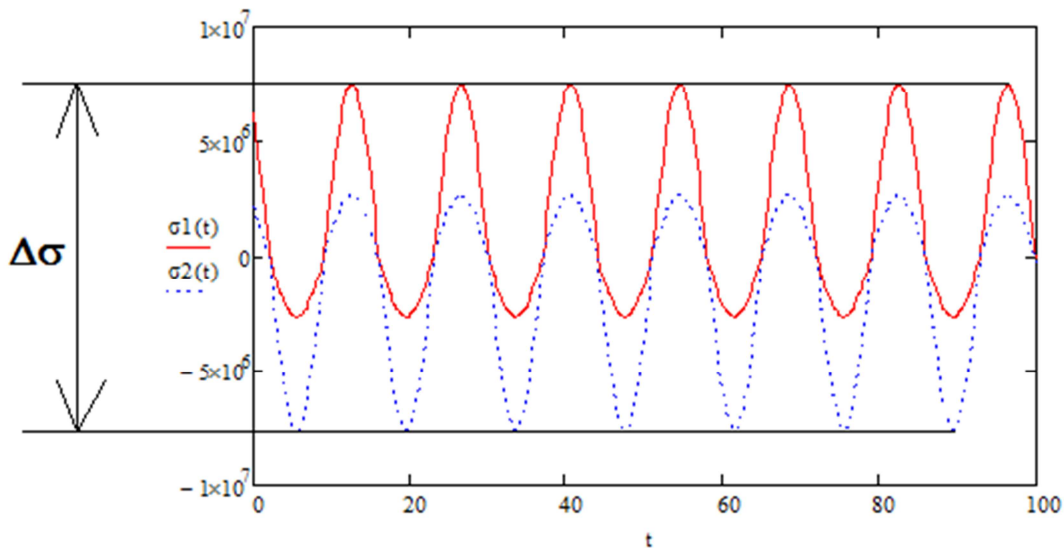


Figura 32 – Tensões Principais (Pa) em função do tempo (s).

Com base nestes argumentos, a tensão principal associada à direção principal que pouco varia em relação ao eixo Y foi a escolhida para o cálculo do dano à fadiga. A amplitude dupla ($\Delta\sigma$) a ser utilizada para este cálculo é indicada na Figura 32.

Foi criada uma rotina no programa *Excel* reproduzindo, para cada frequência e direção de incidência de ondas de amplitude unitária, as ações apresentadas nas figuras 31 e 32.

Uma abordagem interessante, proposta por BARLTROP e ADAMS (1991), seria a suposição de diferentes ângulos de um eventual defeito decorrente do processo de soldagem.

Para cada ângulo de estudo, a tensão normal a este defeito é dada por:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_Y \cos^2 \theta + \sigma_Z \sin^2 \theta + 2\tau_{YZ} \sin \theta \cos \theta \quad (\text{Equação 5. 1})$$

Onde θ é o ângulo formado entre uma suposta trinca e o eixo Z.

Uma vantagem deste método é a consideração mais racional dos ciclos de tensão, pois estes estão associados a uma direção fixa. Pode se tornar um recurso valioso quando se deseja reduzir danos que estejam superiores aos admissíveis.

Uma desvantagem é realização de diversas análises de fadiga, em função das diversas suposições para a ocorrência de defeitos.

A Figura 33 apresenta um fluxograma-resumo da metodologia presente neste capítulo.

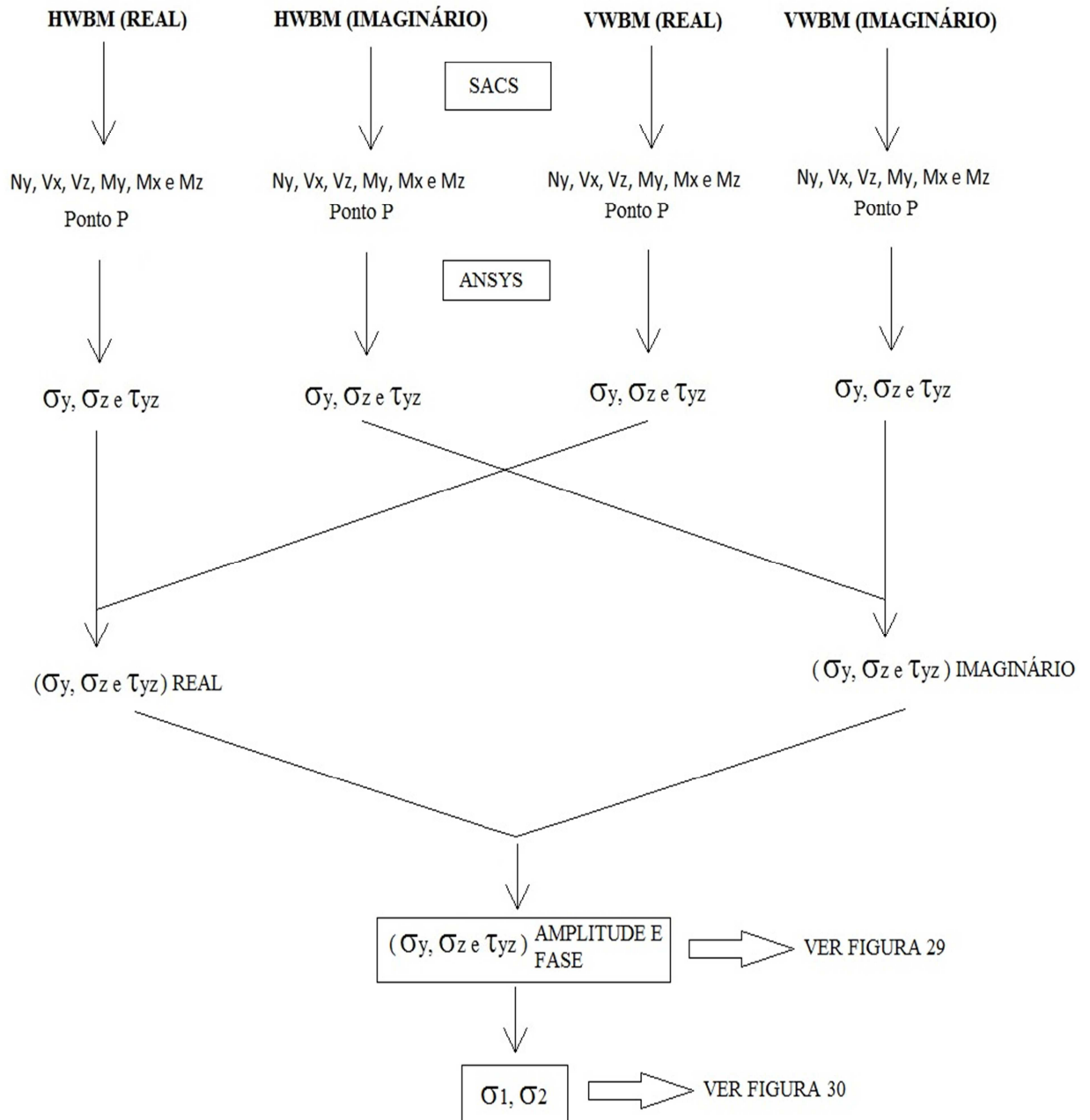


Figura 33 – Resumo da metodologia.

Uma observação importante a ser feita é que o período das ondas é muito maior do que o período natural dos módulos (inferior a 0,5s). Por esta razão, as ondas não geram excitação dinâmica na estrutura. Portanto, todas as análises envolvidas nesta metodologia são estáticas, dentro de um procedimento quasi-estático.

6 APLICAÇÃO

Serão apresentados dois exemplos de aplicação da metodologia presente neste trabalho.

No primeiro, os diagramas de dispersão de ondas são referentes à Bacia de Santos. No segundo, à Bacia de Campos.

O FPSO e o módulo, apesar de fictícios, possuem dimensões características dos projetos atuais da área “offshore”.

Os danos serão calculados considerando uma vida útil de 25 anos.

Será utilizada a curva “D” (DNV, 2012), conforme mencionado no capítulo 5, para exposição no ar. Os ciclos de tensão foram majorados por 1,12, devido ao método de leitura de tensões, aspecto também mencionado no capítulo anterior.

6.1 ESTIMATIVA DO DANO PARA BACIA DE CAMPOS

6.1.1 OBTENÇÃO DOS RAO’S DA EMBARCAÇÃO

Os RAO’s foram gerados com a utilização do programa WADAM do Sistema SESAM.

A modelagem hidrodinâmica compreende um modelo de difração (malha de elementos de contorno representando o casco, conforme Figura 34) e um modelo de massas para o calado de 21,6 m, representativo do longo prazo.

As direções de incidência foram definidas com intervalo de 45 graus. Foi considerado um amortecimento viscoso de 5% do amortecimento crítico de “roll”, representando o casco com bolinas ampliadas.

O comprimento total do navio é de 325 metros.

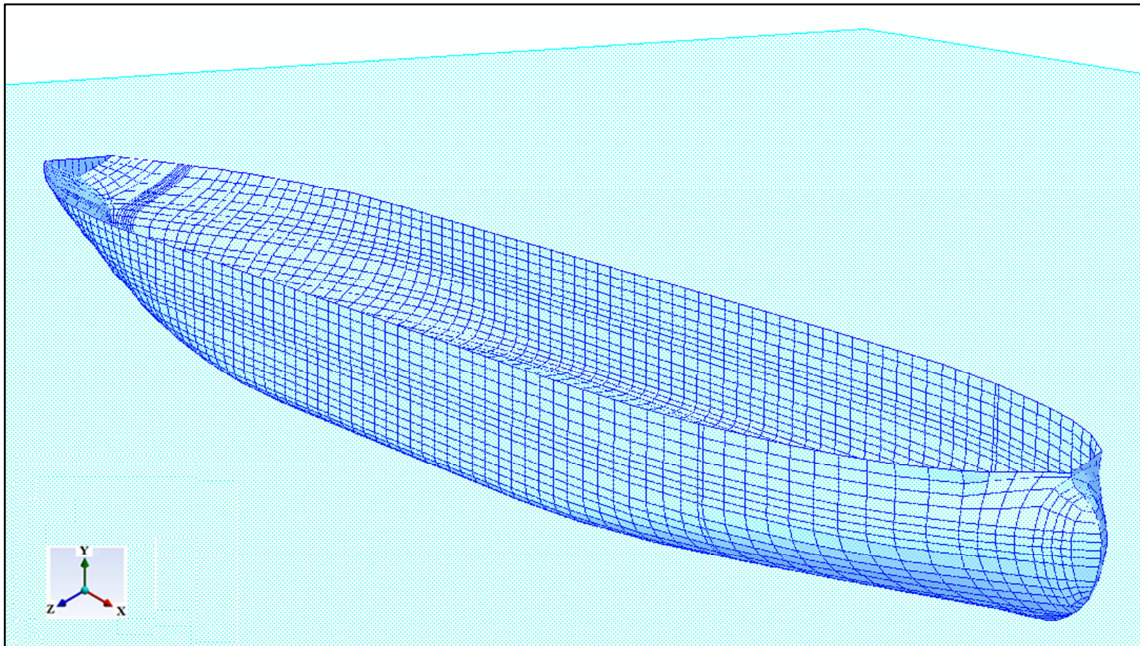


Figura 34 – Modelo de difração, WADAM.

Conforme mencionado anteriormente, foram gerados RAO's de dois esforços:

- Momento fletor vertical, VWBM;
- Momento fletor horizontal, HWBM;

As direções de incidência utilizadas foram definidas em função do diagrama de dispersão de ondas adotado, considerando o aproamento da unidade (ver item 6.1.3).

Os RAO's foram obtidos na seção mestra, indicada na Figura 49.

As frequências escolhidas para análise estão compreendidas entre 0,20 rad/s e 1,85 rad/s, com um incremento constante de 0,05 rad/s.

A Figura 35 apresenta a convenção utilizada pelo programa WADAM para a direção de incidência das ondas.

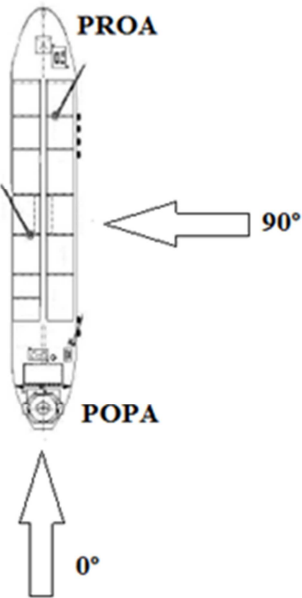


Figura 35 – Convenção para incidência de ondas, WADAM.

As figuras 36 a 43 ilustram os RAO's gerados.

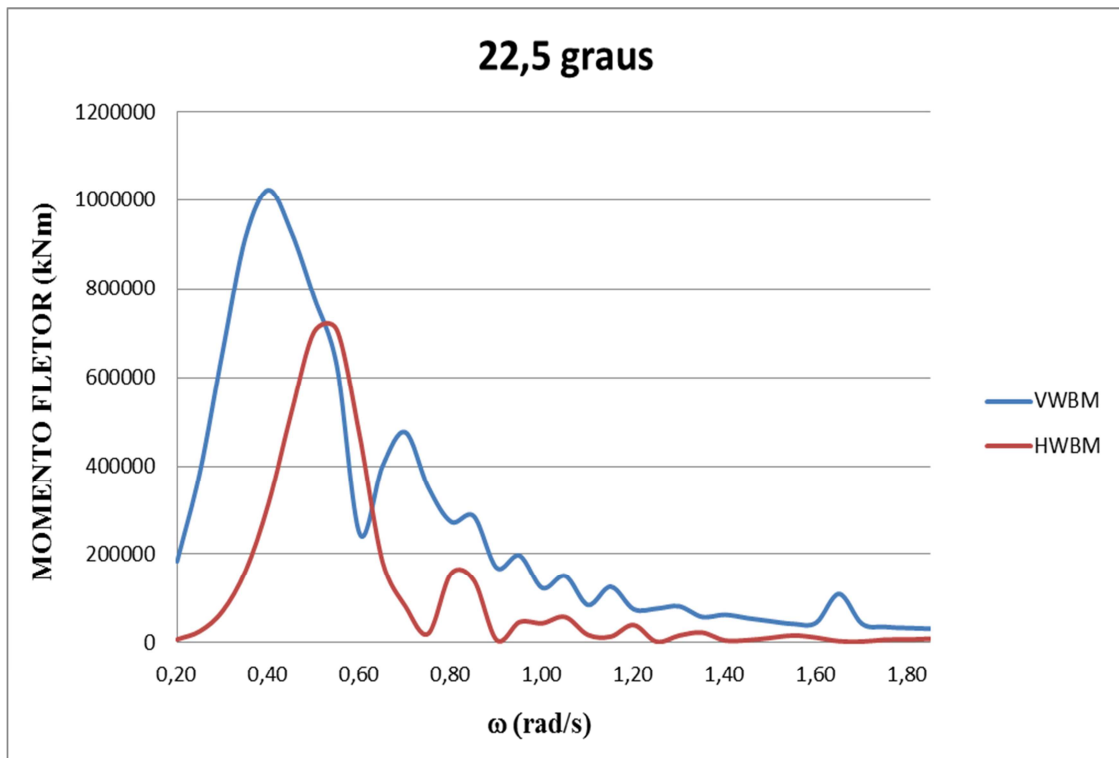


Figura 36 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 22,5°.

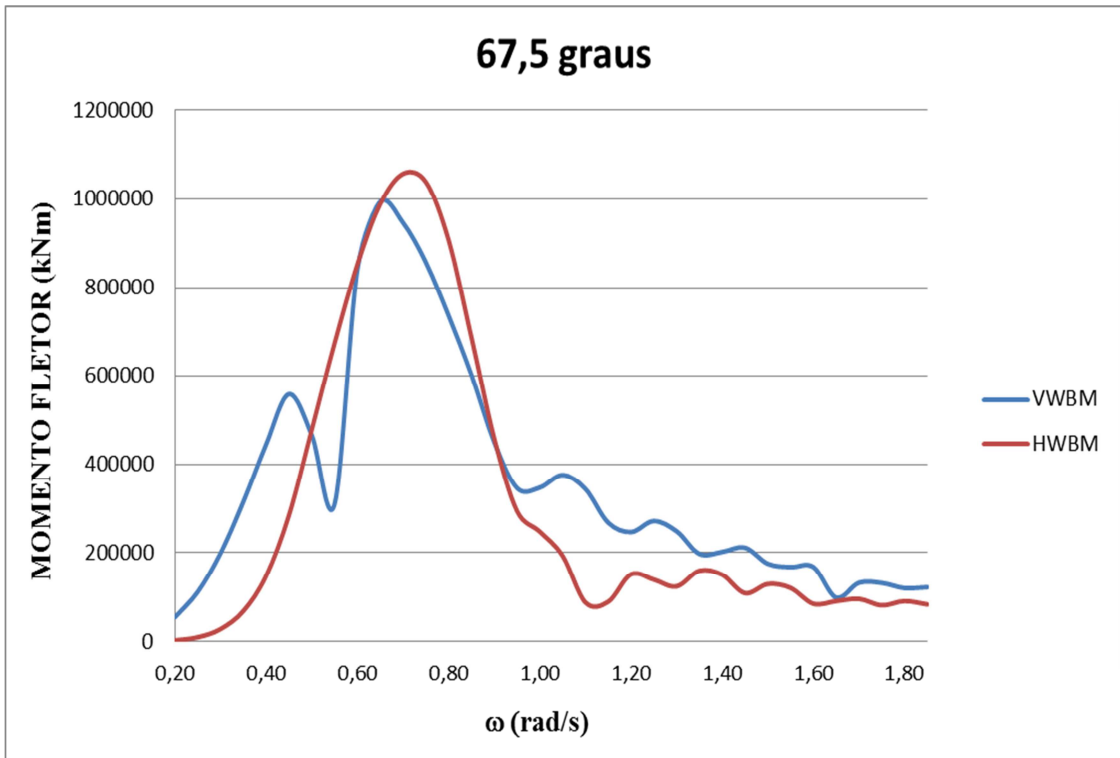


Figura 37 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 67,5°.

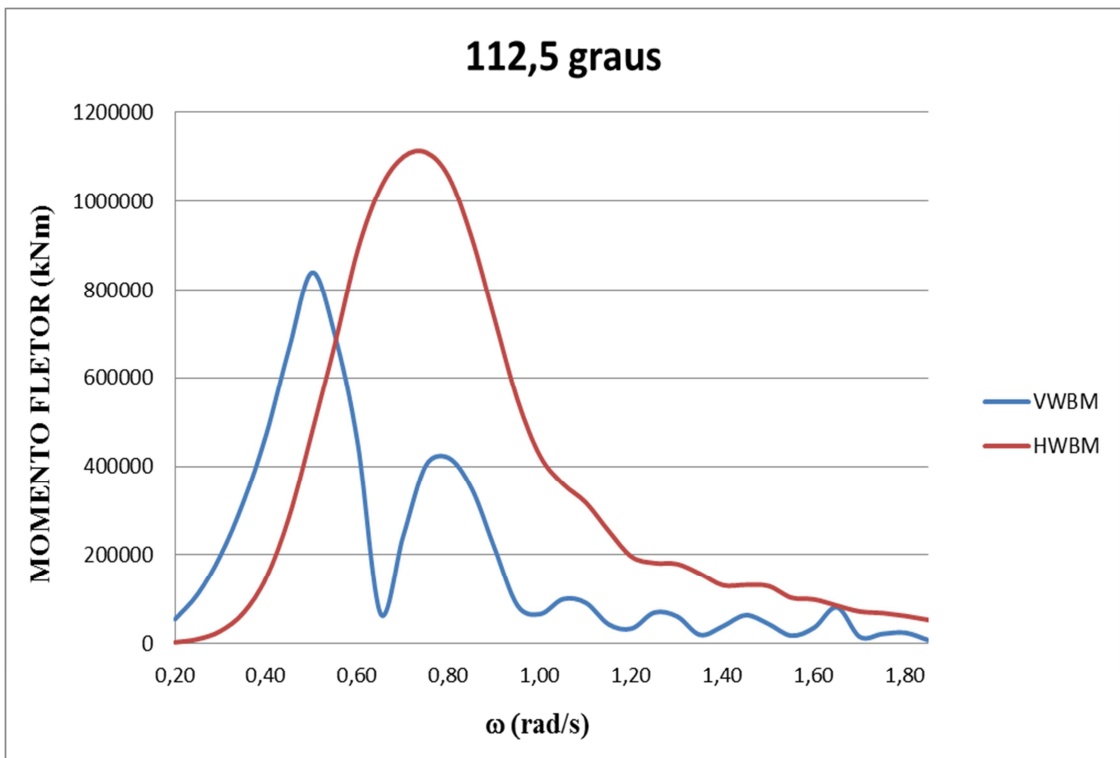


Figura 38 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 112,5°.

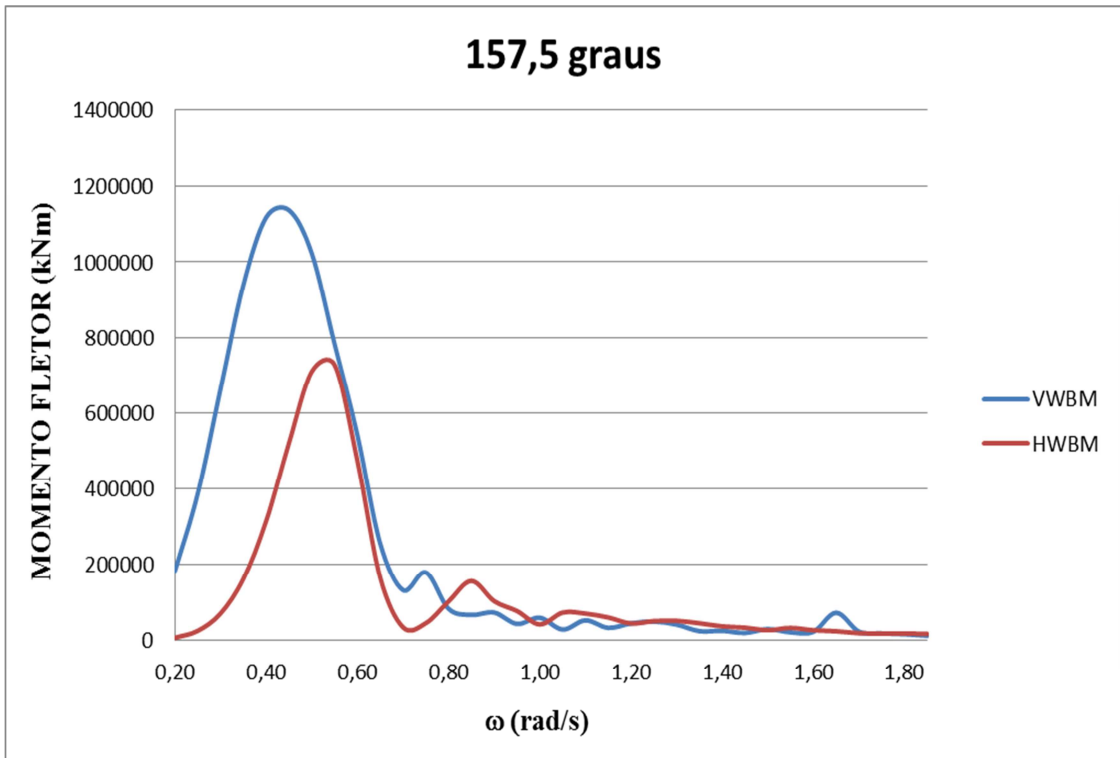


Figura 39 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 157,5°.

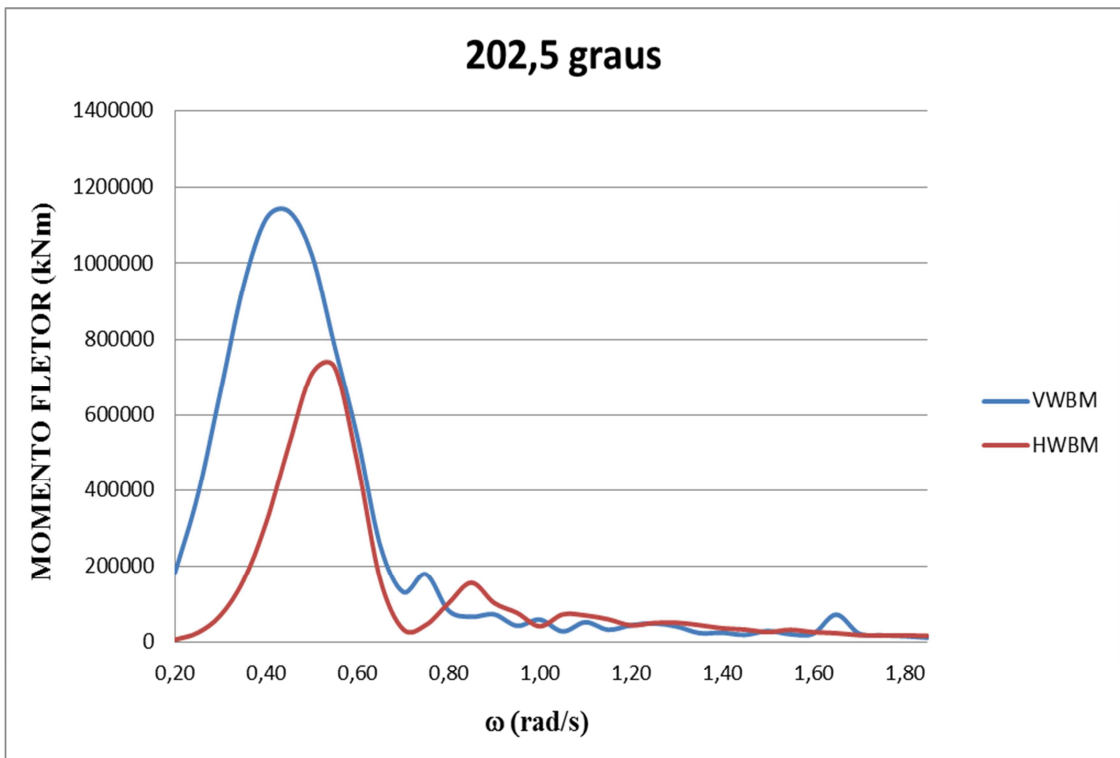


Figura 40 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 202,5°.

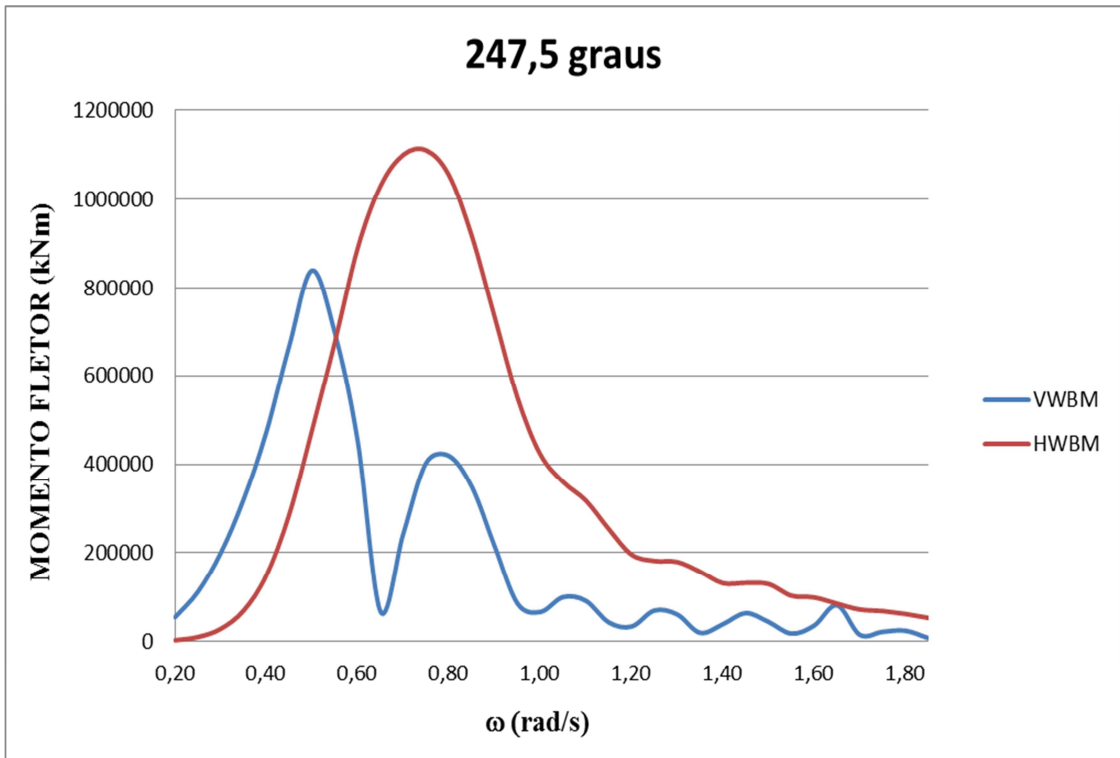


Figura 41 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 247,5°.

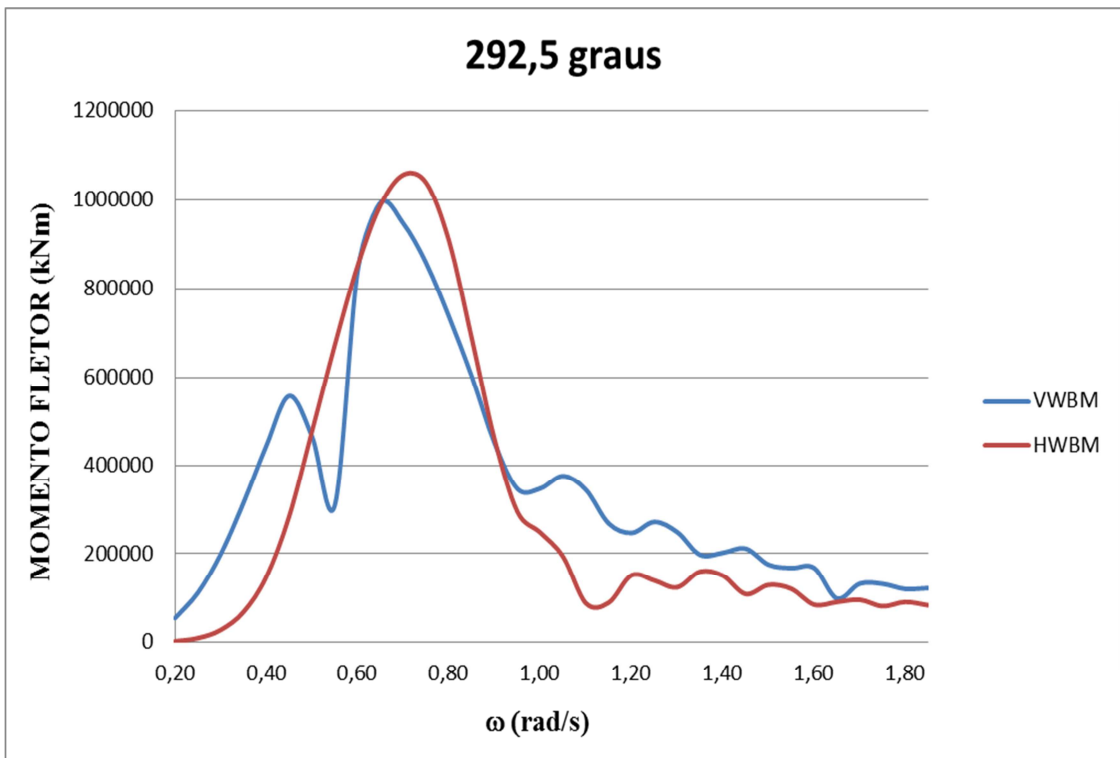


Figura 42 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 292,5°.

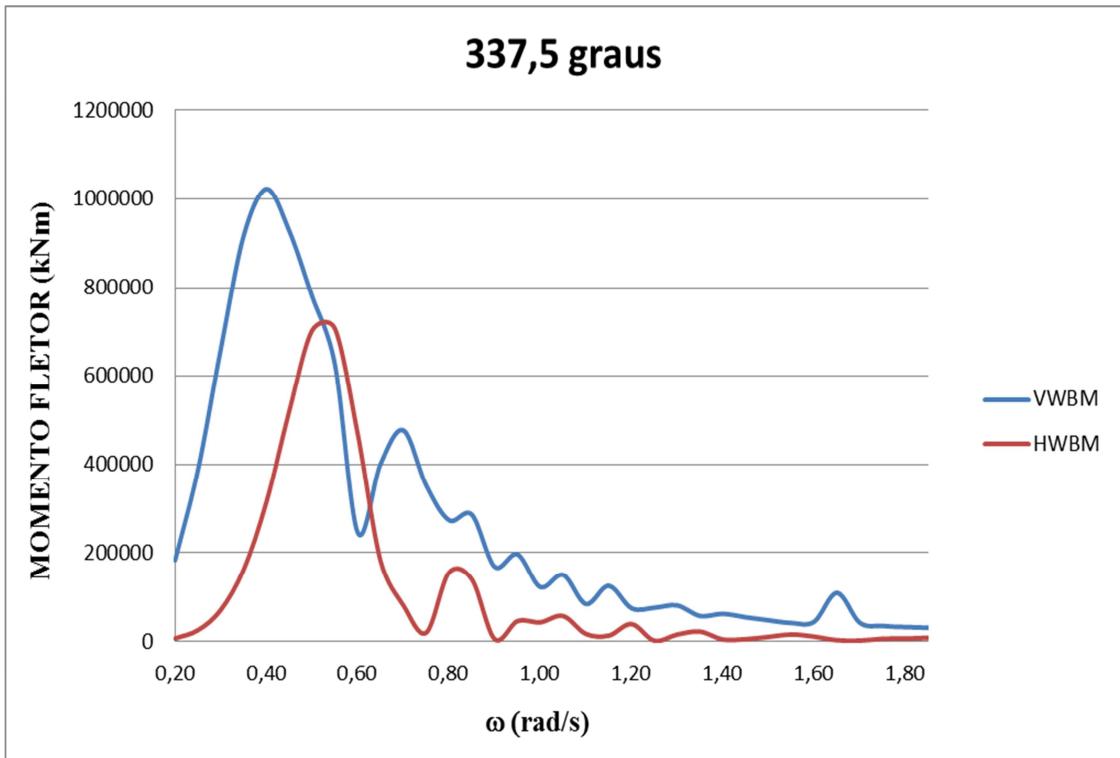


Figura 43 – RAO de esforços seccionais, incidência de ondas a 337,5°.

6.1.2 OBTENÇÃO DOS RAO'S DE TENSÃO NA ESTRUTURA

Conforme descrito no capítulo 5, o primeiro passo da metodologia para obtenção dos RAO's de tensão é a criação de um modelo de barras no *software* SACS, compreendendo um trecho do casco e a estrutura do módulo.

O módulo de elasticidade considerado para o material é de 210 GPa.

Os subitens a seguir detalham as propriedades necessárias para o input do modelo em questão.

- **Propriedades de seção da viga-navio**

A Figura 44 ilustra a seção transversal do navio, representando seus enrijecedores e chapas.

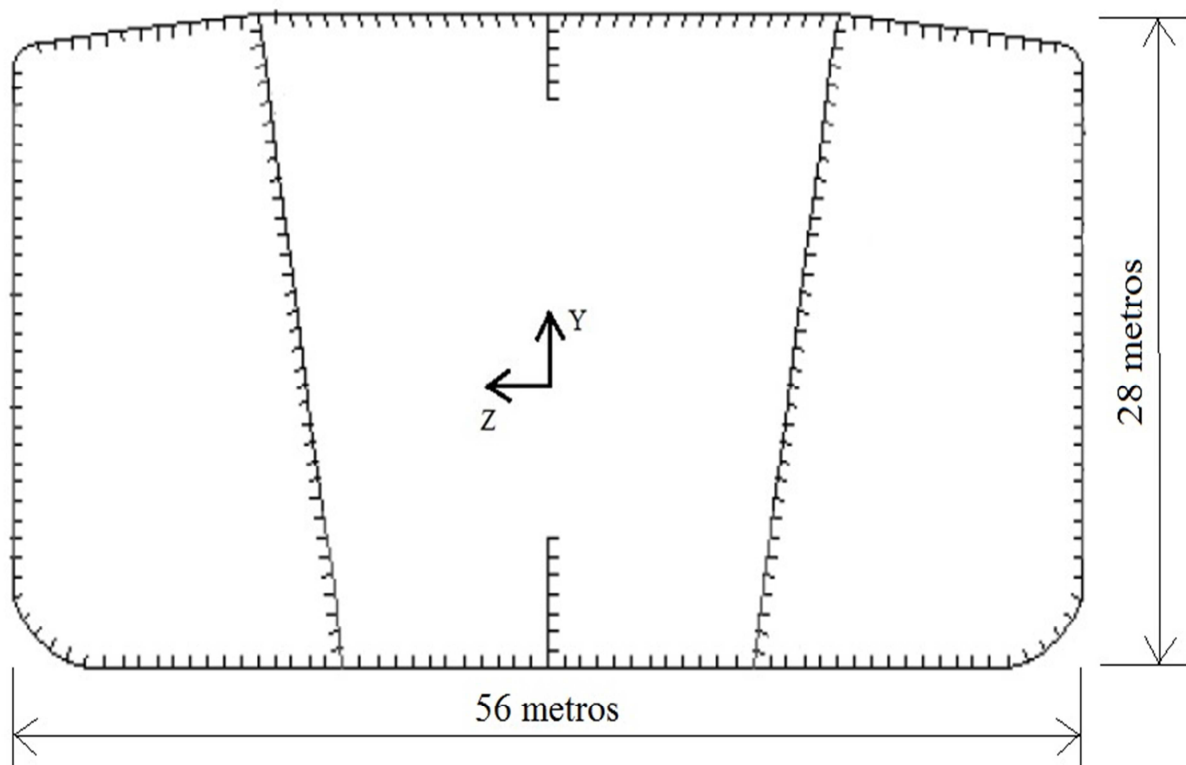


Figura 44 – Seção transversal do navio.

Momentos de inércia: $I_z = 989m^4$

$$I_y = 2391m^4$$

Posição do eixo neutro = 15m em relação ao topo.

Importante mencionar que, no modelo, esta seção está representada apenas por suas propriedades geométricas. O elemento foi modelado na posição de seu eixo neutro e conectado ao módulo por elementos rígidos.

- **Dimensões básicas do módulo**

As figuras 45 e 46 apresentam as características do módulo.

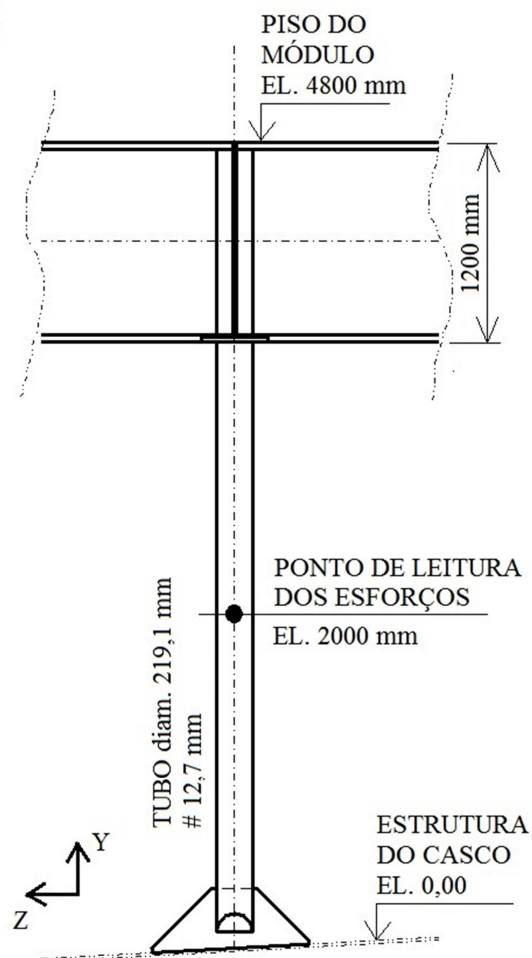


Figura 45 – Elevação do suporte estudado.

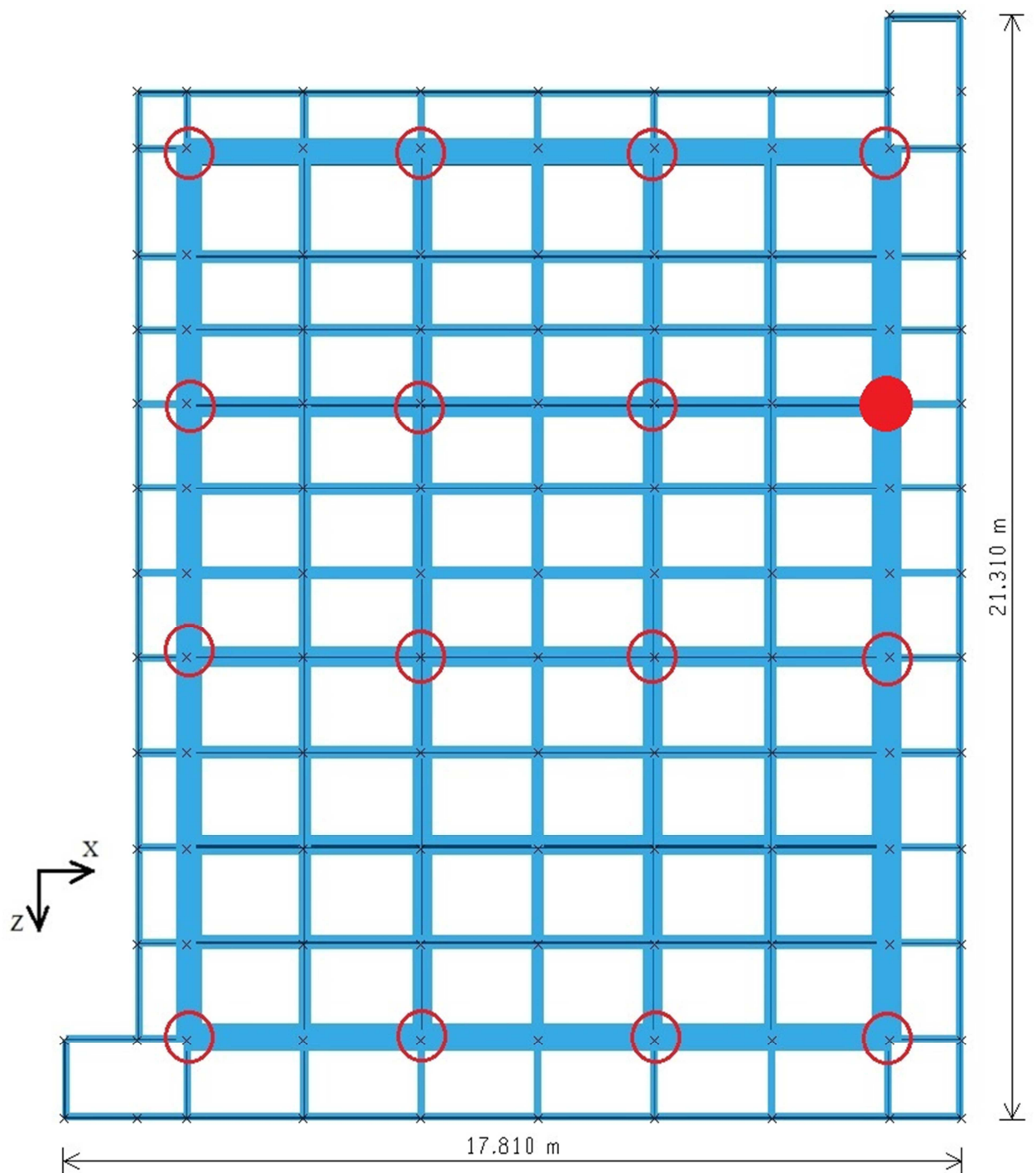


Figura 46 – Planta do piso do módulo (SACS).

Os círculos indicados na Figura 46 indicam a posição das colunas de suportes do módulo. Aquele cujo interior está preenchido representa a coluna estudada neste trabalho. As figuras 47 e 48 ilustram as seções longitudinal e transversal do módulo, representando as diagonais e com destaque em vermelho para o suporte estudado.

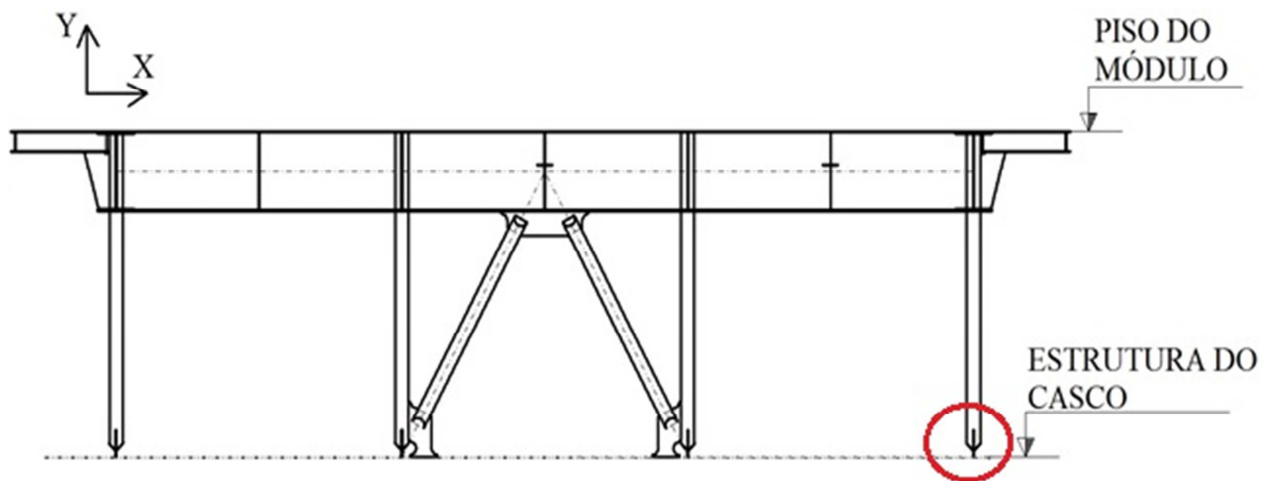


Figura 47 – Seção longitudinal: diagonais típicas entre “frames”.

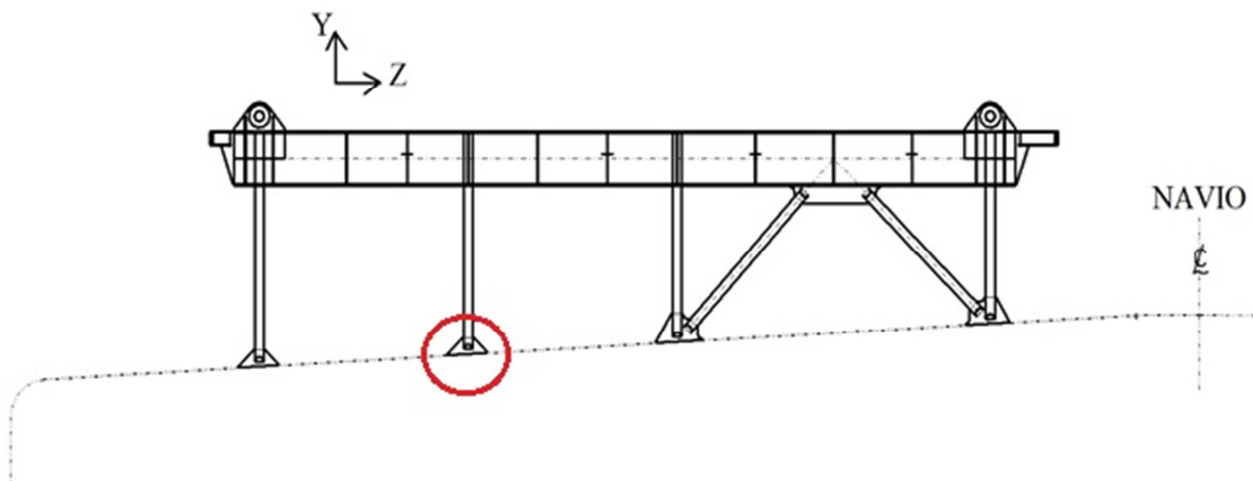


Figura 48 – Seção transversal: diagonais típicas entre “frames”.

- **Posição do módulo na embarcação**

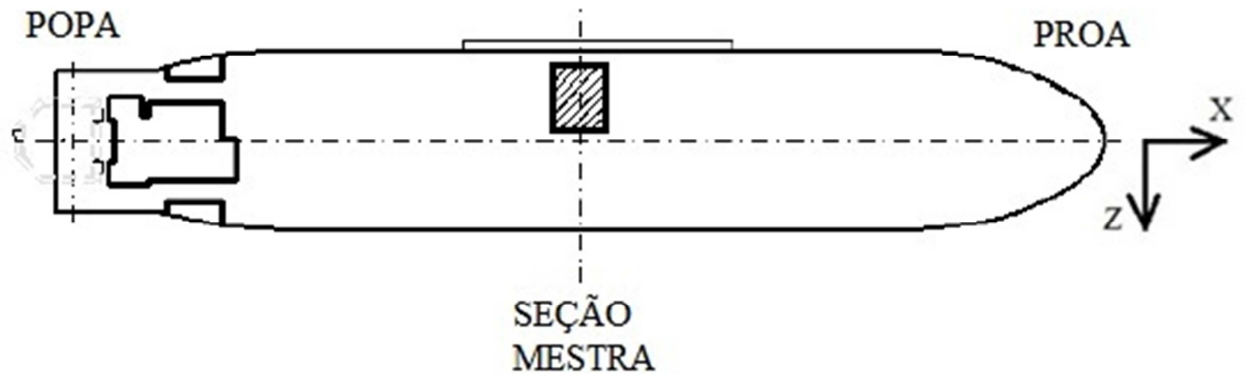


Figura 49 – Posição ocupada pelo módulo estudado.

Conforme apresentado anteriormente, os RAO's de momentos fletores de viga-navio foram obtidos na seção mestra da embarcação.

Estes momentos foram considerados constantes ao longo do trecho modelado no SACS. Esta aproximação é validada pela relação entre os comprimentos do módulo e embarcação (aproximadamente 5%).

- **Condições de contorno**

As condições de contorno foram aplicadas nas extremidades da viga representativa do casco. São as seguintes:

- Translação em X: liberada em uma das extremidades;
- Translações em Y e Z: restritas nas duas extremidades;
- Rotação em X: liberada em uma das extremidades;
- Rotações em Y e Z: liberadas nas duas extremidades.

Com base neste modelo de barras, são apresentados os esforços extraídos no ponto de estudo. É importante ressaltar que, devido à enorme rigidez global do casco, os momentos fletores de viga-navio, anteriormente denominados unitários, foram tomados como 1000000 kNm.

Tabela 4 – Esforços extraídos no ponto de interesse, em kN.

Momento Fletor Vertical (VWBM)		Momento Fletor Horizontal (HWBM)	
Ny	3,68	Ny	-0,19
Vx	-0,18	Vx	0,08
Vz	0,00	Vz	0,02
My	0,00	My	-0,01
Mx	0,00	Mx	0,01
Mz	-0,20	Mz	0,09

Na sequência, foi elaborado um modelo em Elementos Finitos, no ANSYS, representando o conjunto coluna/chapa gusset e um trecho da estrutura do casco.

A Figura 50 ilustra as dimensões da chapa *gusset*.

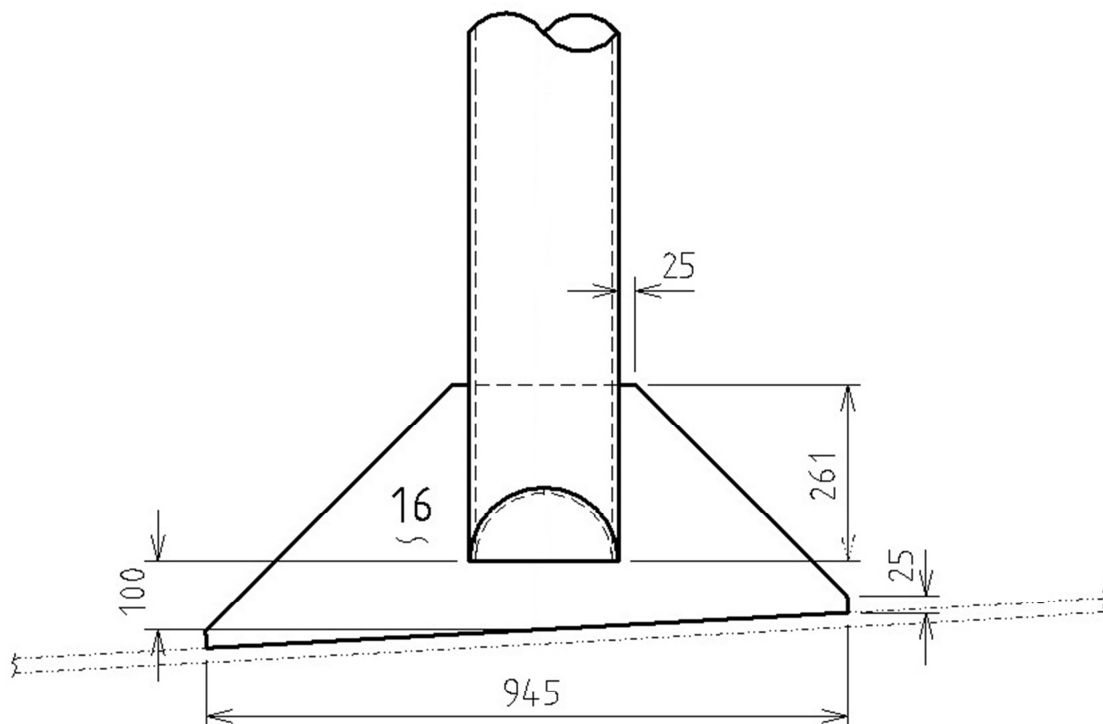


Figura 50 – Detalhe da chapa Gusset, em milímetros.

A Figura 51 ilustra este modelo, assim como suas condições de contorno, indicando as restrições de translação para as extremidades.

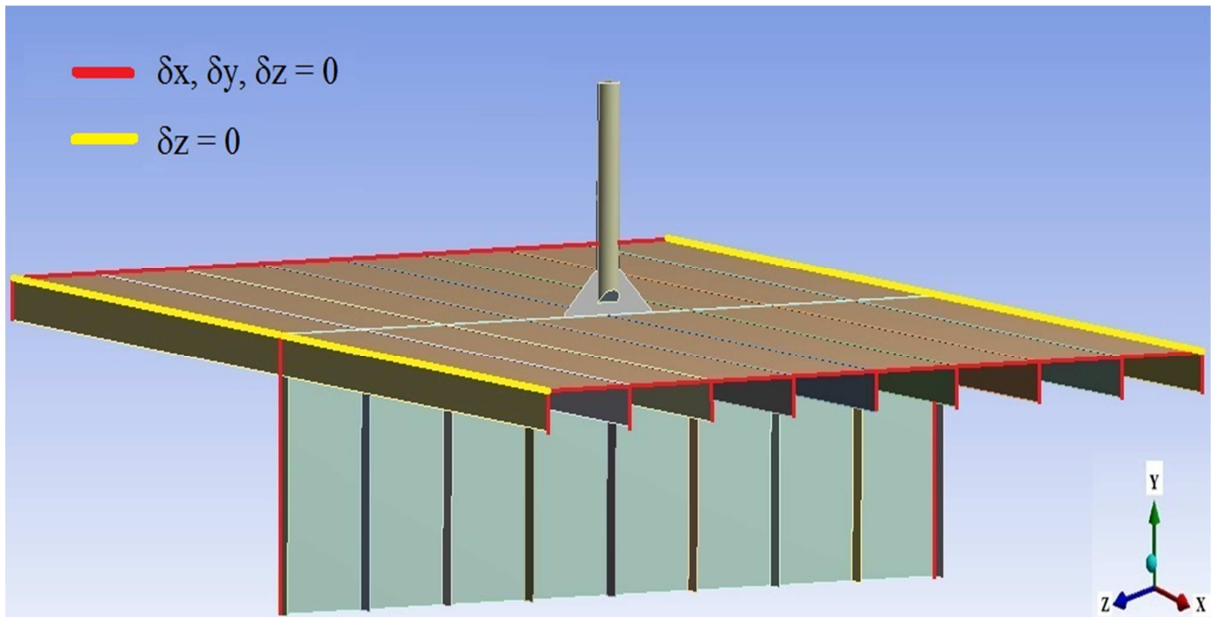


Figura 51 – Modelo e condições de contorno (ANSYS).

O tamanho dos elementos da malha, na região de interesse, foi da ordem da espessura da chapa gusset, 16 mm (Figura 52).

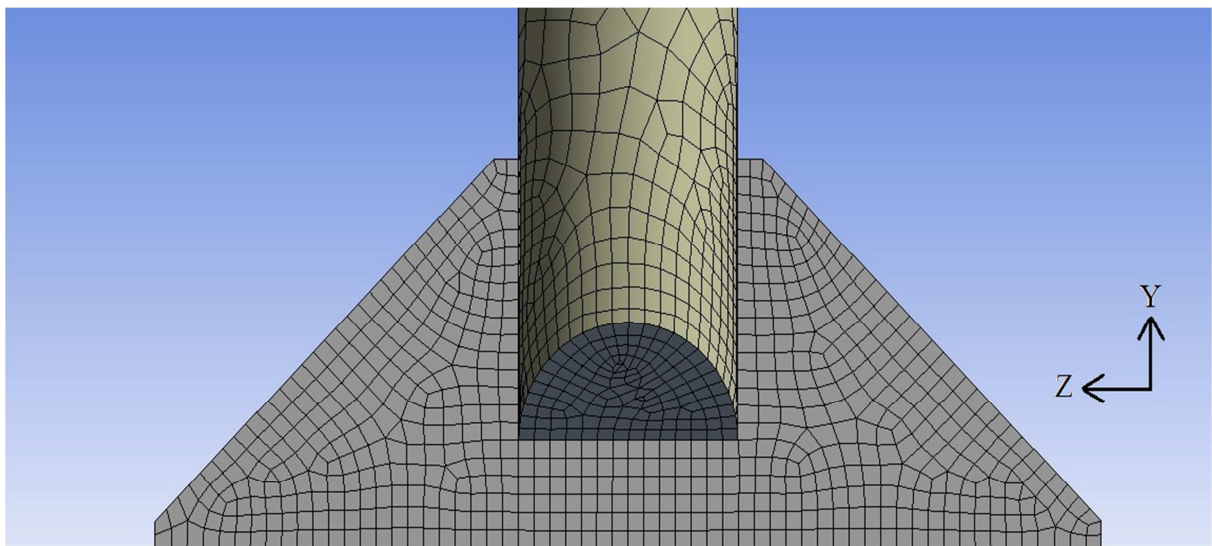


Figura 52 – Refinamento da malha na região de interesse (ANSYS).

Para cada ação unitária (N_y , V_x , V_z , M_y , M_x e M_z), foram extraídas as tensões σ_y , σ_z , e τ_{yz} , para as faces *top* e *bottom*, nos pontos de interesse. A face denominada *top* é aquela cujo vetor normal à chapa gusset aponta para o sentido +X (sentido popa-proa).

As figuras 53 a 88 ilustram os *plots* destas tensões.

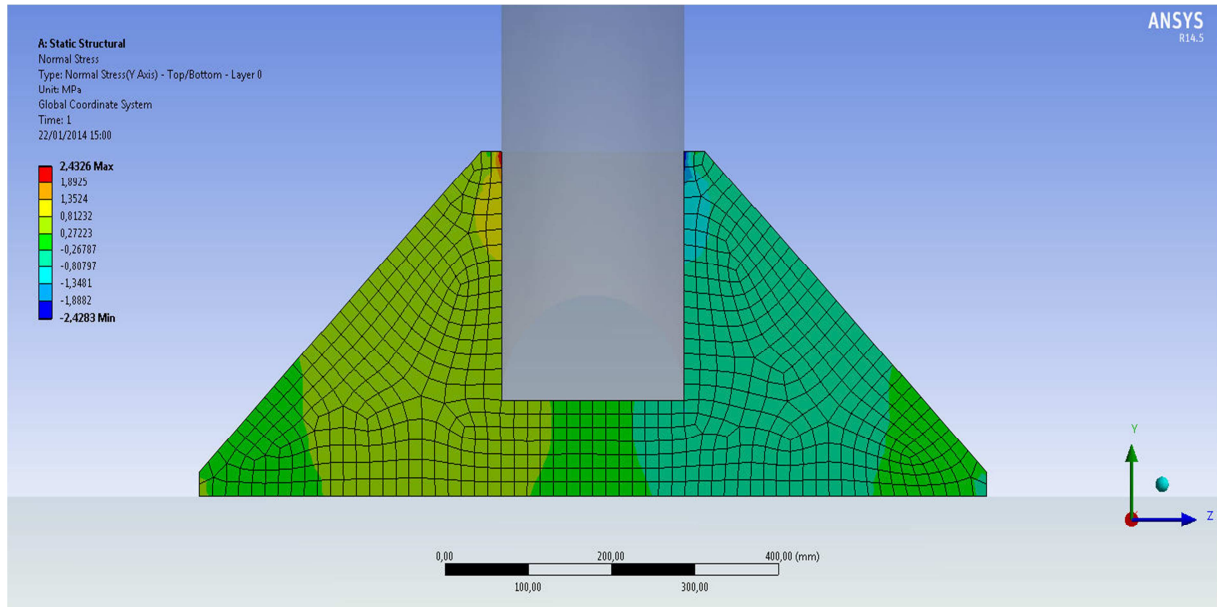


Figura 53 – Ação M_x , tensão σ_y , face *bottom* (ANSYS).

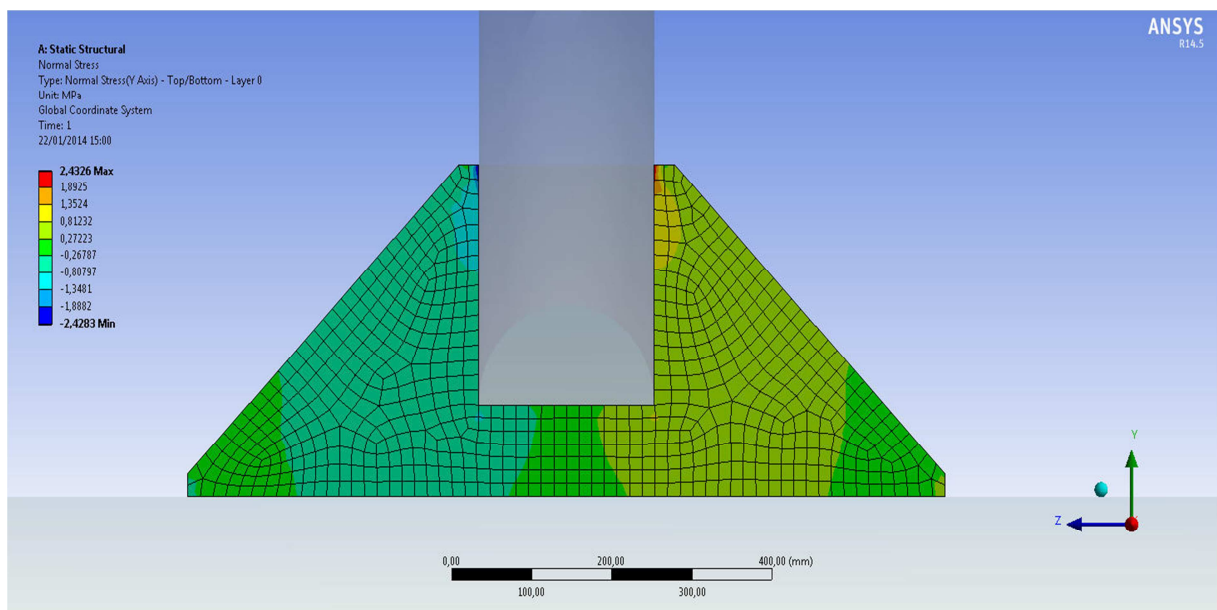


Figura 54 – Ação M_x , tensão σ_y , face *top* (ANSYS).

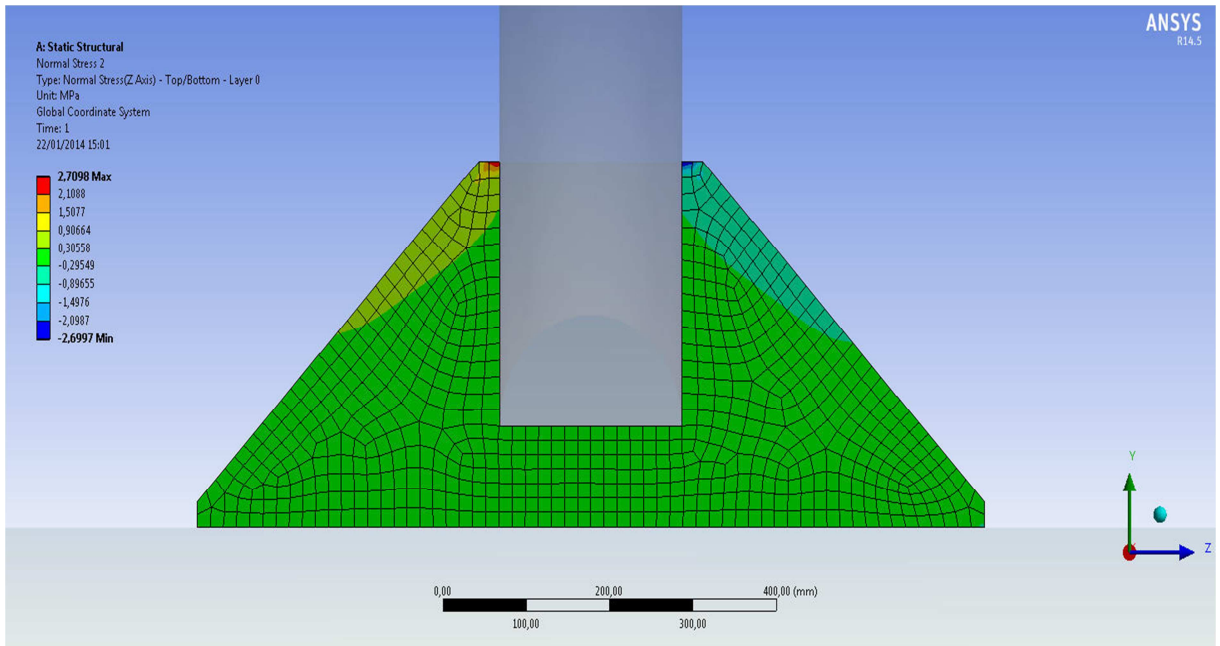


Figura 55 – Ação M_x , tensão σ_z , face *bottom* (ANSYS).

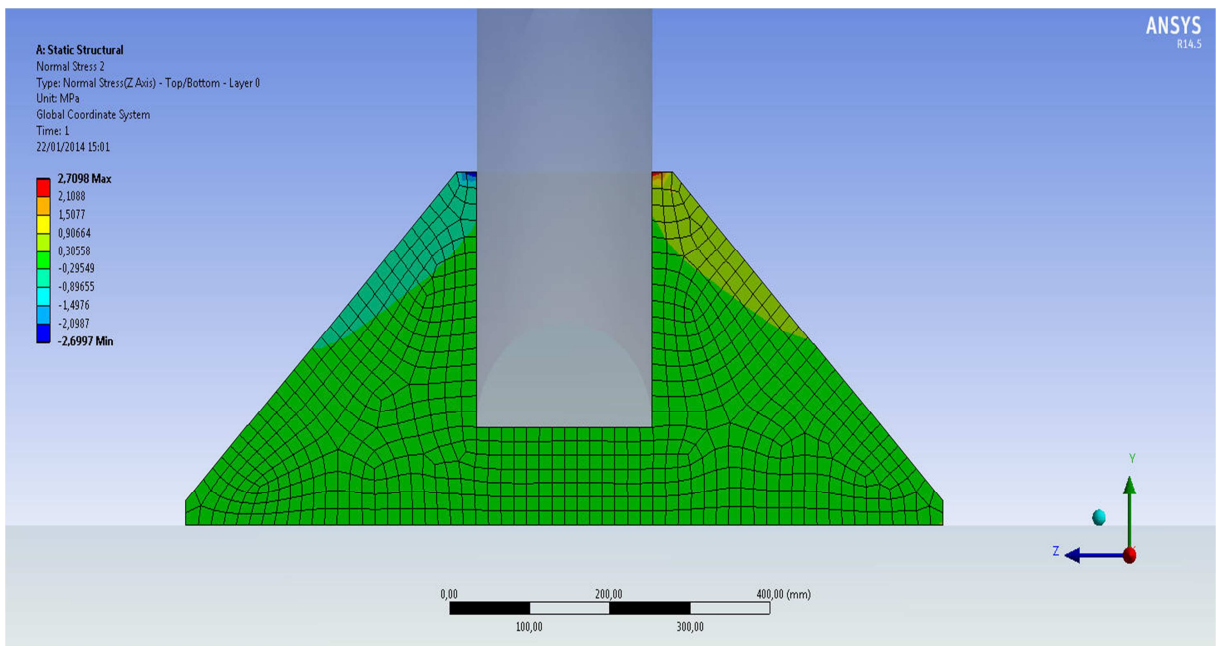


Figura 56 – Ação M_x , tensão σ_z , face *top* (ANSYS).

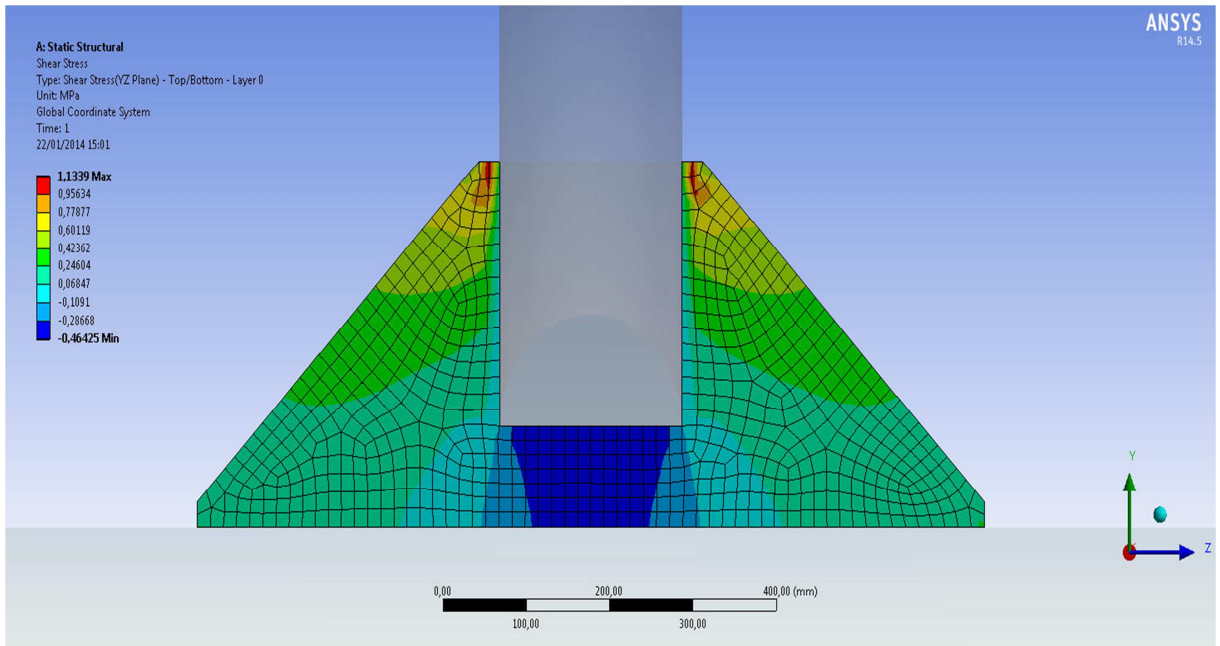


Figura 57 – Ação M_x , tensão τ_{YZ} , face *bottom* (ANSYS).

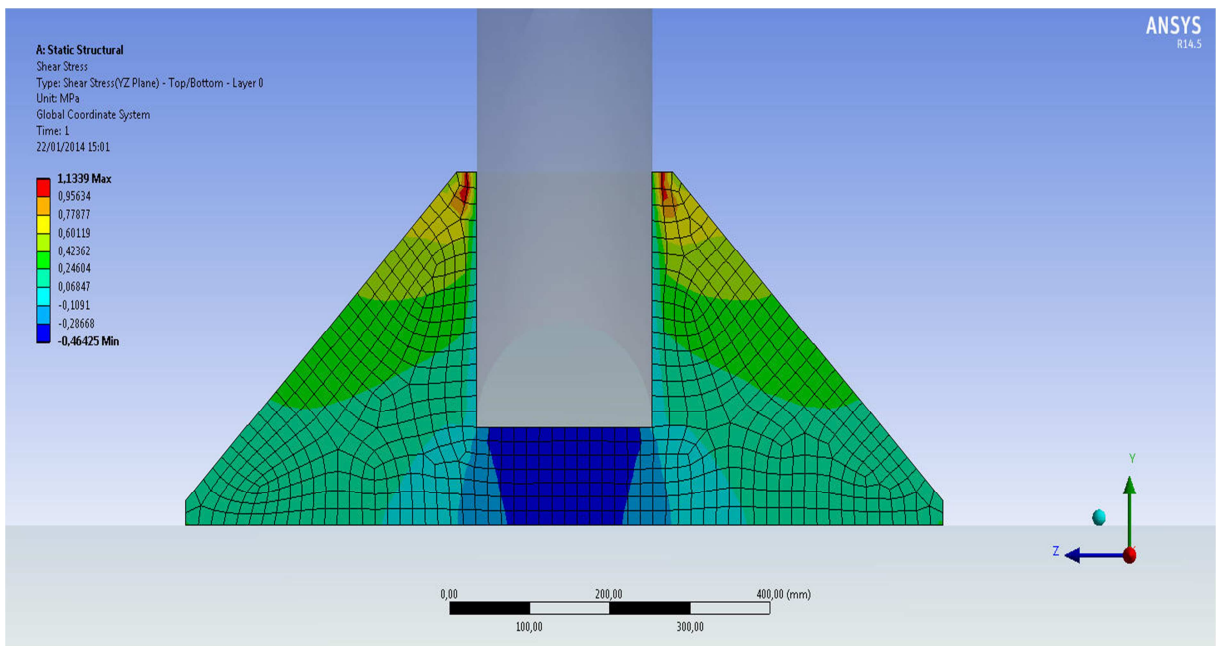


Figura 58 – Ação M_x , tensão τ_{YZ} , face *top* (ANSYS).

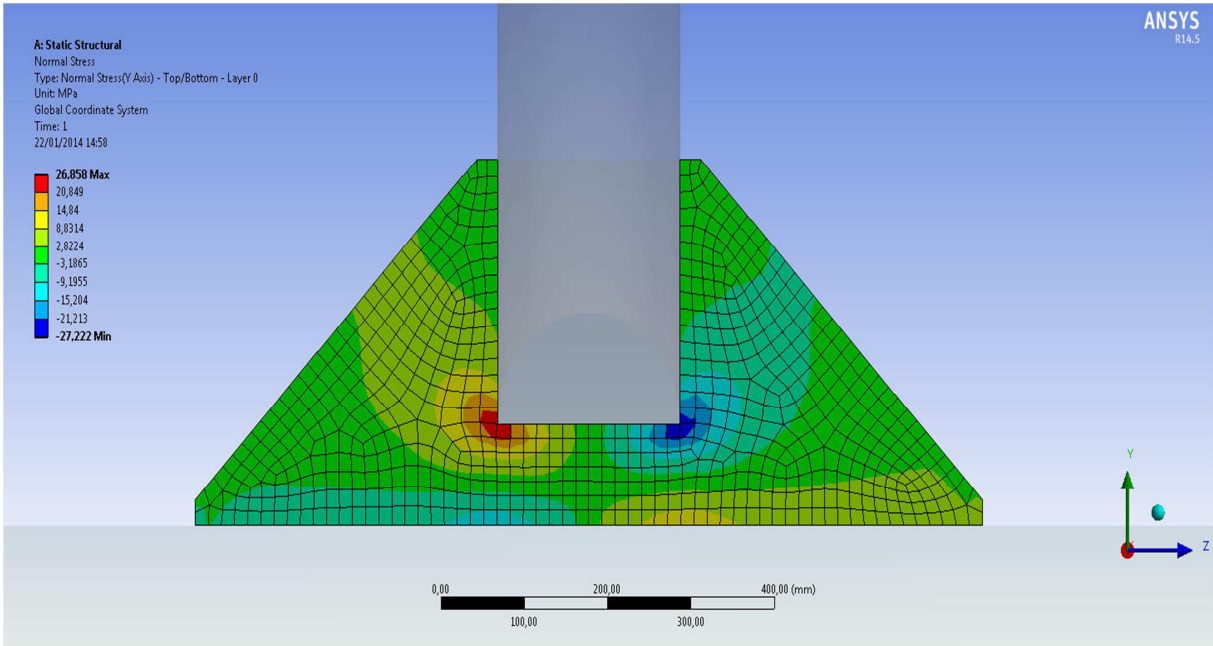


Figura 59 – Ação M_y , tensão σ_y , face *bottom* (ANSYS).

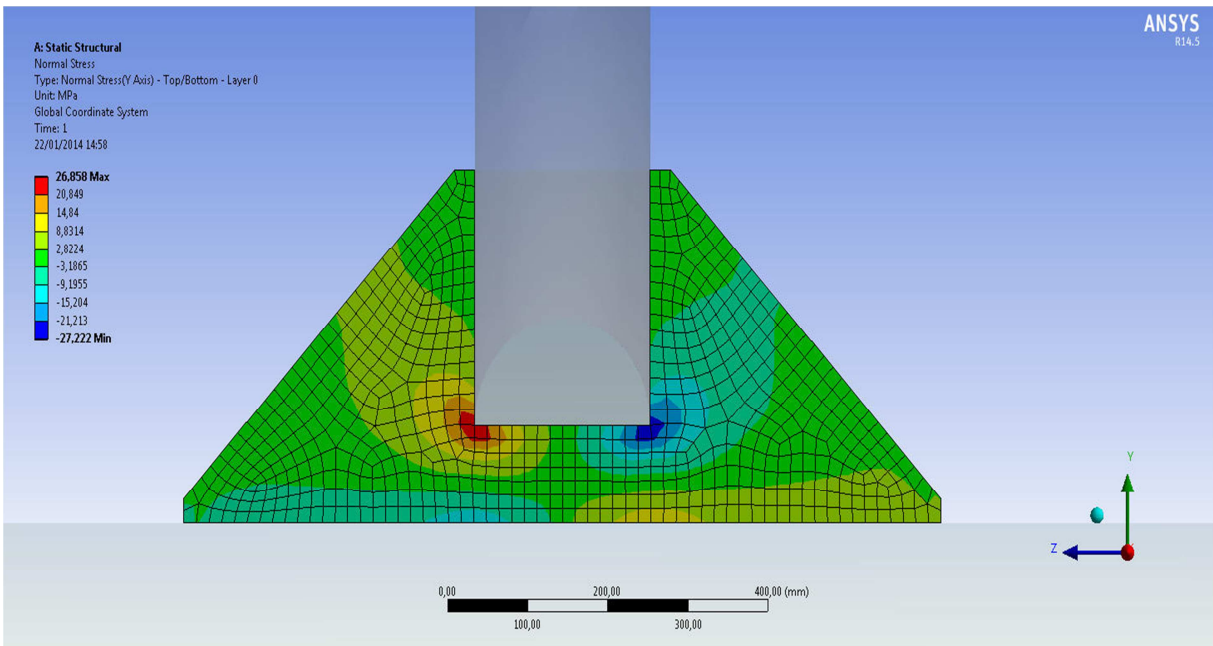


Figura 60 – Ação M_y , tensão σ_y , face *top* (ANSYS).

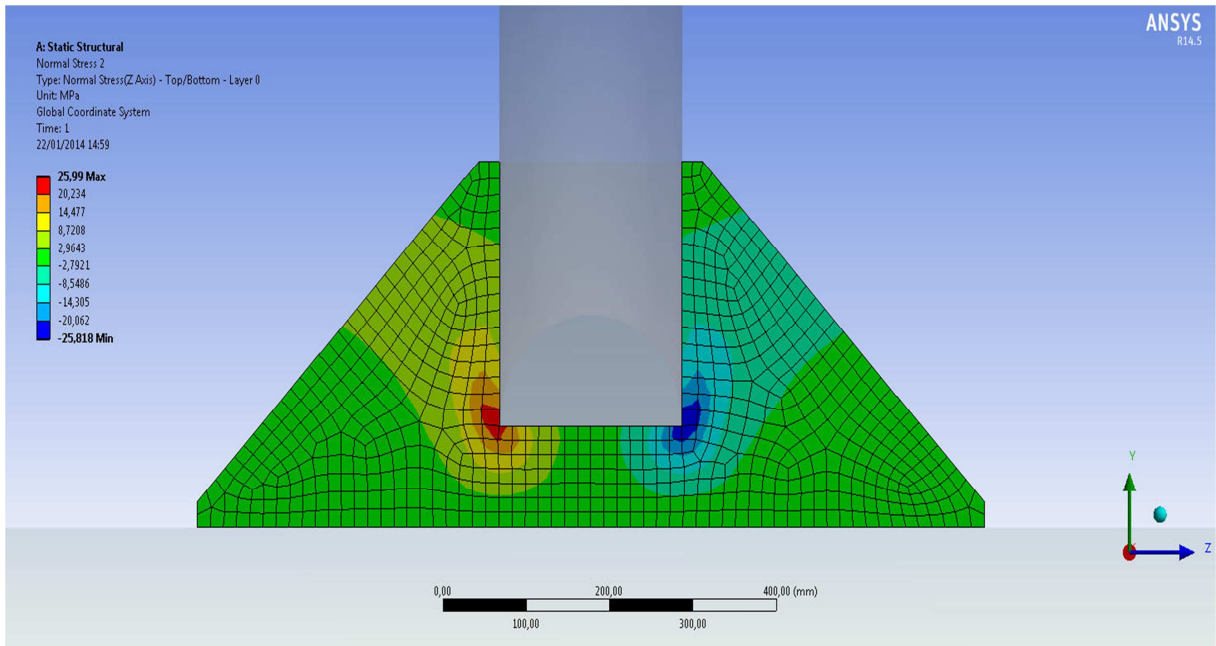


Figura 61 – Ação M_y , tensão σ_z , face *bottom* (ANSYS).

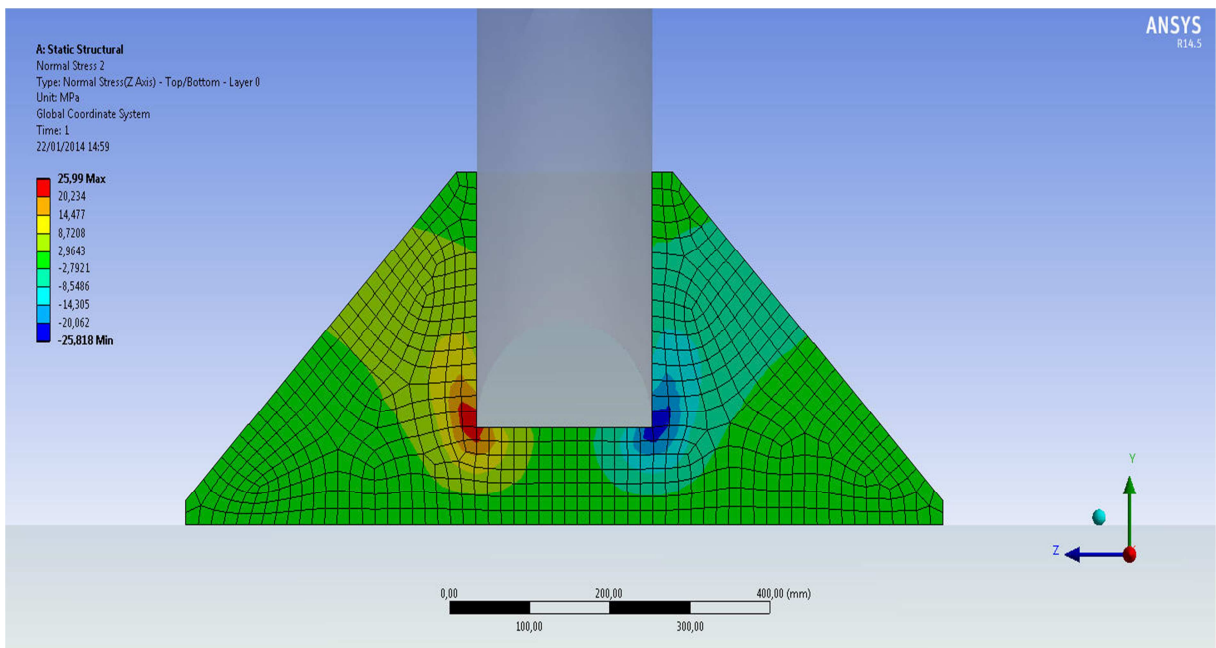


Figura 62 – Ação M_y , tensão σ_z , face *top* (ANSYS).

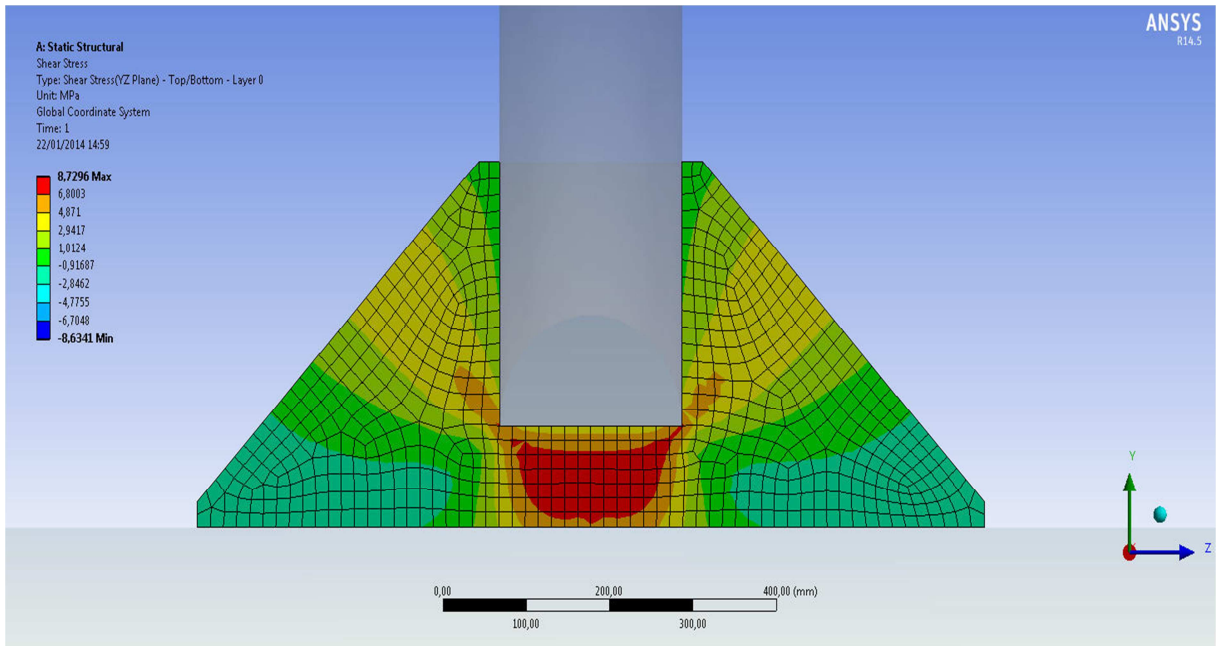


Figura 63 – Ação My, tensão τ_{YZ} , face *bottom* (ANSYS).

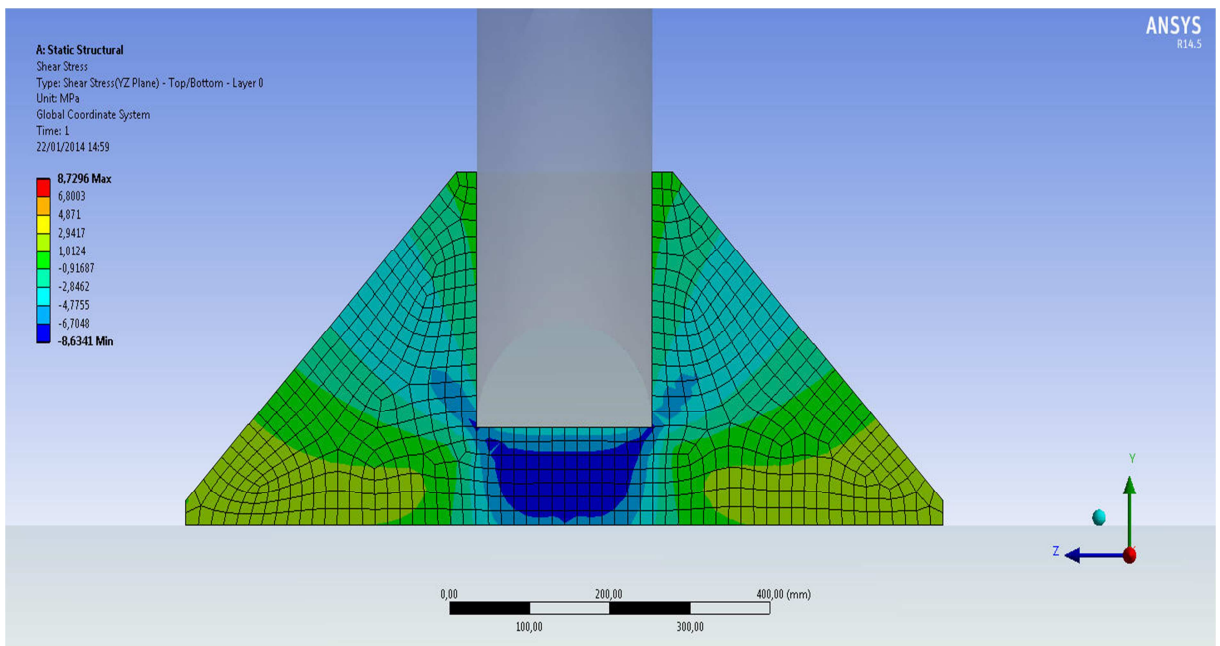


Figura 64 – Ação My, tensão τ_{YZ} , face *top* (ANSYS).

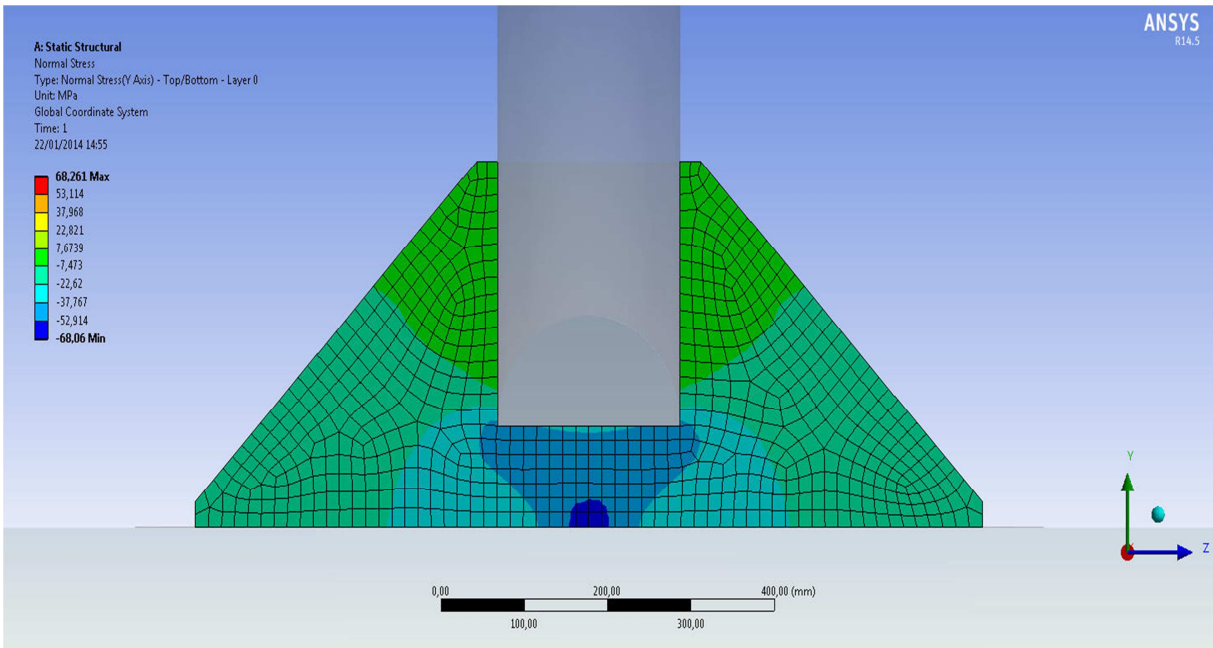


Figura 65 – Ação M_z , tensão σ_y , face *bottom* (ANSYS).

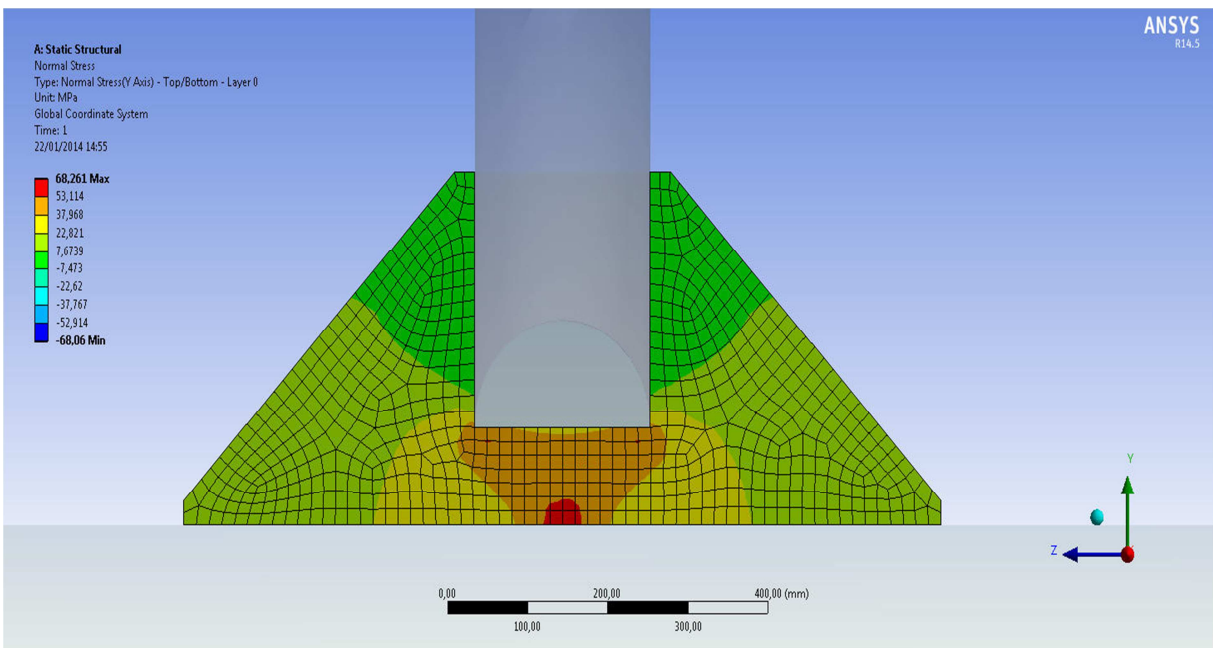


Figura 66 – Ação M_z , tensão σ_y , face *top* (ANSYS).

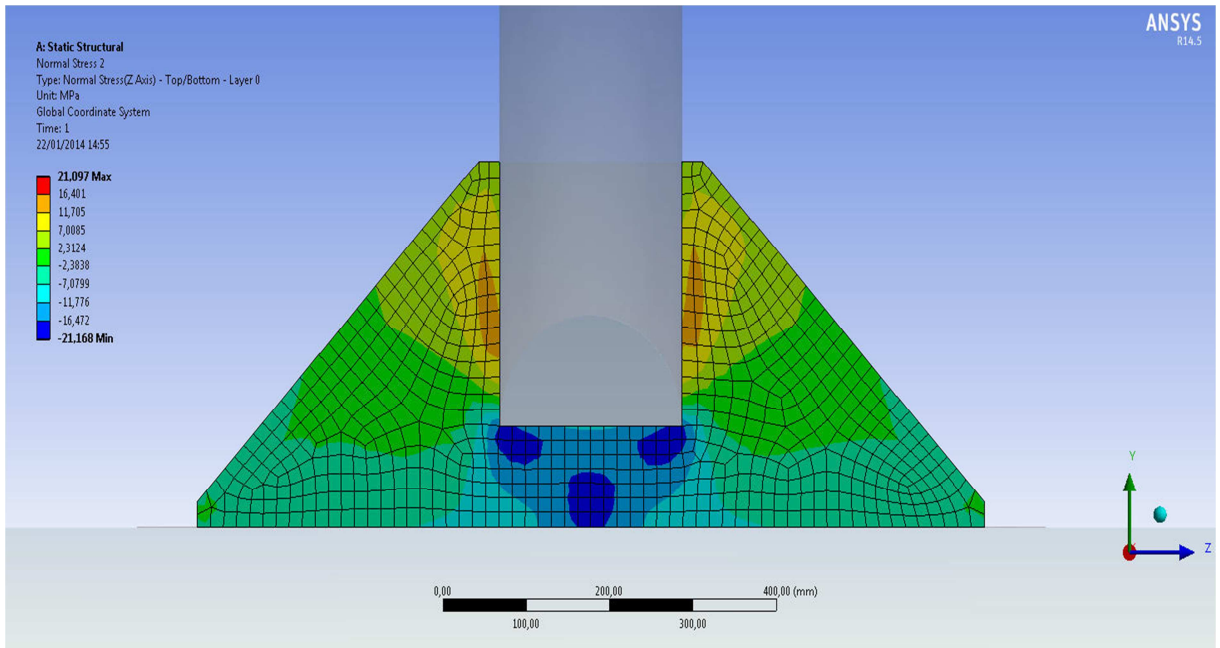


Figura 67 – Ação M_z , tensão σ_z , face *bottom* (ANSYS).

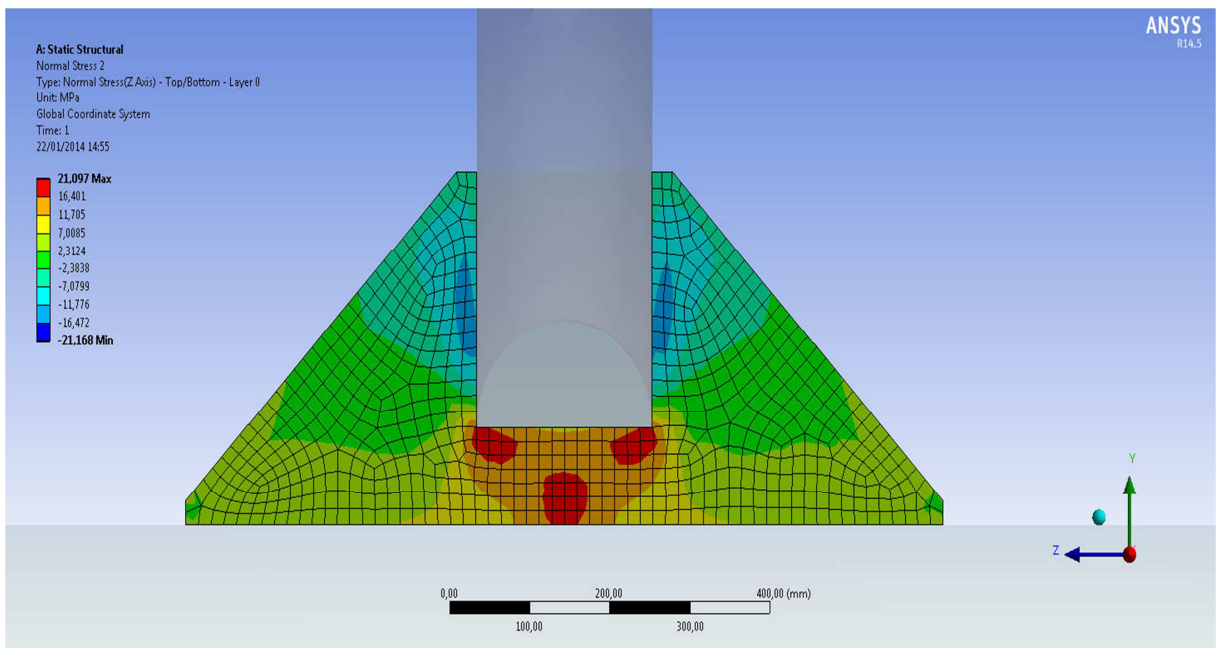


Figura 68 – Ação M_z , tensão σ_z , face *top* (ANSYS).

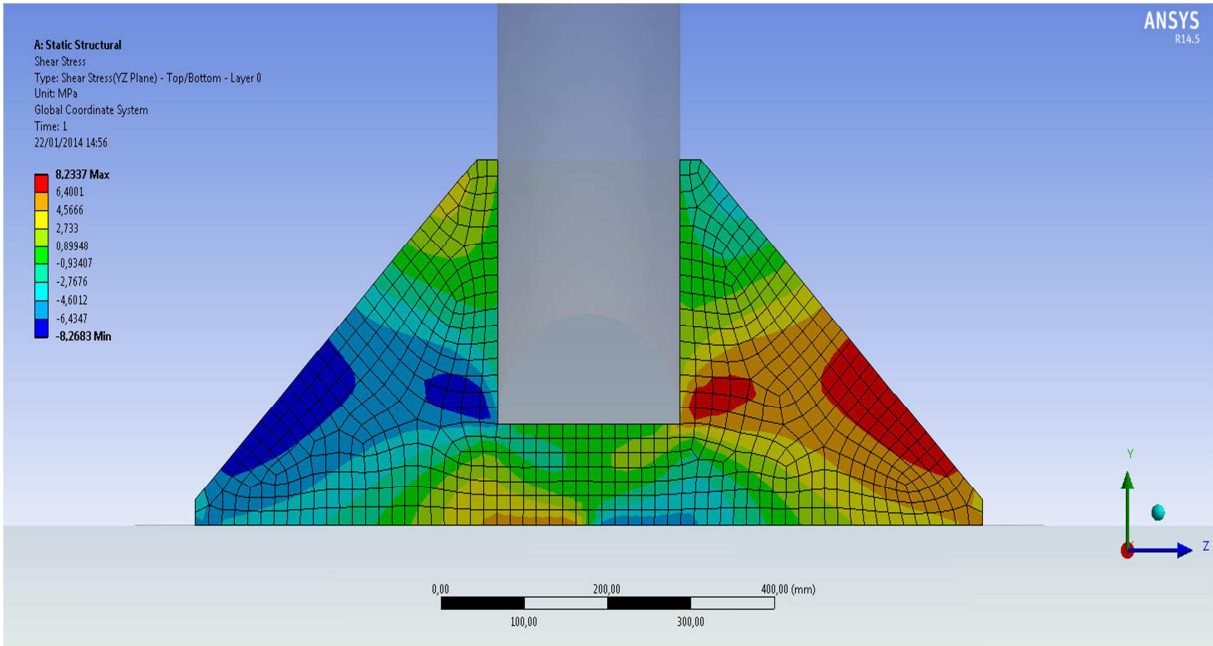


Figura 69 – Ação M_z , tensão τ_{YZ} , face *bottom* (ANSYS).

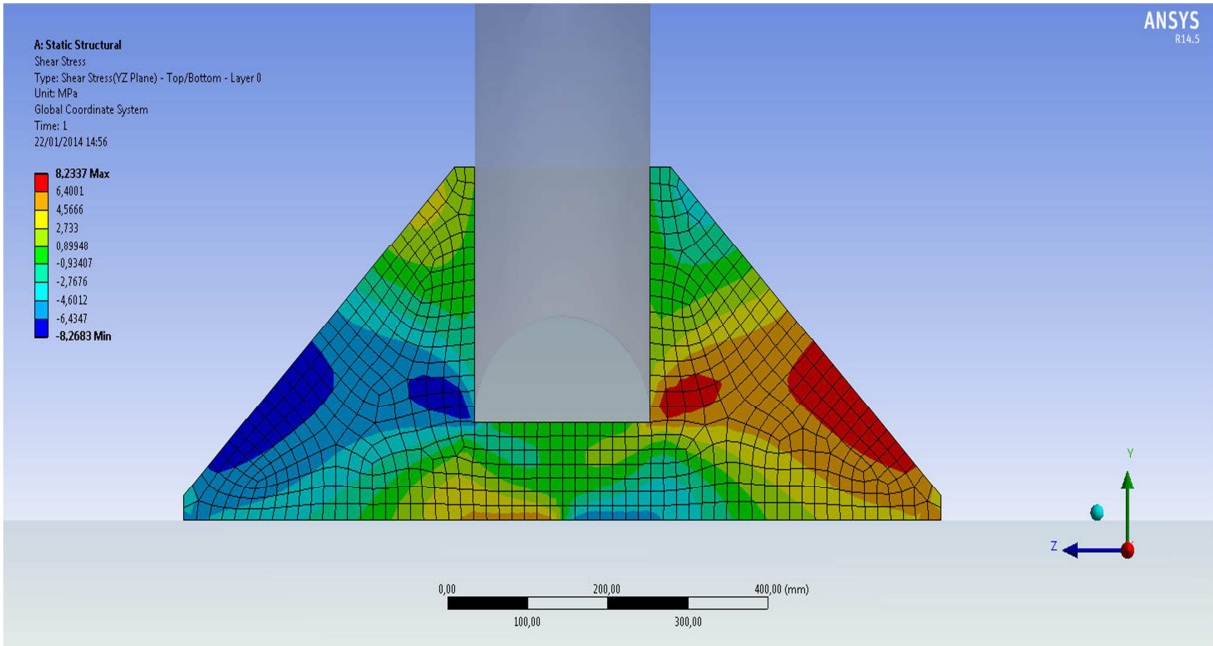


Figura 70 – Ação M_z , tensão τ_{YZ} , face *top* (ANSYS).

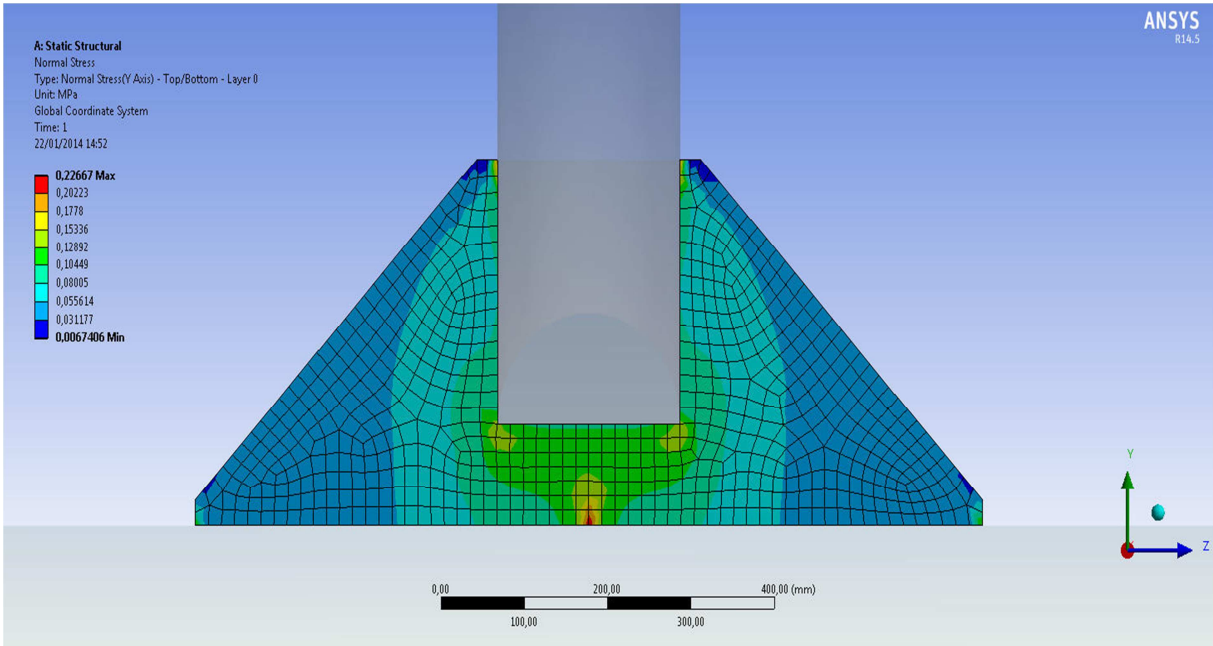


Figura 71 – Ação Ny, tensão σ_y , face *bottom* (ANSYS).

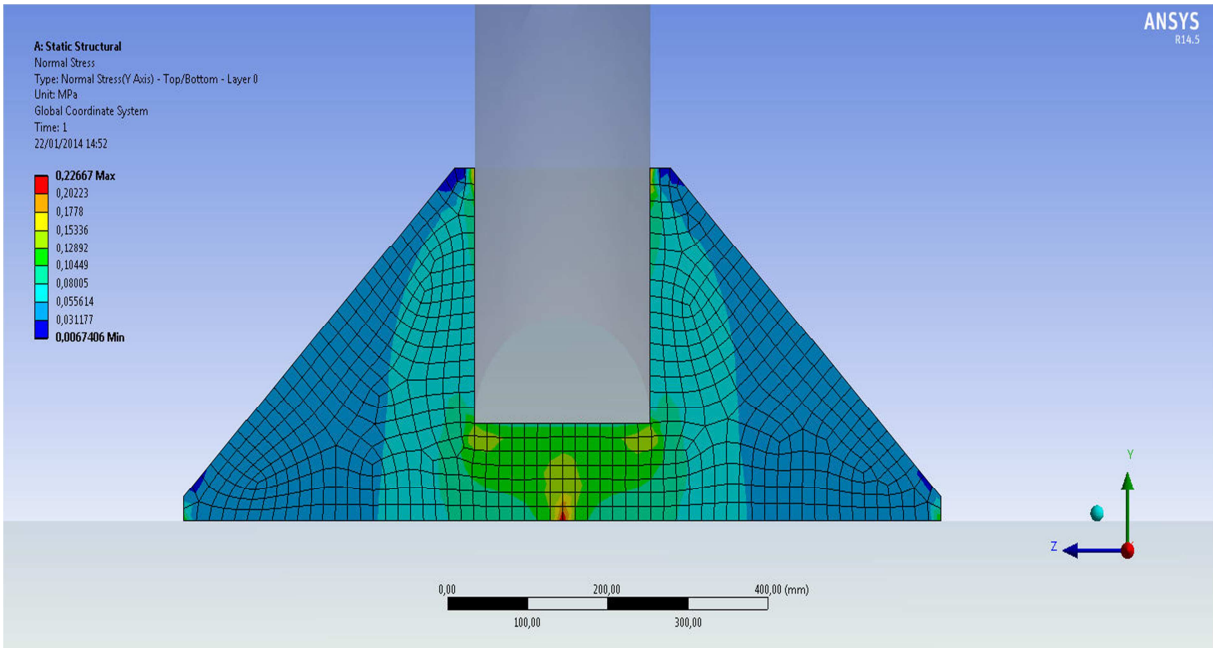


Figura 72 – Ação Ny, tensão σ_y , face *top* (ANSYS).

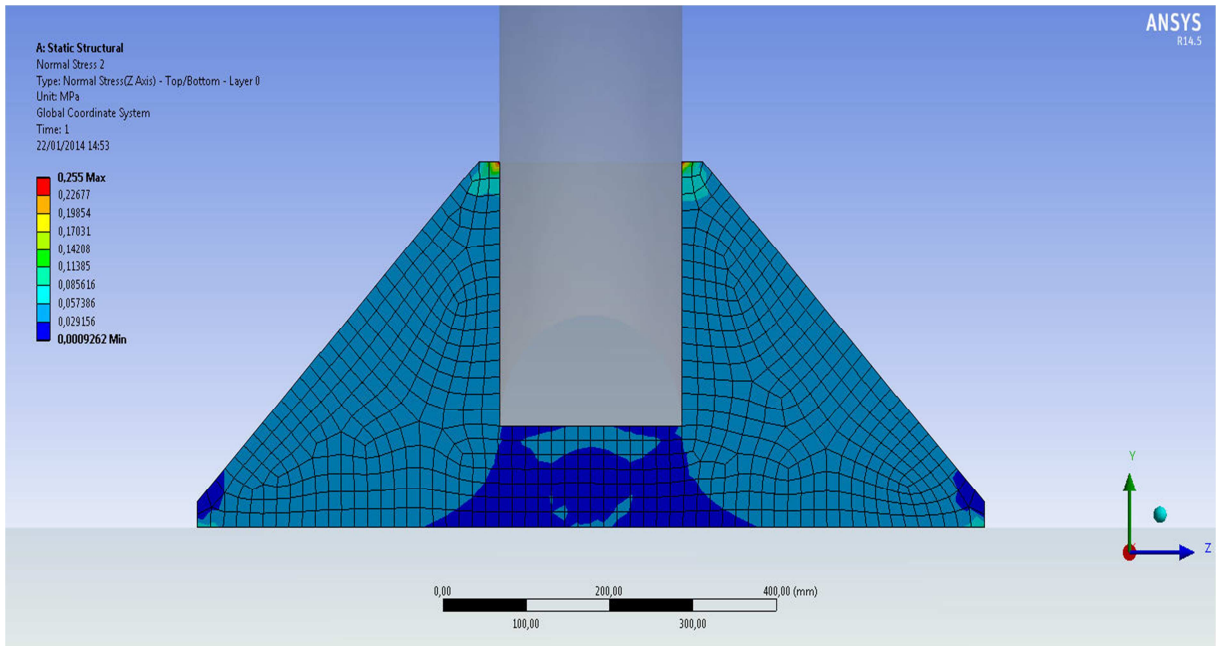


Figura 73 – Ação Ny, tensão σ_z , face *bottom* (ANSYS).

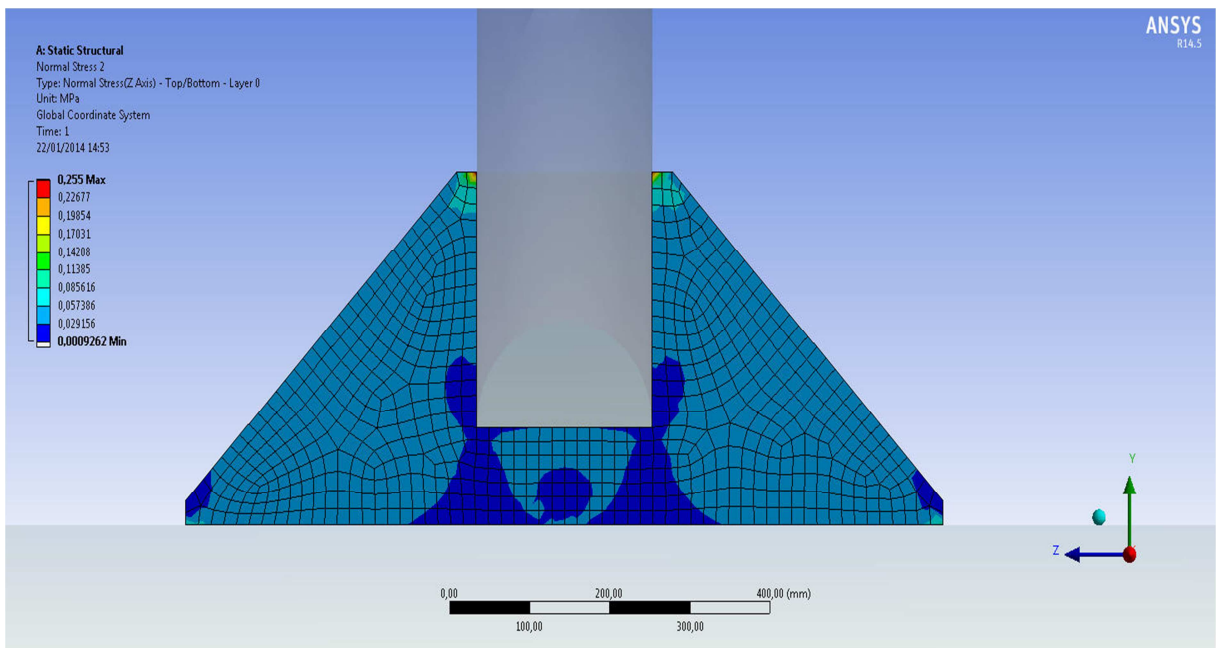


Figura 74 – Ação Ny, tensão σ_z , face *top* (ANSYS).

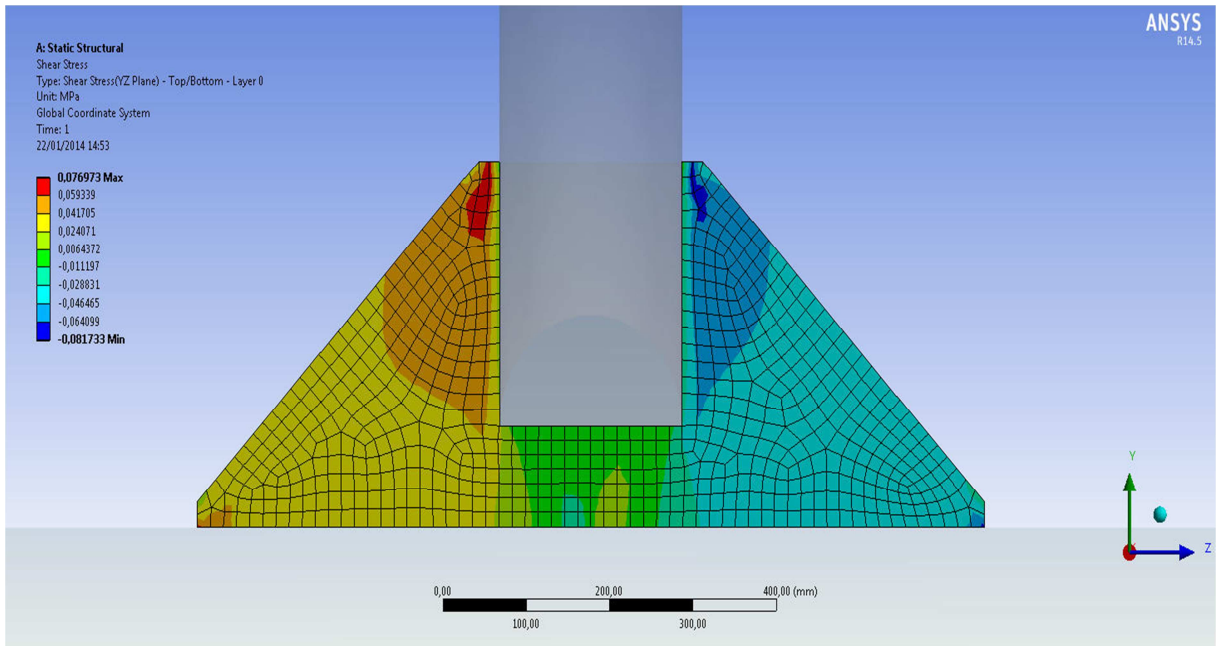


Figura 75 – Ação N_y , tensão τ_{YZ} , face *bottom* (ANSYS).

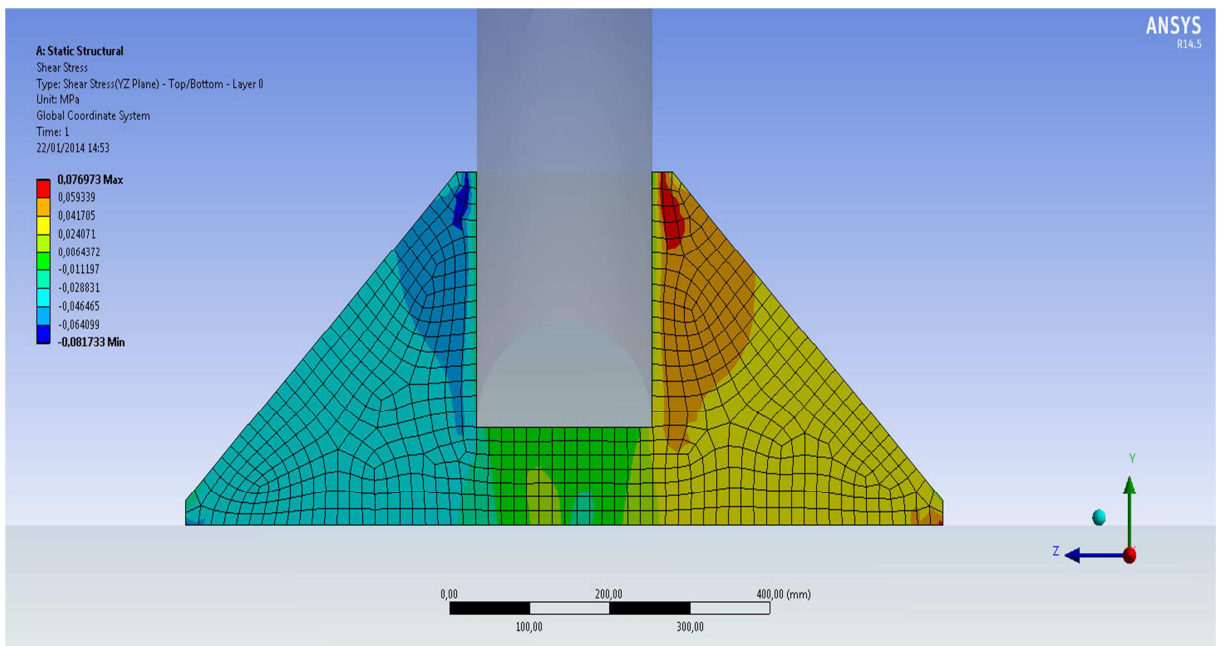


Figura 76 – Ação N_y , tensão τ_{YZ} , face *top* (ANSYS).

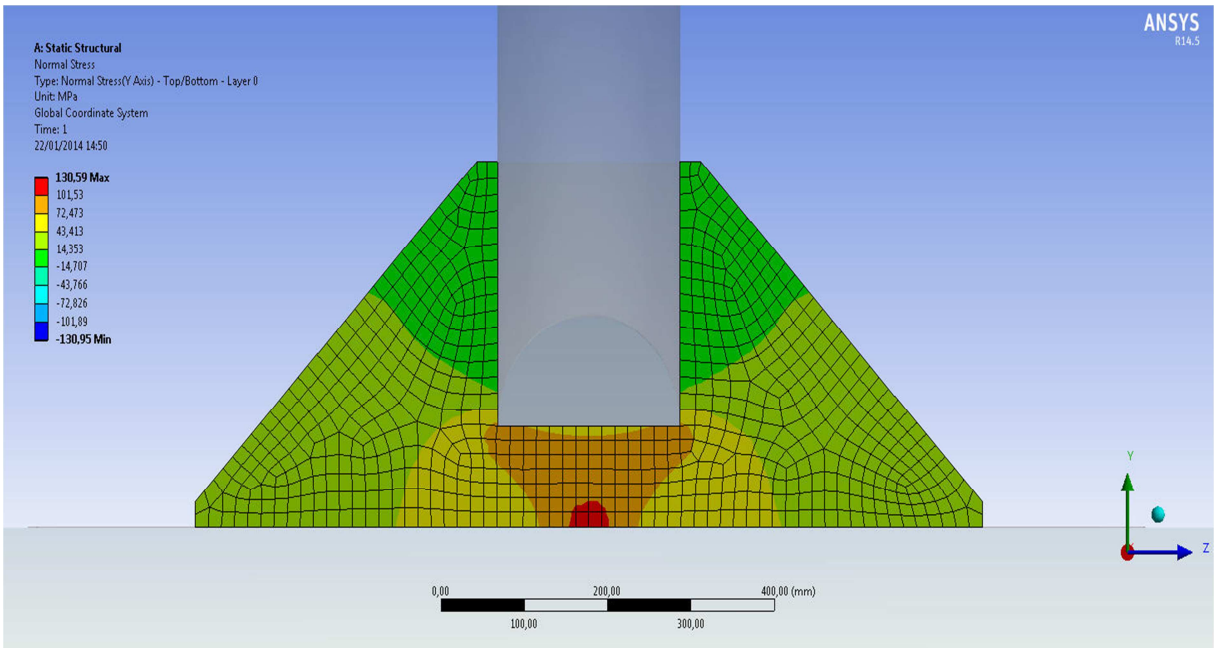


Figura 77 – Ação V_x , tensão σ_y , face *bottom* (ANSYS).

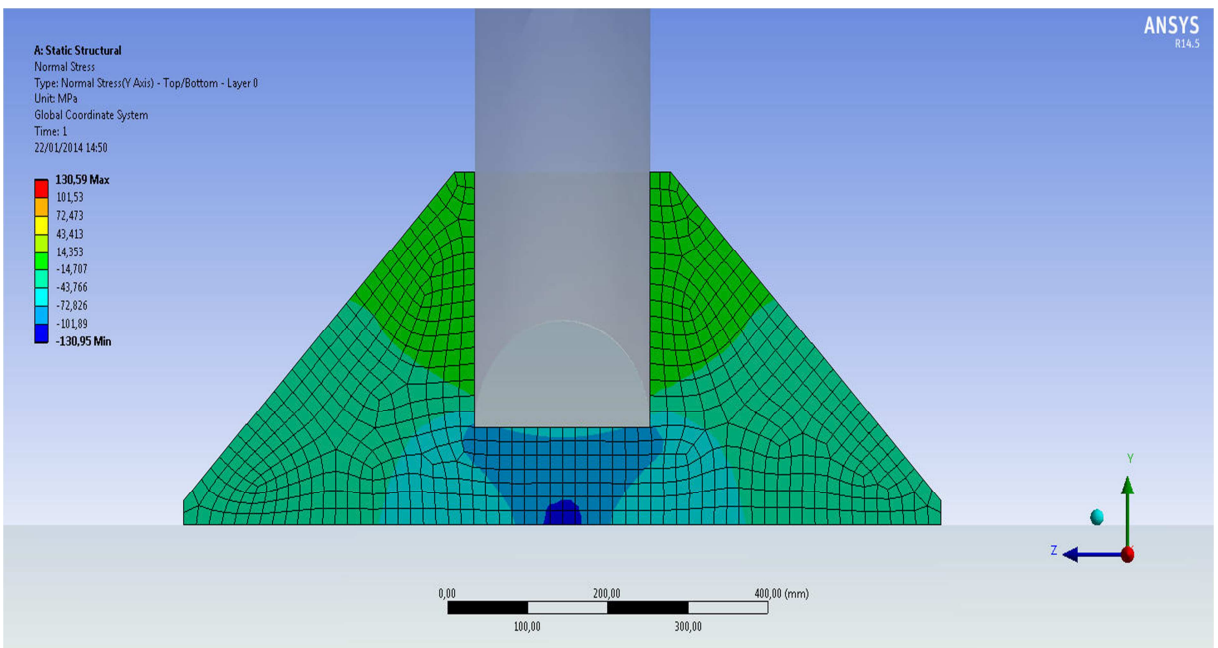


Figura 78 – Ação V_x , tensão σ_y , face *top* (ANSYS).

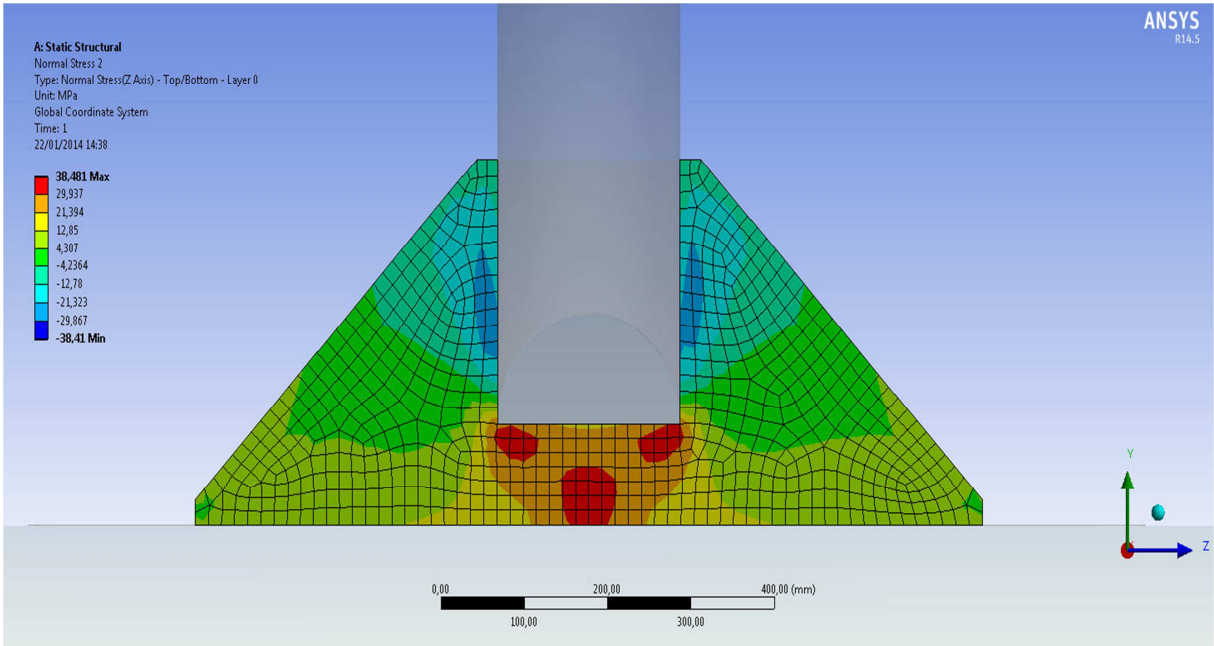


Figura 79 – Ação V_x , tensão σ_z , face *bottom* (ANSYS).

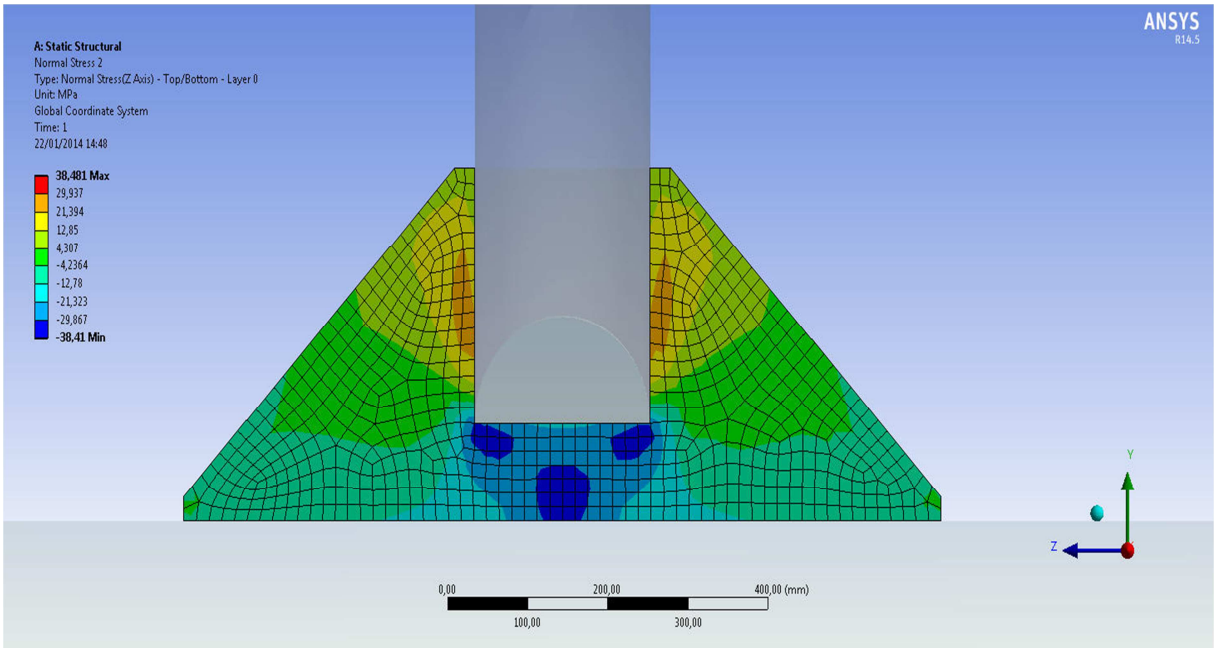


Figura 80 – Ação V_x , tensão σ_z , face *top* (ANSYS).

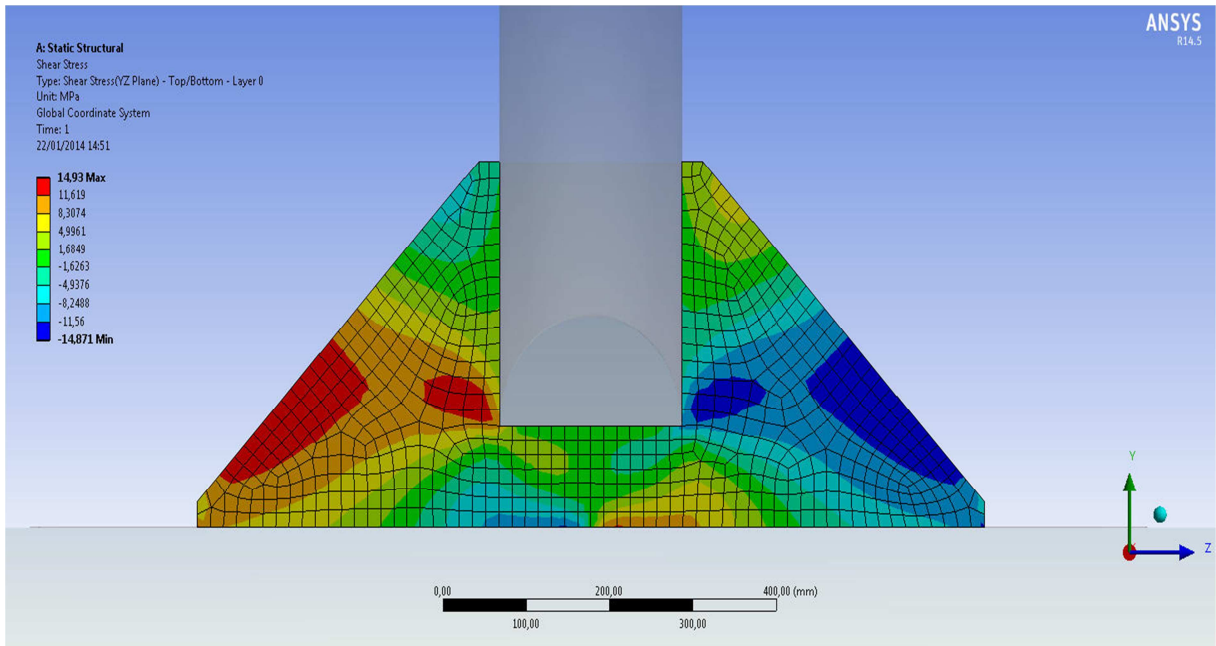


Figura 81 – Ação V_x , tensão τ_{YZ} , face *bottom* (ANSYS).

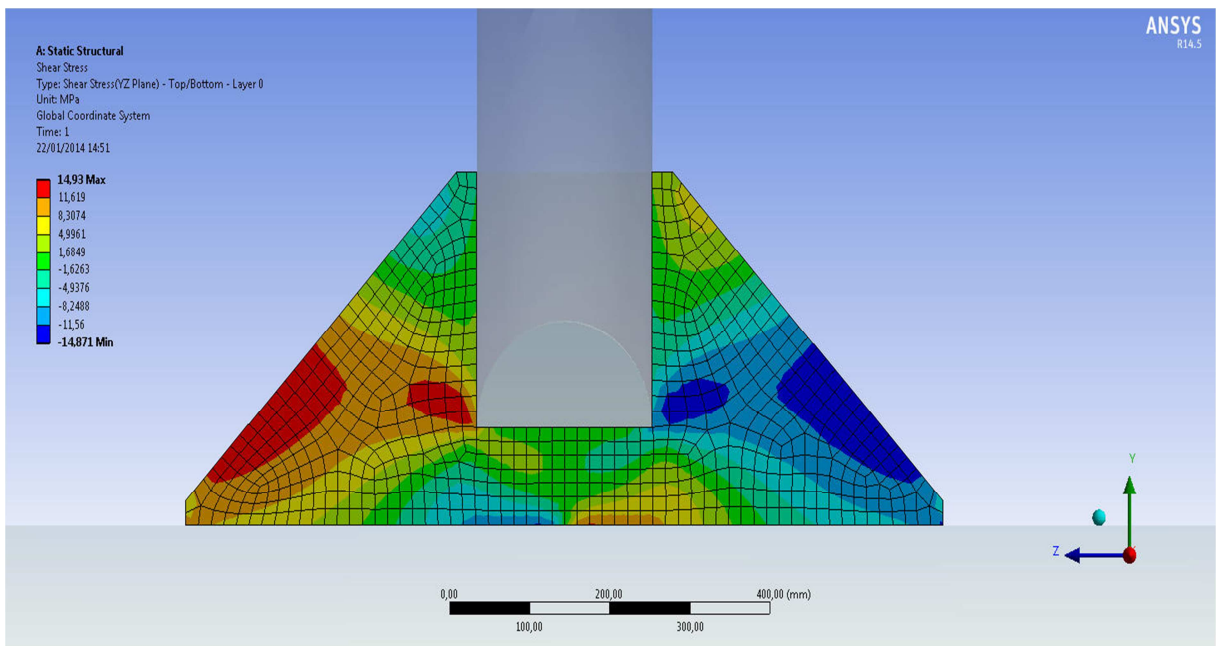


Figura 82 – Ação V_x , tensão τ_{YZ} , face *top* (ANSYS).

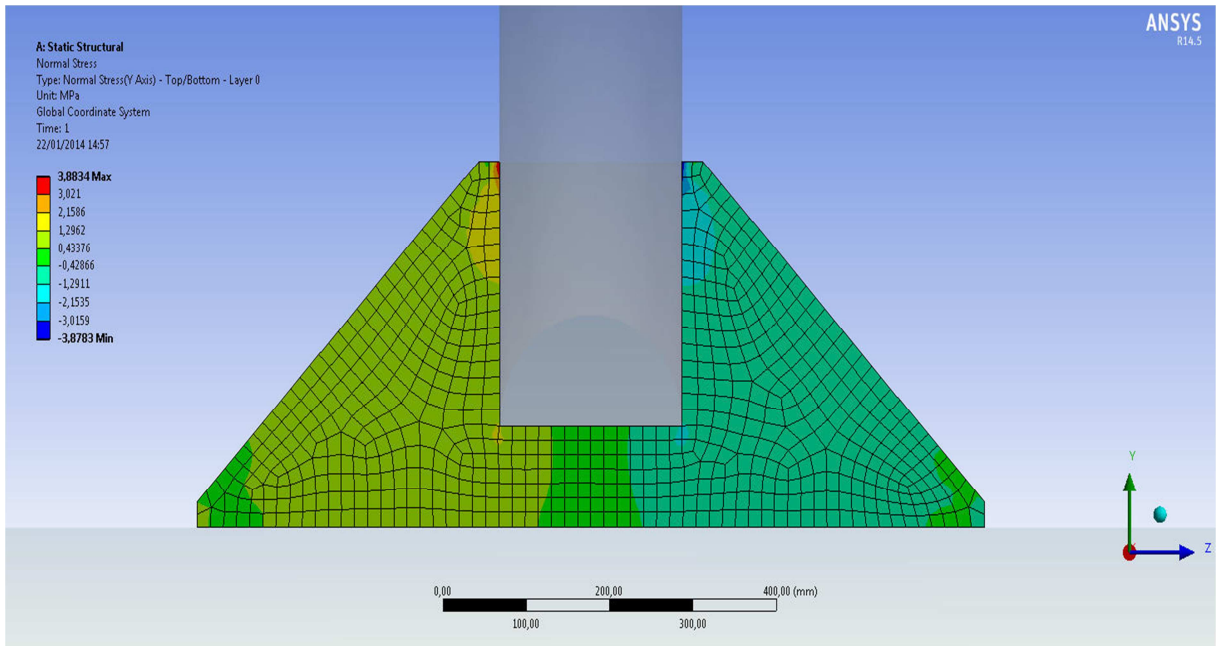


Figura 83 – Ação Vz, tensão σ_Y , face *bottom* (ANSYS).

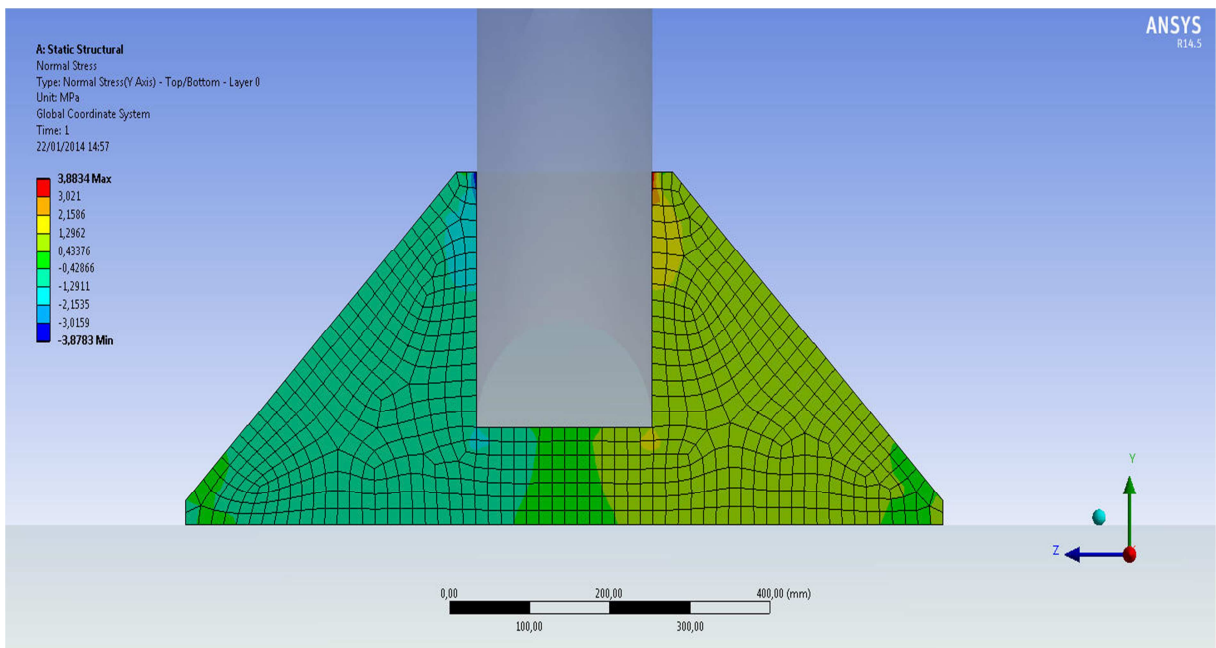


Figura 84 – Ação Vz, tensão σ_Y , face *top* (ANSYS).

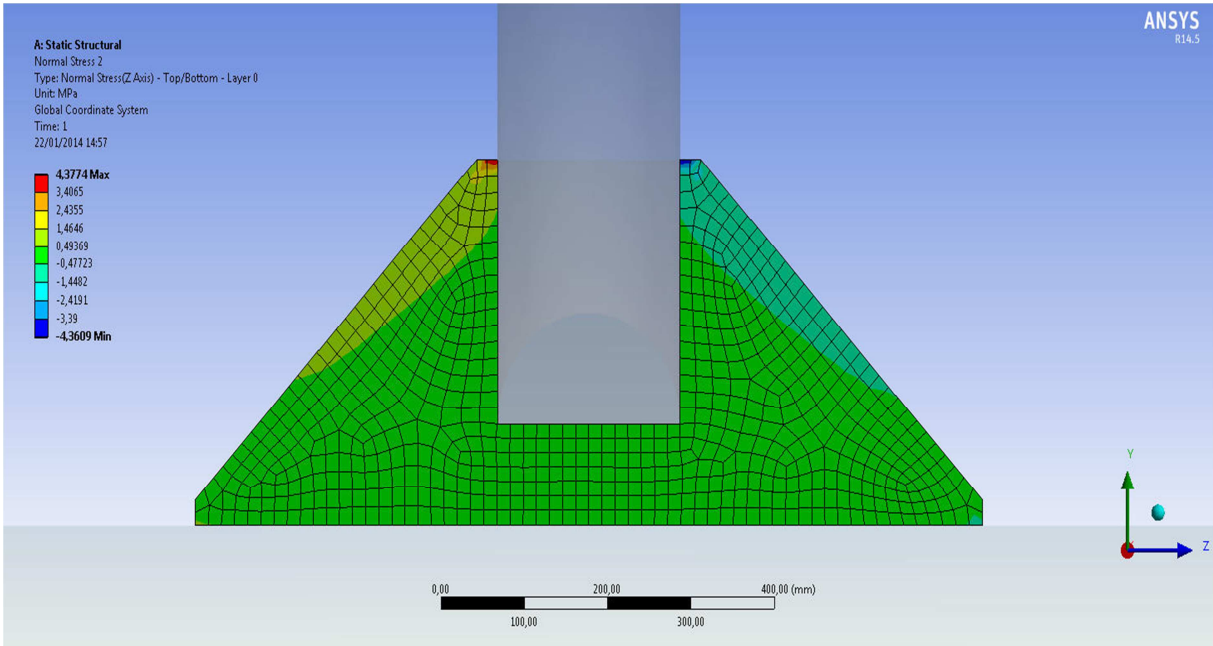


Figura 85 – Ação Vz, tensão σ_z , face *bottom* (ANSYS).

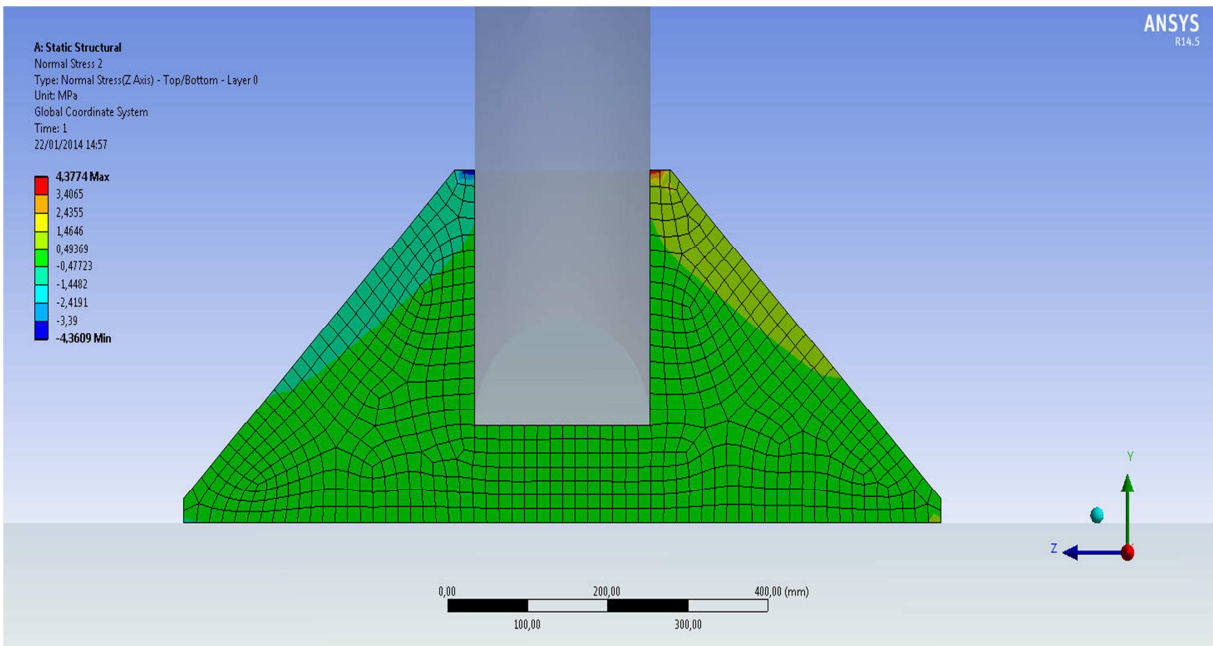


Figura 86 – Ação Vz, tensão σ_z , face *top* (ANSYS).

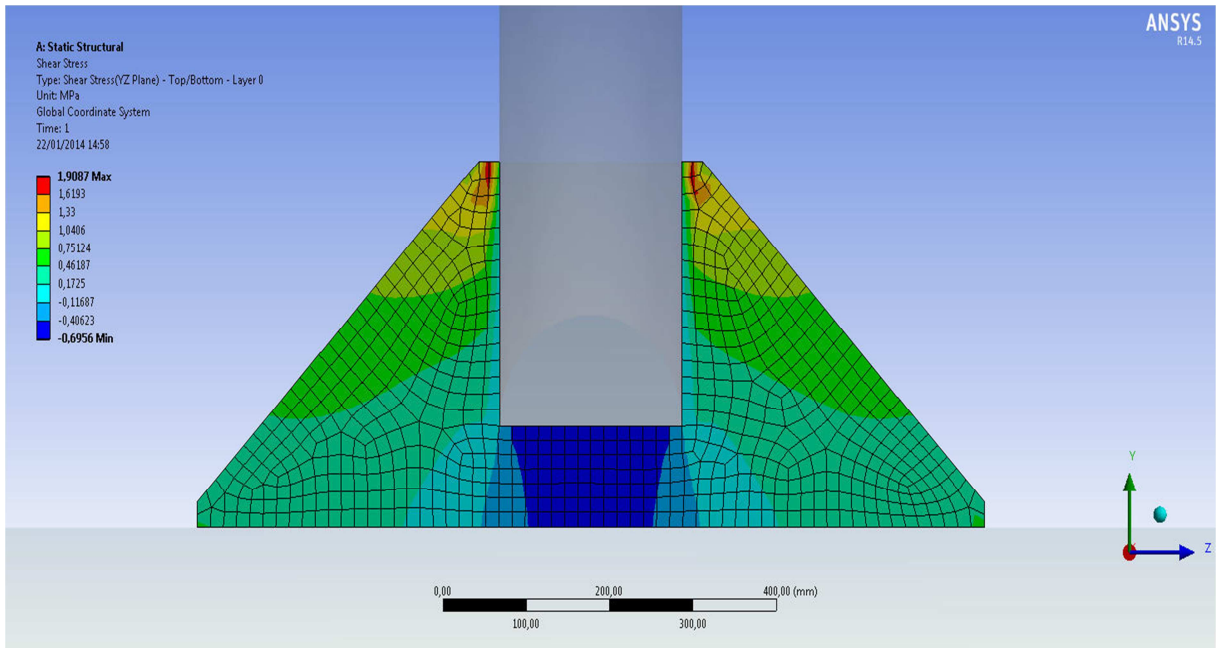


Figura 87 – Ação Vz, tensão τ_{YZ} , face *bottom* (ANSYS).

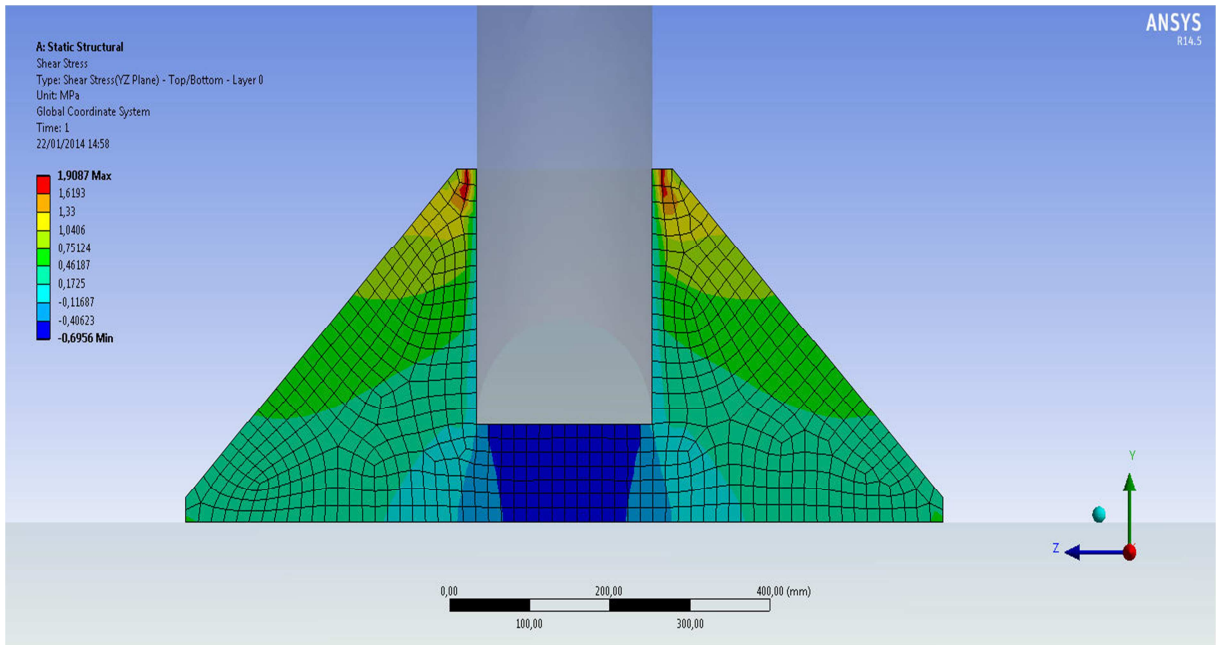


Figura 88 – Ação Vz, tensão τ_{YZ} , face *top* (ANSYS).

Os resultados obtidos nos modelos, realizados no SACS e ANSYS, foram armazenados e, com auxílio de planilhas Excel, deram origem aos RAO's de tensão principal. Neste momento, são contabilizados os efeitos para os esforços reais, que compõem os RAO's de esforços seccionais do navio. Estas planilhas contemplam a sequência descrita na Figura 33.

Cabe ressaltar que, dentro do conceito de RAO, os gráficos apresentados a seguir representam as amplitudes de resposta de tensão para cada frequência e direção de incidência de ondas com amplitude unitária. Portanto, as variações de tensão utilizadas nos cálculos de fadiga são o dobro destes valores, conforme indicado na Figura 32.

As figuras 89 a 96 ilustram os RAO's de tensão principal, no ponto S1.

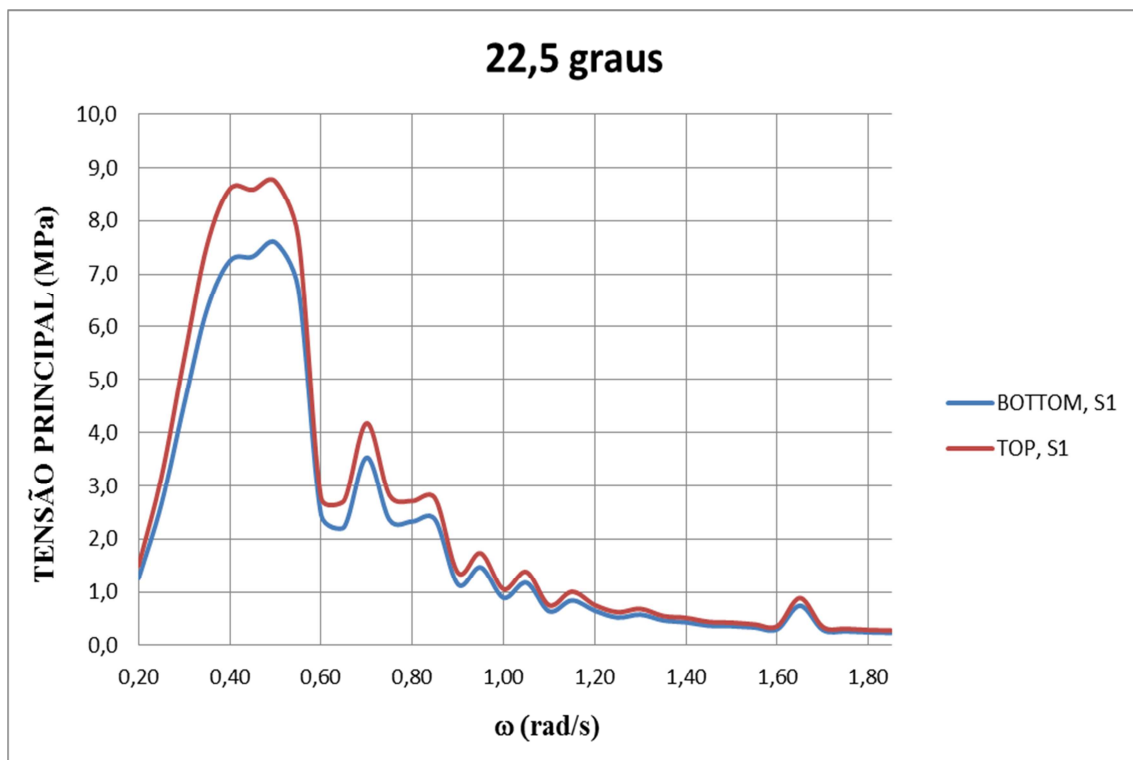


Figura 89 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 22,5°.

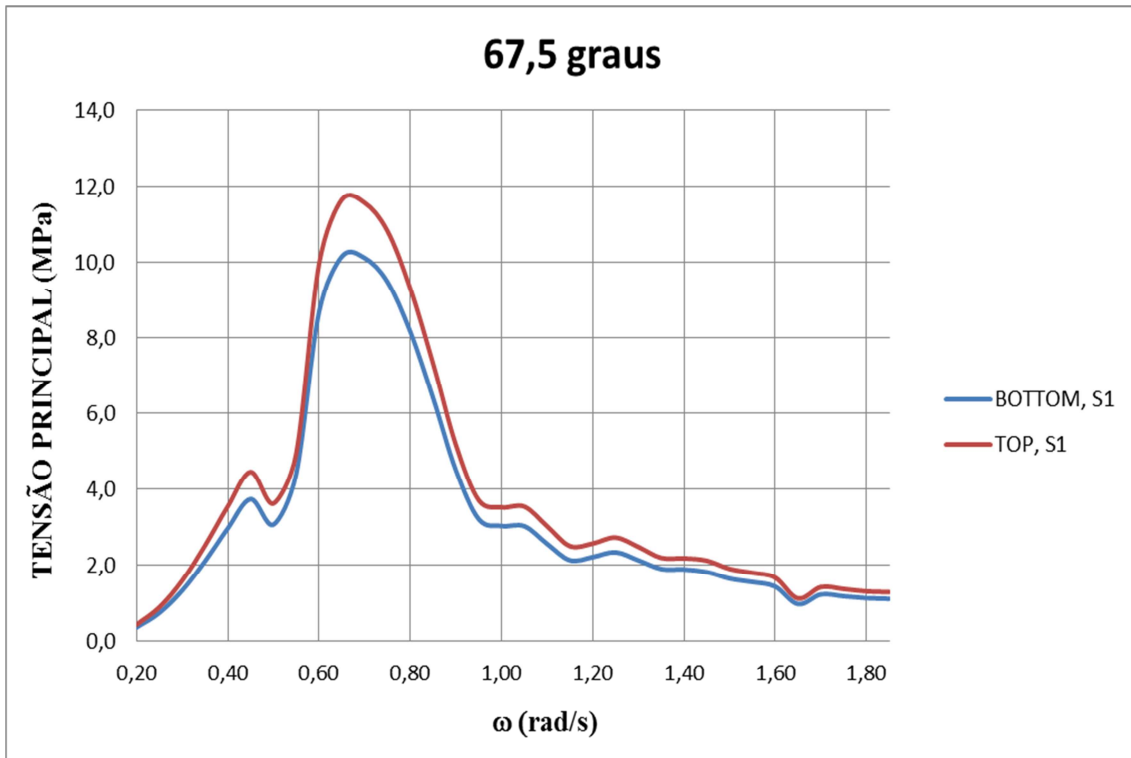


Figura 90 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 67,5°.

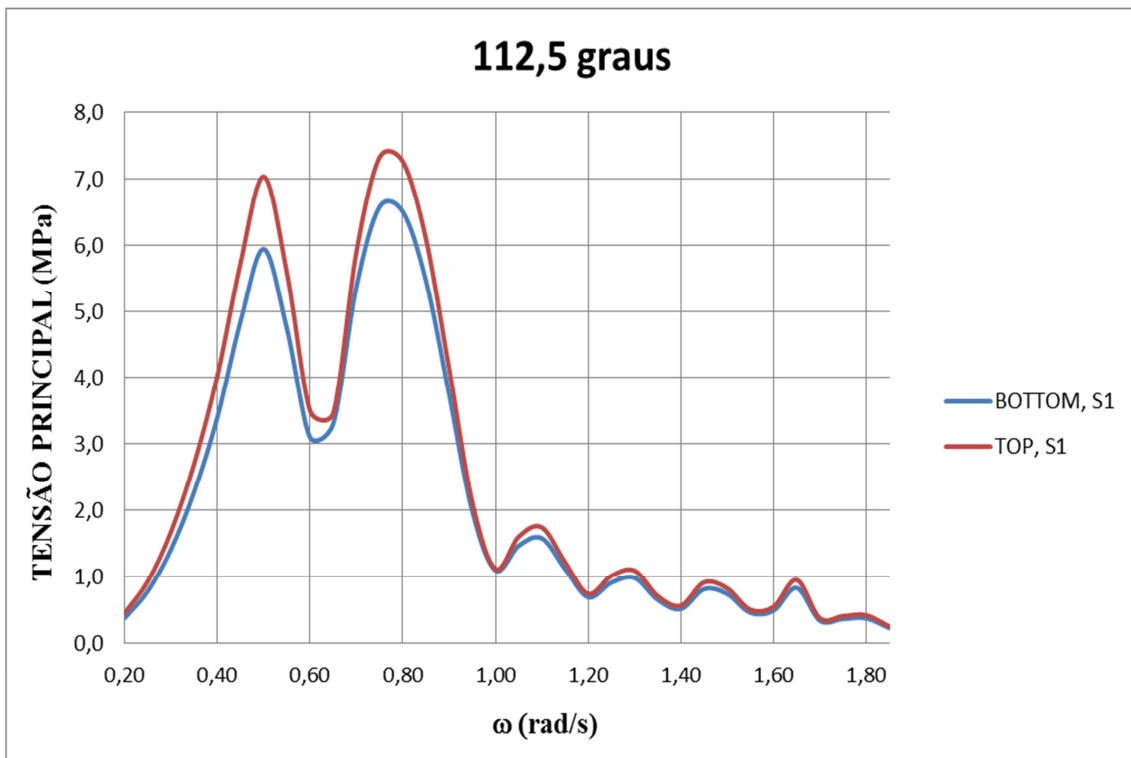


Figura 91 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 112,5°.

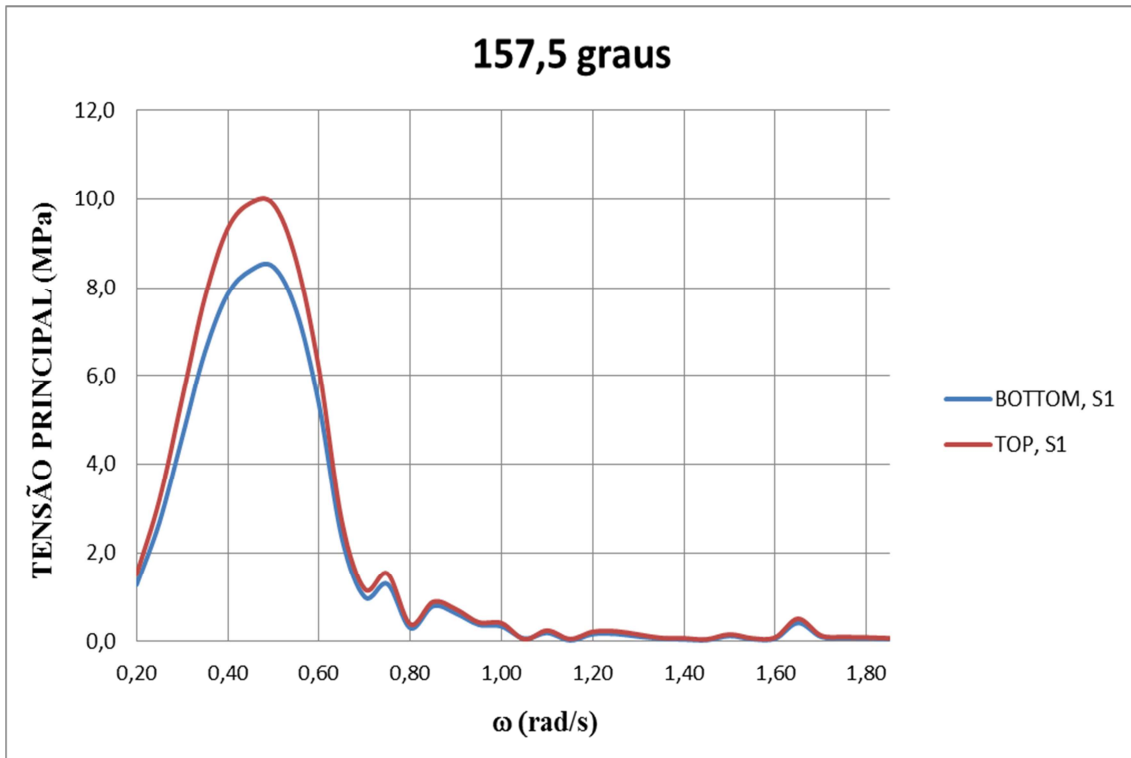


Figura 92 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 157,5°.

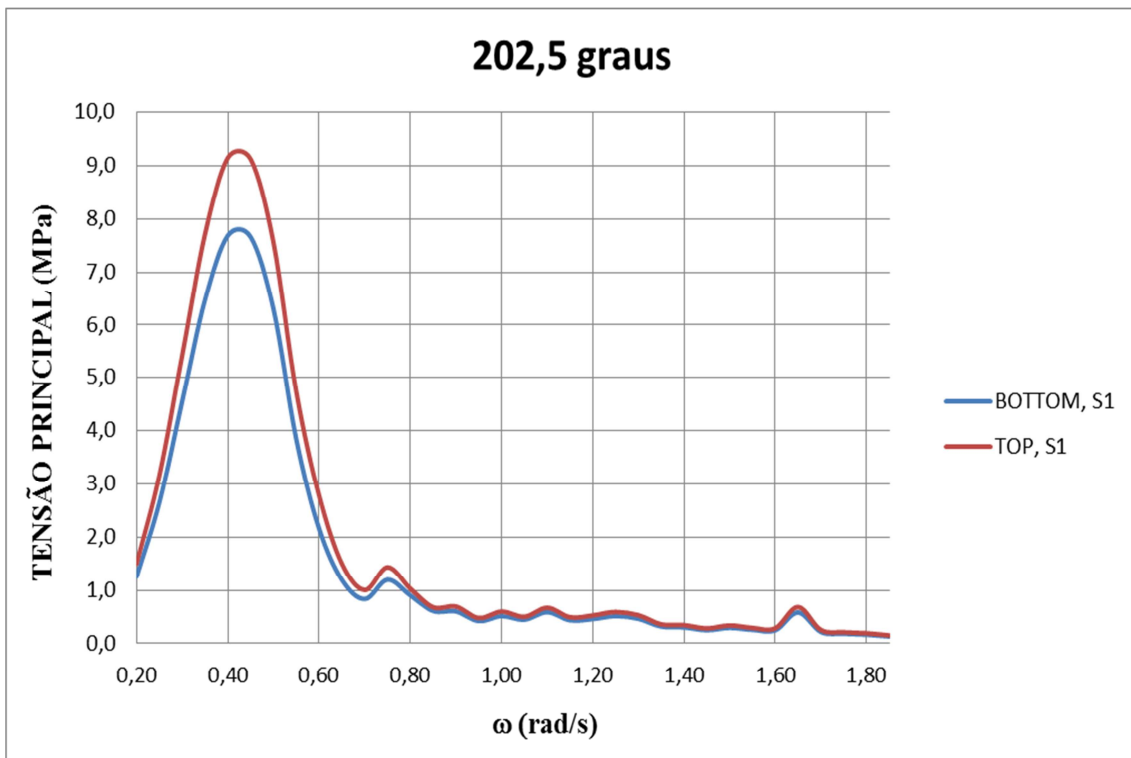


Figura 93 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 202,5°.

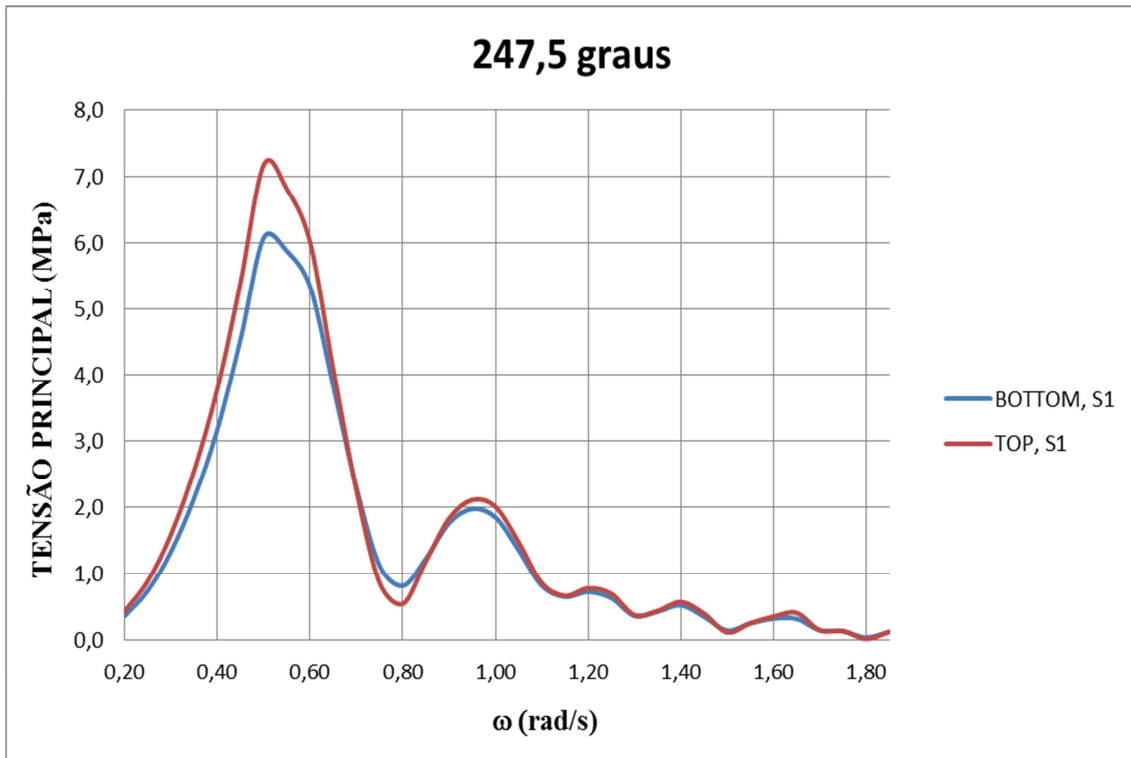


Figura 94 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 247,5°.

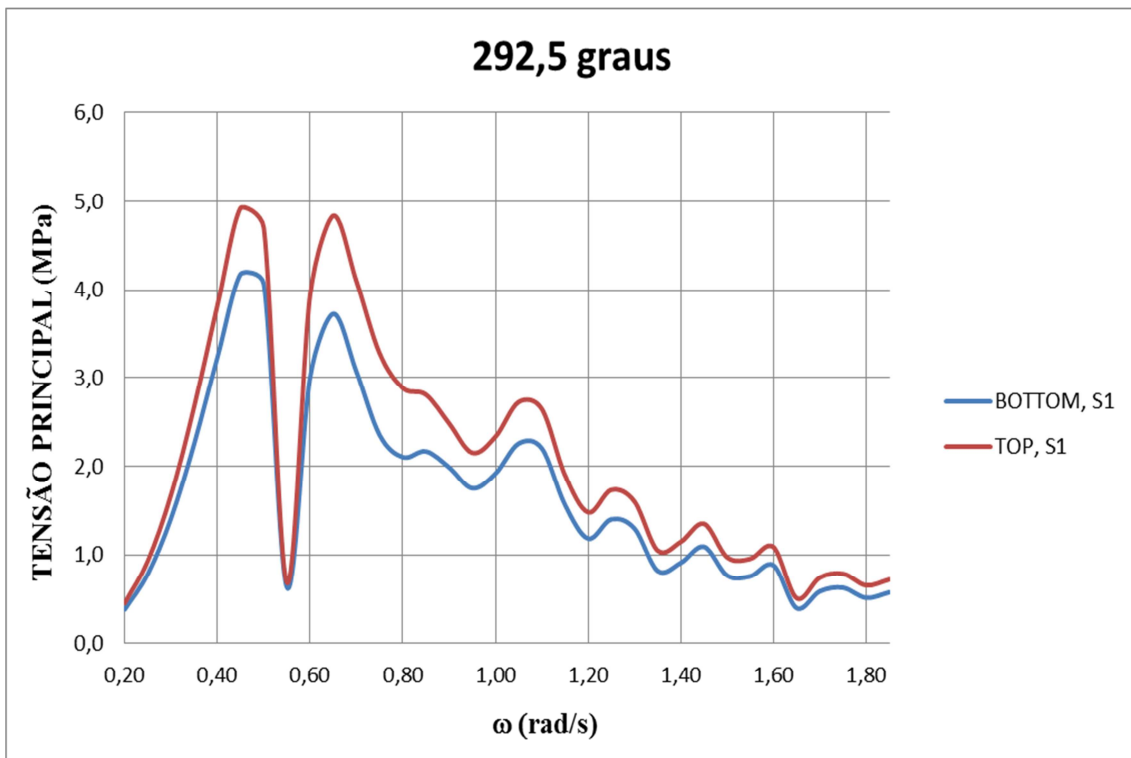


Figura 95 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 292,5°.

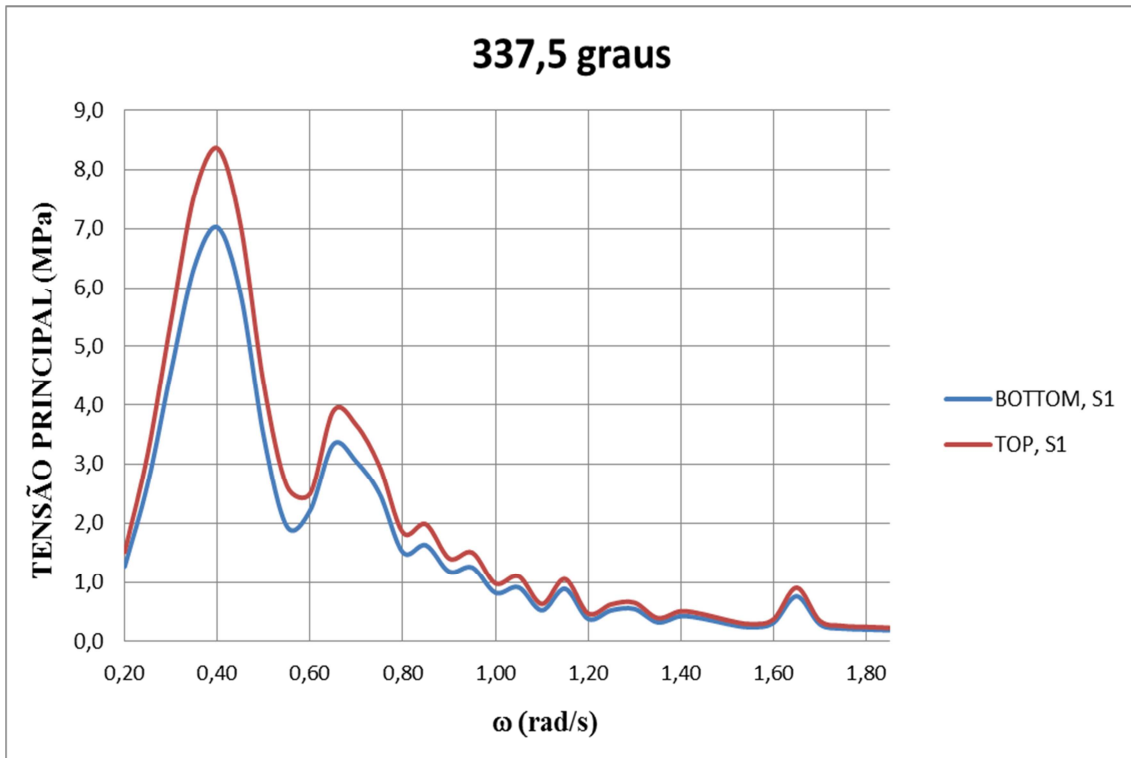


Figura 96 – RAO de tensão principal no ponto S1, incidência de ondas a 337,5°.

As figuras 97 a 104 ilustram os RAO's de tensão principal, no ponto S2.

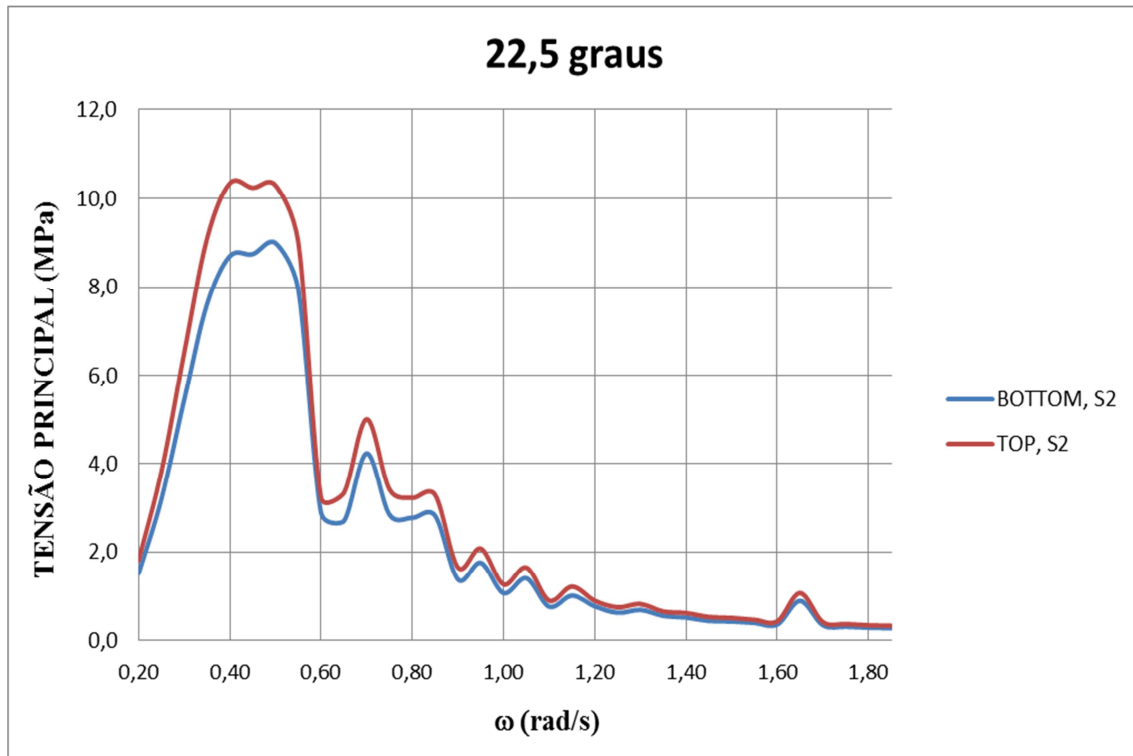


Figura 97 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 22,5°.

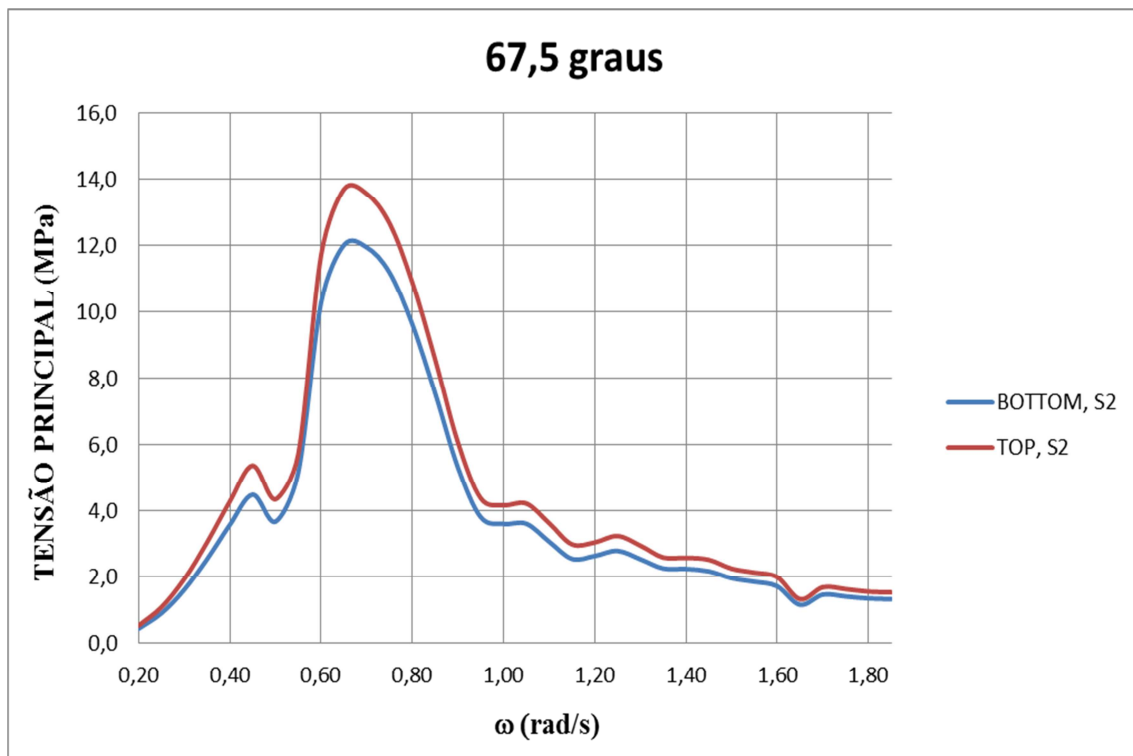


Figura 98 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 67,5°.

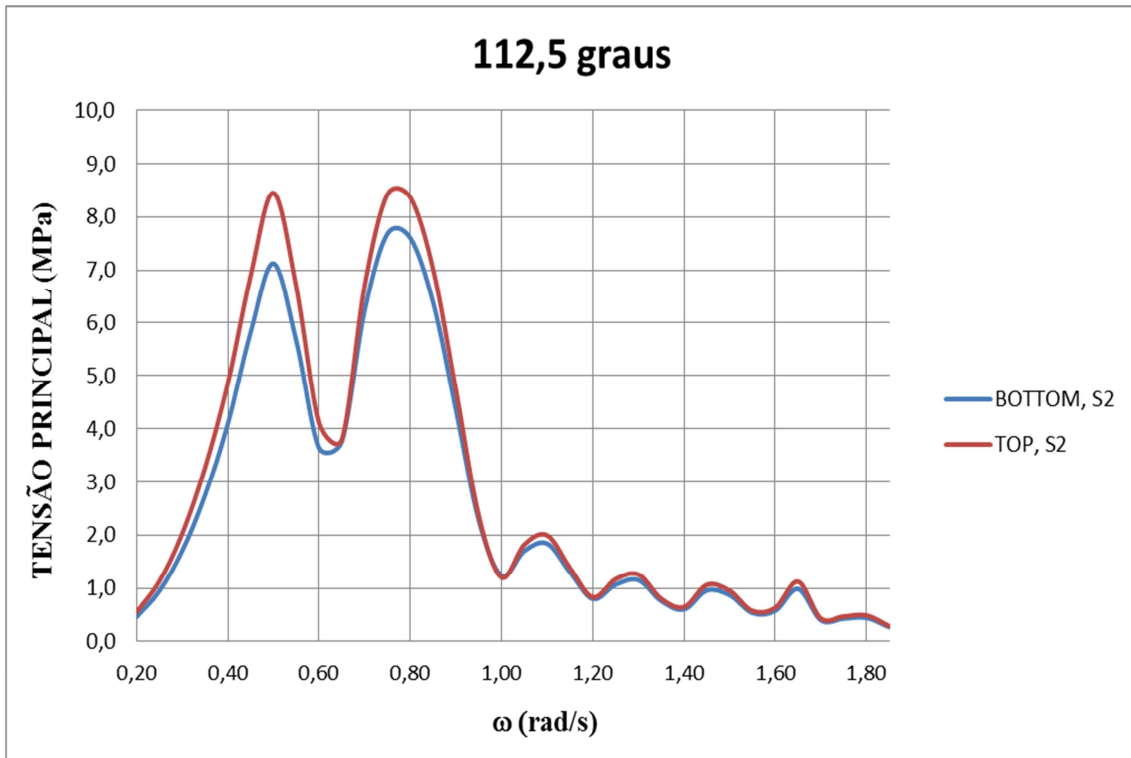


Figura 99 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 112,5°.

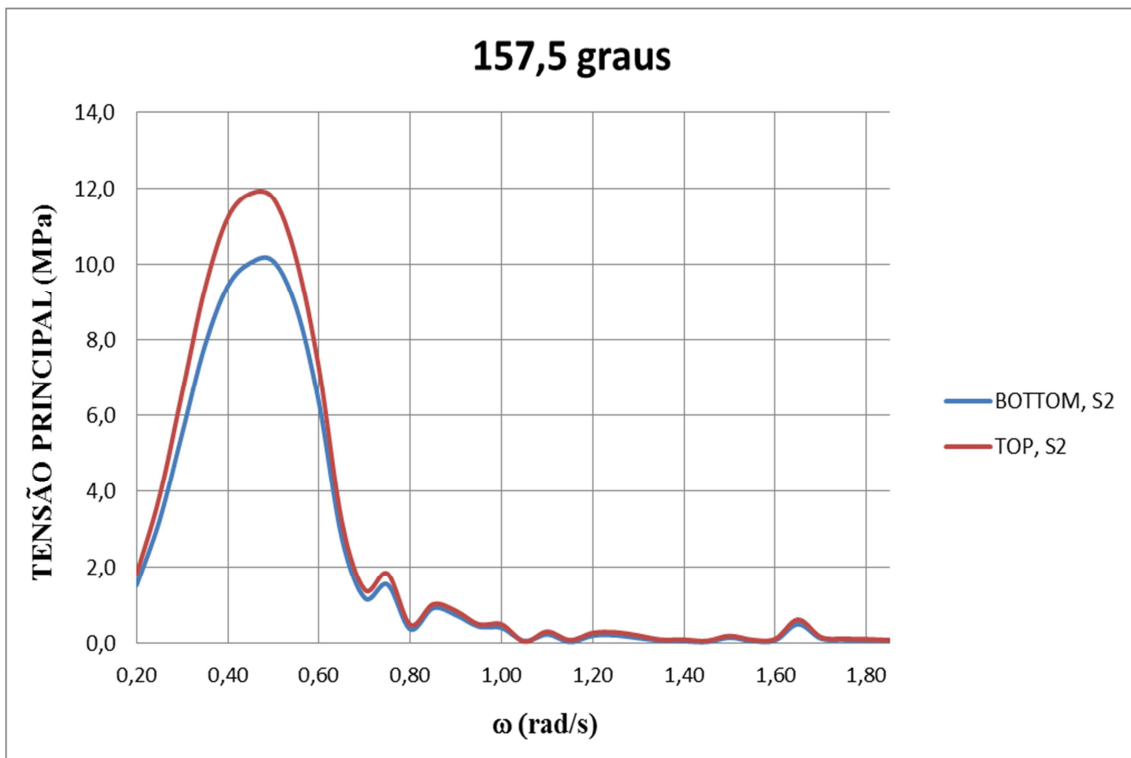


Figura 100 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 157,5°.

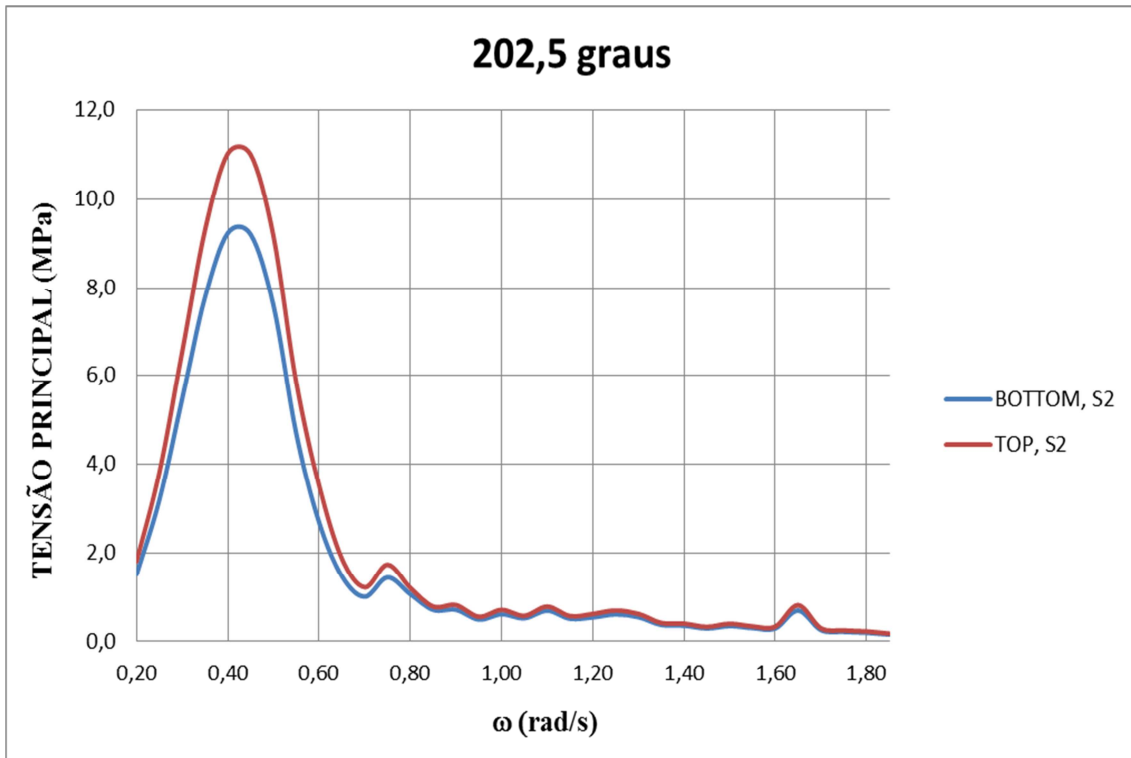


Figura 101 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 202,5°.

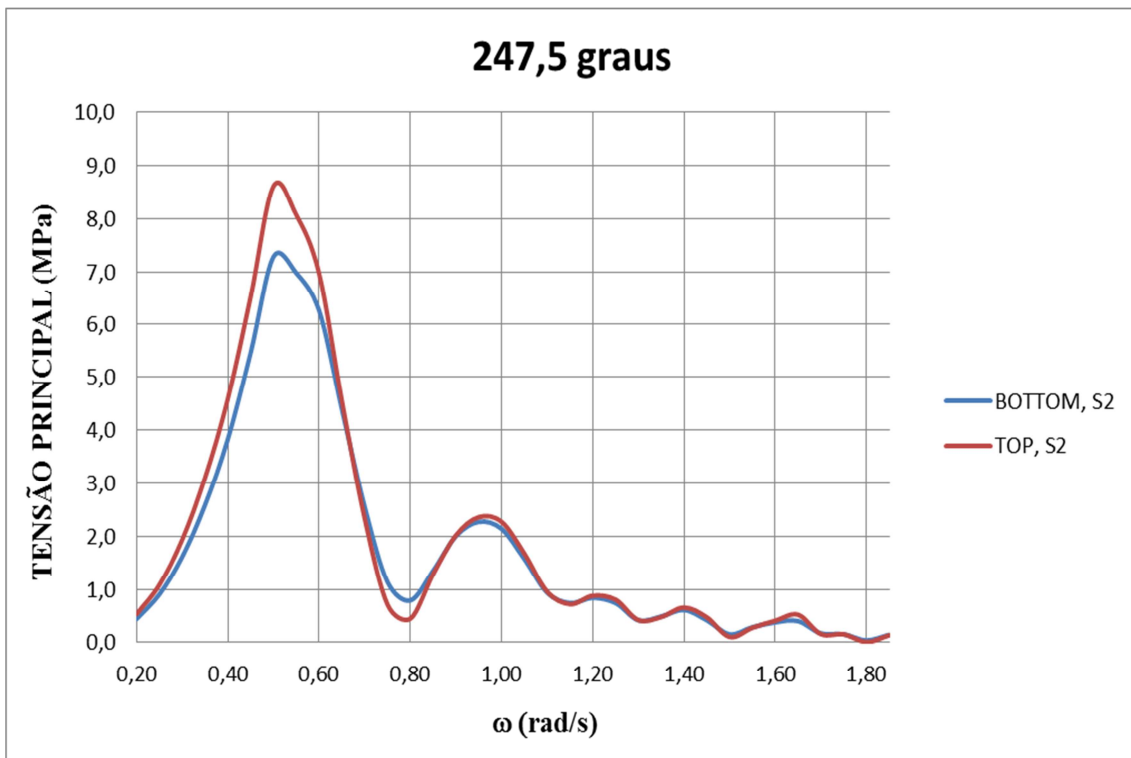


Figura 102 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 247,5°.

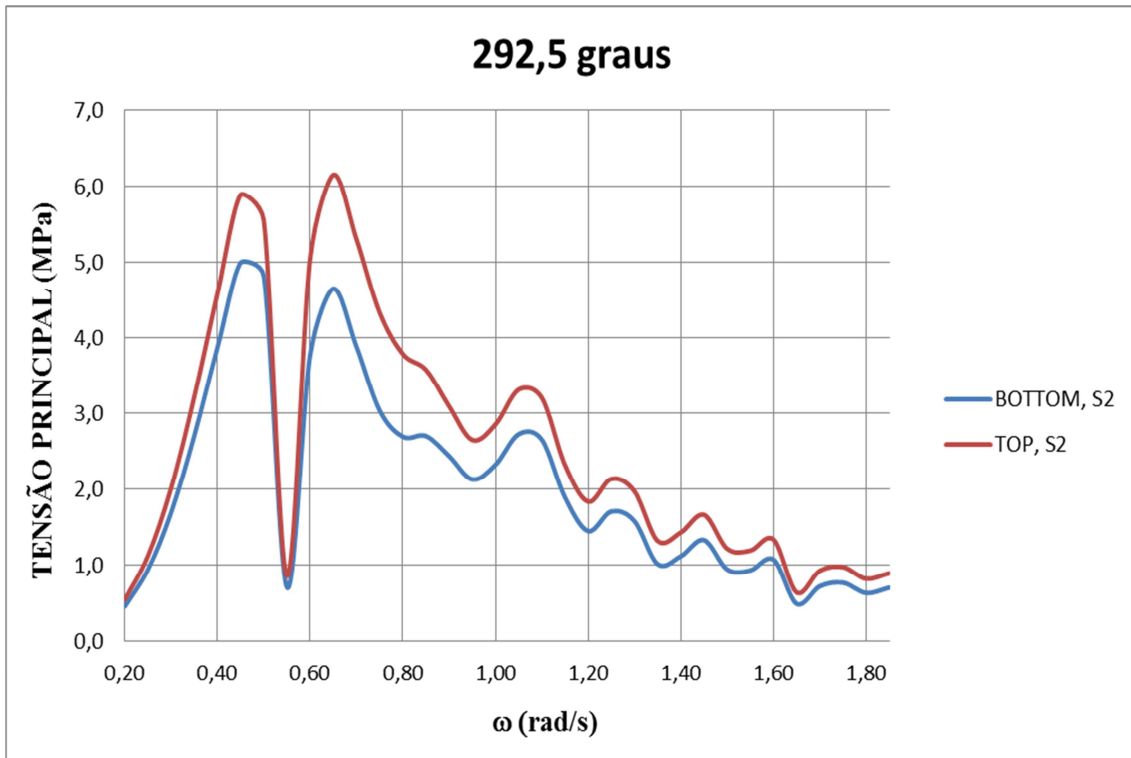


Figura 103 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 292,5°.

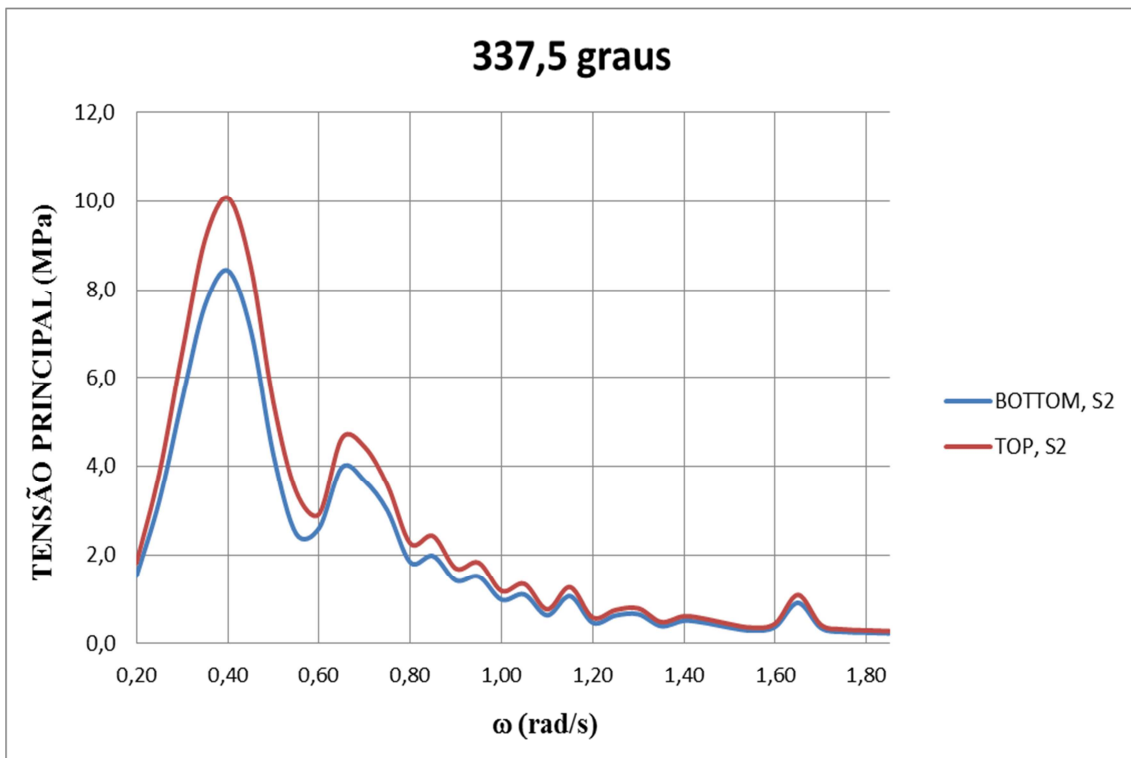


Figura 104 – RAO de tensão principal no ponto S2, incidência de ondas a 337,5°.

Estes RAO's serão "cruzados" com os estados-de-mar, apresentados no próximo item.

6.1.3 DEFINIÇÃO DO DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE ONDAS

Um aspecto que chama a atenção é a presença bastante frequente de estados-de-mar bimodais bidirecionais. Por exemplo, podem ocorrer simultaneamente um estado-de-mar vindo do nordeste e ondas do tipo "swell", vindas do sul, de região de formação distante.

Se para as condições extremas de ondas pode-se considerar que os estados de mar tendem a ser unimodais, para as condições frequentes, utilizadas na avaliação de fadiga das estruturas, esse aspecto deve ser levado em conta na obtenção da resposta. Isso representa um complicador nas análises, pois os programas de obtenção de resposta estocástica em geral não consideram estados de mar bidirecionais.

A referência de diagramas de dispersão utilizada neste trabalho (BOMOS, 1999) trata a questão da bimodalidade assumindo algumas premissas, detalhadas a seguir.

Supondo a situação descrita anteriormente, com ondas de nordeste e sul, temos:

- $$H_S = \sqrt{H_{SNE}^2 + H_{SS}^2}$$

Onde:

H_S é a altura significativa de onda contabilizada no diagrama de dispersão;

H_{SNE} é a altura significativa de onda do estado-de-mar vindo do nordeste;

H_{SS} é a altura significativa de onda do estado-de-mar vindo do sul;

- O valor de T_p (item 2.3) contabilizado no diagrama de dispersão é aquele referente ao maior valor de H_S (nordeste ou sul).
- A contabilização da direção de incidência segue a mesma linha de T_p .

Com base nestes conceitos, são apresentados os diagramas de dispersão referentes à Bacia de Campos.

Tabela 5 – Diagrama de dispersão $H_S \times T_p$, Bacia de Campos (BOMOS, 1999).

DIAGRAMA DE DISPERSAO: EIXO HORIZONTAL: t_p
 BACIA DE CAMPOS EIXO VERTICAL: h_s

HS TOTAL (m)	2.0 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.0 6.0	6.0 7.0	7.0 8.0	8.0 9.0	9.0 10.0	10.0 11.0	11.0 12.0	12.0 13.0	13.0 14.0	14.0 15.0	15.0 16.0	16.0 17.0	17.0 18.0	18.0 19.0	19.0 20.0	freq	%
.00 .25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
.25 .50	0	1	0	0	0	0	0	1	1	2	5	1	0	2	0	0	0	0	13	.04
.50 .75	0	1	23	26	53	32	59	17	21	26	22	12	18	6	2	0	0	0	318	.97
.75 1.00	0	5	159	247	176	219	184	104	60	86	58	52	37	12	5	0	0	0	1404	4.30
1.00 1.25	0	0	154	941	937	506	259	199	175	187	219	102	67	22	5	4	1	0	3778	11.58
1.25 1.50	0	0	36	1047	1927	998	413	236	230	261	265	162	97	23	11	6	2	0	5714	17.52
1.50 1.75	0	0	2	303	2254	1534	408	236	250	237	264	219	108	37	10	2	0	0	5864	17.98
1.75 2.00	0	0	0	59	1353	1558	404	233	240	217	211	168	117	18	7	3	1	0	4589	14.07
2.00 2.25	0	0	0	3	458	1566	535	230	219	186	206	115	74	26	7	7	1	0	3633	11.14
2.25 2.50	0	0	0	1	89	1223	401	218	184	151	159	87	40	25	12	1	0	0	2591	7.94
2.50 2.75	0	0	0	0	16	610	454	185	160	106	130	64	38	24	3	0	2	0	1792	5.49
2.75 3.00	0	0	0	0	0	114	443	120	140	90	78	56	49	9	3	2	1	0	1105	3.39
3.00 3.25	0	0	0	0	0	12	233	121	98	78	62	46	29	11	4	5	0	0	699	2.14
3.25 3.50	0	0	0	0	0	1	71	95	78	67	48	42	14	3	2	1	0	0	422	1.29
3.50 3.75	0	0	0	0	0	1	17	87	56	36	28	20	17	3	0	3	0	0	268	.82
3.75 4.00	0	0	0	0	0	0	3	25	31	31	19	20	13	6	5	1	0	0	154	.47
4.00 4.25	0	0	0	0	0	0	0	7	24	24	14	8	14	11	5	0	0	0	107	.33
4.25 4.50	0	0	0	0	0	0	0	5	12	14	21	8	8	5	7	2	0	0	82	.25
4.50 4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9	7	4	1	4	0	0	0	0	29	.09
4.75 5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	2	7	2	4	0	0	0	28	.09
5.00 5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	4	1	0	0	0	0	0	10	.03
5.25 5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	1	0	0	0	0	7	.02
5.50 5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	3	1	0	0	0	0	11	.03
5.75 6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3	.01
6.00 6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	.01
6.25 6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
6.50 6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
6.75 7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
7.00 7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
7.25 7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
freq.	0	7	374	2627	7263	8374	3884	2119	1983	1818	1827	1200	756	254	92	37	8	0	32623	
%	.00	.02	1.15	8.05	22.26	25.67	11.91	6.50	6.08	5.57	5.60	3.68	2.32	.78	.28	.11	.02	.00		
hs medio	.00	.75	1.02	1.28	1.56	1.89	2.08	2.11	2.13	2.05	2.00	2.04	2.07	2.26	2.46	2.35	1.99	.00		

Tabela 6 – Diagrama de dispersão H_S x direção, Bacia de Campos (BOMOS, 1999).

DIAGRAMA DE DISPERSAO: EIXO HORIZONTAL: direcao
 BACIA DE CAMPOS EIXO VERTICAL: hs

HS TOTAL (m)		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL	%
.00	.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
.25	.50	0	0	0	8	4	1	0	0	13	.04
.50	.75	16	93	47	58	65	29	7	3	318	.97
.75	1.00	71	465	345	169	233	102	11	8	1404	4.30
1.00	1.25	146	1444	1210	377	386	177	25	13	3778	11.58
1.25	1.50	224	2170	1935	572	561	222	14	16	5714	17.52
1.50	1.75	246	2159	1908	649	609	274	13	6	5864	17.98
1.75	2.00	197	1784	1077	585	651	279	10	6	4589	14.07
2.00	2.25	175	1345	639	517	628	323	2	4	3633	11.14
2.25	2.50	138	1014	291	351	502	289	3	3	2591	7.94
2.50	2.75	79	660	139	268	436	209	1	0	1792	5.49
2.75	3.00	31	336	56	171	329	182	0	0	1105	3.39
3.00	3.25	24	177	11	86	206	195	0	0	699	2.14
3.25	3.50	10	74	7	46	150	135	0	0	422	1.29
3.50	3.75	3	57	6	23	78	101	0	0	268	.82
3.75	4.00	0	10	0	14	46	84	0	0	154	.47
4.00	4.25	0	4	0	17	23	63	0	0	107	.33
4.25	4.50	0	7	0	6	22	47	0	0	82	.25
4.50	4.75	0	2	0	0	11	16	0	0	29	.09
4.75	5.00	0	0	0	1	11	16	0	0	28	.09
5.00	5.25	0	0	0	1	6	3	0	0	10	.03
5.25	5.50	0	0	0	1	2	4	0	0	7	.02
5.50	5.75	0	0	0	2	4	5	0	0	11	.03
5.75	6.00	0	0	0	0	3	0	0	0	3	.01
6.00	6.25	0	0	0	0	2	0	0	0	2	.01
6.25	6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
TOTAL		1360	11801	7671	3922	4968	2756	86	59	32623	
%		4.17	36.17	23.51	12.02	5.23	8.45	.26	.18		
MEDIAS DE H_S		1.79	1.78	1.58	1.88	2.07	2.35	1.35	1.39	1.84	

Conforme mencionado anteriormente, cada estado-de-mar é referente a um período de três horas. Conforme pode ser observado nos diagramas, o total de observações é 32623, totalizando aproximadamente 11 anos de estados de mar com 3 horas.

Cabe ressaltar que a distribuição dos valores de T_p , dado H_S , é assumida como a mesma para todas as direções.

A associação entre as direções de incidência do diagrama de dispersão e as direções dos RAO's, necessária para os “cruzamentos” realizados no próximo item, é apresentada na Tabela 7. Ela foi feita com base no aproamento da unidade (Figura 105) e na convenção utilizada pelo WADAM (Figura 35).

Tabela 7 – Associação entre as direções de incidência.

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
22,5°	337,5°	292,5°	247,5°	202,5°	157,5°	112,5°	67,5°

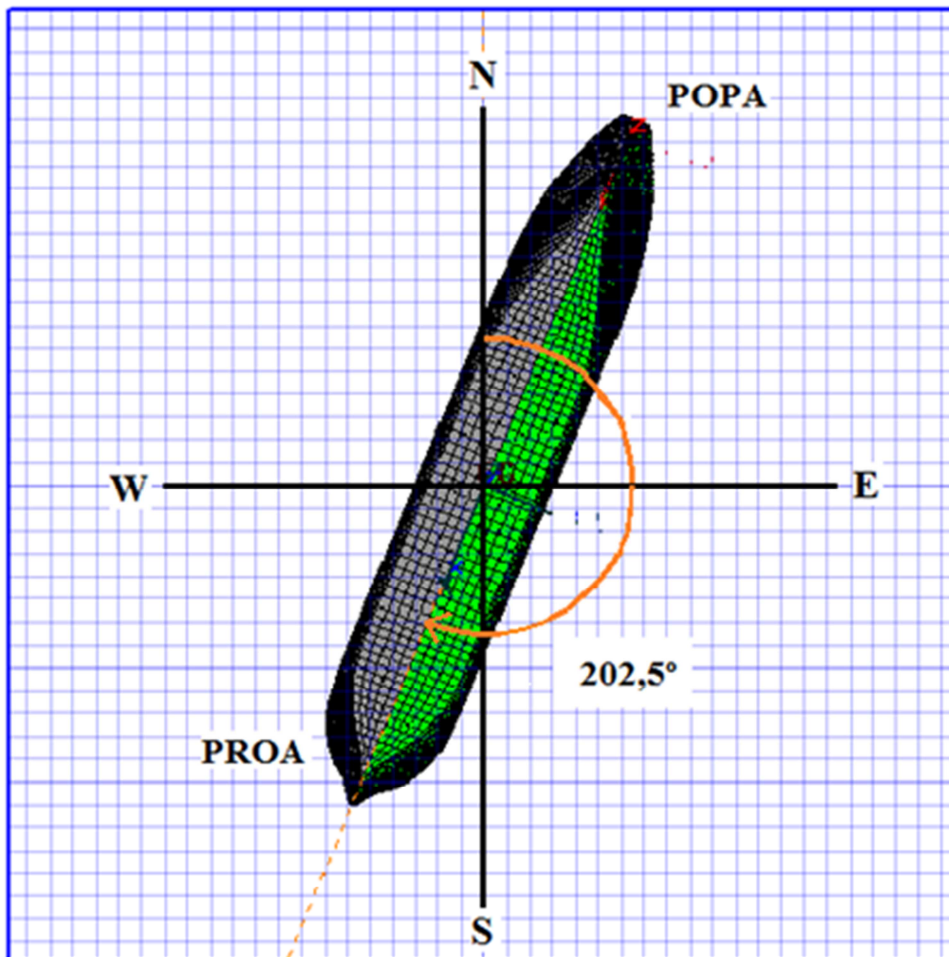


Figura 105 – Aproamento da unidade.

6.1.4 OBTENÇÃO DOS ESPECTROS DE RESPOSTA E CÁLCULO DO DANO

Esta etapa é relativamente simples, porém bem trabalhosa, devido ao grande número de operações matemáticas envolvidas.

Por este motivo foi utilizado o programa POSTRESP, do sistema SESAM, que executa as seguintes tarefas:

- Obtém o espectro de resposta e momentos espectrais, após cada cruzamento entre os RAO's de tensão e os diagramas de dispersão fornecidos;
- Calcula os parâmetros estatísticos da distribuição de Rayleigh, após cada cruzamento;
- Calcula o dano parcial, para cada cruzamento, referente à curva S-N adotada. No caso deste trabalho, curva "D" (DNV, 2012)
- Calcula o dano final, como a soma de todos os danos parciais.

A limitação deste programa é a impossibilidade de realizar a correção do dano, considerando a largura de banda do espectro de resposta.

Conforme mencionado anteriormente, a correção reduziria o dano. Portanto, o projeto, em relação a esse aspecto, está conservador.

A seguir, são apresentados os danos referentes à Bacia de Campos, para as faces *top* e *bottom* dos pontos analisados.

Tabela 8 – Danos obtidos para Bacia de Campos.

Danos acumulados (Bacia de Campos)	S1	S2
Top	6,6E-3	1,5E-2
Bottom	3,1E-3	7,1E-3

Considerando que a estrutura possui acessibilidade relativamente simples, para inspeções e reparos, o fator de segurança igual a 2,0 é adequado. O dano admissível, portanto, está limitado a 0,5, valor bem superior aos danos encontrados.

A vida à fadiga encontrada é igual a $\left(25/0,015\right) = 1667$ anos!

6.2 ESTIMATIVA DO DANO PARA BACIA DE SANTOS

Os RAO's de esforços seccionais da embarcação e de tensão principal são os mesmos que os apresentados nos itens 6.1.1 e 6.1.2. Neste capítulo, serão utilizados os diagramas de dispersão referentes à Bacia de Santos. O aproamento da unidade é o mesmo.

Tabela 9 – Diagrama de dispersão $H_S \times T_p$, Bacia de Santos (BOMOS, 1999).

DIAGRAMA DE DISPERSAO: EIXO HORIZONTAL: t_p
BACIA DE SANTOS EIXO VERTICAL: h_s

HS TOTAL (m)	2.0 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.0 6.0	6.0 7.0	7.0 8.0	8.0 9.0	9.0 10.0	10.0 11.0	11.0 12.0	12.0 13.0	13.0 14.0	14.0 15.0	15.0 16.0	16.0 17.0	17.0 18.0	18.0 19.0	19.0 20.0	freq	%
.00 .25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	.00
.25 .50	0	1	0	7	3	6	17	7	1	2	11	0	4	2	0	1	0	0	62	.19
.50 .75	0	35	24	66	122	121	97	59	43	42	20	20	35	5	0	0	0	0	689	2.11
.75 1.00	0	9	231	354	342	371	262	156	104	139	69	78	76	25	8	0	0	0	2224	6.82
1.00 1.25	0	0	213	840	932	631	316	212	191	206	172	107	101	14	13	0	1	0	3949	12.10
1.25 1.50	0	0	44	918	1514	914	460	274	209	292	287	125	101	15	3	3	1	0	5160	15.82
1.50 1.75	0	0	2	321	1528	1410	599	311	227	267	211	184	119	25	8	0	0	0	5212	15.98
1.75 2.00	0	0	0	37	993	1361	577	284	240	218	210	102	67	13	2	0	1	0	4105	12.58
2.00 2.25	0	0	0	6	334	1304	563	301	244	230	186	100	62	17	3	2	3	0	3355	10.28
2.25 2.50	0	0	0	0	55	919	521	236	196	175	155	111	56	26	6	1	2	0	2459	7.54
2.50 2.75	0	0	0	0	8	425	452	228	213	143	165	84	26	19	1	1	1	0	1766	5.41
2.75 3.00	0	0	0	0	2	72	392	237	183	122	71	48	22	8	2	2	1	0	1162	3.56
3.00 3.25	0	0	0	0	1	23	215	181	87	84	80	43	32	13	4	2	0	0	765	2.34
3.25 3.50	0	0	0	0	0	4	92	111	76	62	48	27	17	11	1	4	0	0	453	1.39
3.50 3.75	0	0	0	0	0	2	20	117	72	39	46	30	13	2	5	1	0	0	347	1.06
3.75 4.00	0	0	0	0	0	0	14	79	55	31	29	25	9	8	6	0	0	0	256	.78
4.00 4.25	0	0	0	0	0	0	4	37	56	30	25	25	10	2	2	0	0	0	191	.59
4.25 4.50	0	0	0	0	0	0	0	11	25	36	16	11	12	5	1	0	0	0	117	.36
4.50 4.75	0	0	0	0	0	0	0	7	27	23	11	11	9	6	2	0	0	0	96	.29
4.75 5.00	0	0	0	0	0	0	0	4	17	24	17	5	8	8	8	0	0	0	91	.28
5.00 5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	6	15	14	5	3	7	7	0	0	0	57	.17
5.25 5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	8	9	9	6	4	5	2	0	0	0	43	.13
5.50 5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	7	6	2	3	4	0	0	0	27	.08
5.75 6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	3	3	0	0	0	0	13	.04
6.00 6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1	0	0	0	0	6	.02
6.25 6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	4	.01
6.50 6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	5	.02
6.75 7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	4	.01
7.00 7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4	.01
7.25 7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
freq.	0	46	514	2549	5834	7563	4601	2852	2283	2193	1866	1157	796	252	90	17	10	0	32623	
%	.00	.14	1.58	7.81	17.88	23.18	14.10	8.74	7.00	6.72	5.72	3.55	2.44	.77	.28	.05	.03	.00		
hs medio	.00	.67	1.01	1.25	1.50	1.80	2.01	2.19	2.26	2.12	2.15	2.14	1.98	2.68	3.02	2.54	2.07	.00		

Tabela 10 – Diagrama de dispersão H_s x direção, Bacia de Santos (BOMOS, 1999).

DIAGRAMA DE DISPERSAO: EIXO HORIZONTAL: dir
BACIA DE SANTOS EIXO VERTICAL: hs

HS TOTAL (m)		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL	%
.00	.25	0	0	0	0	1	0	0	0	1	.00
.25	.50	1	11	22	10	11	2	0	5	62	.19
.50	.75	30	226	159	97	93	59	15	10	689	2.11
.75	1.00	109	748	494	249	377	193	29	25	2224	6.82
1.00	1.25	174	1532	936	409	605	242	24	27	3949	12.10
1.25	1.50	175	1950	1393	590	668	325	31	28	5160	15.82
1.50	1.75	101	2007	1305	604	807	350	25	13	5212	15.98
1.75	2.00	55	1495	886	509	734	393	27	6	4105	12.58
2.00	2.25	31	1057	582	452	782	440	5	6	3355	10.28
2.25	2.50	18	774	373	327	578	379	8	2	2459	7.54
2.50	2.75	7	406	220	271	483	364	14	1	1766	5.41
2.75	3.00	1	213	138	167	348	291	3	1	1162	3.56
3.00	3.25	1	134	68	87	236	236	3	0	765	2.34
3.25	3.50	0	63	38	48	142	161	1	0	453	1.39
3.50	3.75	0	29	21	44	96	154	3	0	347	1.06
3.75	4.00	0	31	14	33	54	121	3	0	256	.78
4.00	4.25	0	12	8	15	53	99	4	0	191	.59
4.25	4.50	0	9	0	13	38	56	1	0	117	.36
4.50	4.75	0	5	2	9	19	60	1	0	96	.29
4.75	5.00	0	2	6	2	17	60	4	0	91	.28
5.00	5.25	0	0	1	2	16	37	1	0	57	.17
5.25	5.50	0	0	1	4	10	24	4	0	43	.13
5.50	5.75	0	0	0	0	5	22	0	0	27	.08
5.75	6.00	0	0	0	0	3	10	0	0	13	.04
6.00	6.25	0	0	0	0	1	5	0	0	6	.02
6.25	6.50	0	0	0	0	1	3	0	0	4	.01
6.50	6.75	0	0	0	0	1	4	0	0	5	.02
6.75	7.00	0	0	0	0	1	3	0	0	4	.01
7.00	7.25	0	0	0	0	4	0	0	0	4	.01
7.25	7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
TOTAL		703	10704	6667	3942	6184	4093	206	124	32623	
%		2.15	32.81	20.44	12.08	18.96	12.55	.63	.38		
MEDIAS DE HS		1.36	1.69	1.65	1.87	2.04	2.44	1.84	1.25	1.85	

Os danos acumulados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Danos obtidos para Bacia de Santos.

Danos acumulados (Bacia de Santos)	S1	S2
Top	1,5E-2	3,1E-2
Bottom	7,6E-3	1,6E-2

Conforme explicado anteriormente, o dano admissível está limitado a 0,5.

A vida à fadiga encontrada é igual a $\left(25/0,031\right) = 806$ anos!

7 CONCLUSÕES

Como pode ser observado, os danos encontrados foram baixos. De fato, era esperado, de acordo com o histórico de projetos estruturais na área “offshore”, que os momentos fletores de viga-navio não gerassem danos de fadiga significativos na região estudada.

Conforme mencionado anteriormente, os programas de cálculo estrutural voltados para área offshore geralmente possuem a análise de fadiga para movimentos já implementada em suas rotinas. Por este motivo, nesta dissertação, foi priorizada a elaboração de uma metodologia para avaliação do dano devido aos esforços de viga-navio. A metodologia apresentada mostrou-se suficientemente robusta para ser estendida para outros pontos de estudo, seja na mesma chapa estudada ou em outras colunas de suportação. Algumas alternativas são apresentadas no item 7.1, como sugestões para trabalhos futuros.

Uma questão importante a mencionar é que, mesmo sem a contabiliza o do dano proveniente da análise de movimentos, o dano obtido pela metodologia é válido. A acelera o longitudinal (eixo X neste trabalho), decorrente do movimento “pitch”, gera forças inerciais que são transmitidas ao casco pelas barras de contraventamento (ver Figura 47), ocasionando poucos efeitos de flexão na chapa *gusset* estudada. Portanto, é esperado que a considera o dos efeitos da análise de movimentos, para este detalhe, não produza um aumento significativo no dano à fadiga.

Uma conclusão importante é que os danos encontrados para Bacia de Santos, mesmo sendo baixos, foram consideravelmente maiores que os encontrados para Bacia de Campos. Esta informa o   uma grande aliada às boas práticas de projeto para Bacia de Santos, pois alguns detalhes estruturais, historicamente classificados como críticos, mais do que nunca devem ser avaliados e, preferencialmente, concebidos de forma otimizada. Cabe ressaltar que, pelo fato das tensões atuantes serem baixas, a diferença entre o dano estimado entre as duas Bacias   maior, visto que a “entrada” na curva S-N se dá no trecho relativo ao expoente cinco ($m = 5,0$). Em outras palavras, os resultados tendem a ser mais próximos quando as tensões solicitantes são maiores.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diversas alternativas para a estrutura analisada podem ser estudadas. Uma abordagem interessante seria a avaliação do efeito causado, no dano à fadiga, pela diminuição do efeito de rótula presente fora do plano da chapa *gusset*, que poderia ser obtida pelo aumento da espessura desta chapa, e/ou pela aproximação entre o final da coluna de suportação do módulo e a estrutura do casco.

Dentro do mesmo detalhe poderiam ser estudados outros pontos, por exemplo, o início da ligação do tubo com a chapa “gusset”, no topo da mesma.

Outra análise importante seria o estudo de um detalhe que receba, além da coluna, uma ou mais barras de contraventamento. Para este caso, os efeitos provenientes dos movimentos da embarcação podem ser relevantes, devido às tensões adicionais impostas no apoio.

Entrando no campo das condições ambientais, independente do detalhe estudado, seria interessante a consideração da bimodalidade dos espectros de mar. Este estudo depende dos insumos meteoceanográficos disponíveis para o projeto e, principalmente, de implementações nas ferramentas computacionais para o tratamento estatístico adequado de espectros de resposta provenientes de mares bimodais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, *Spectral-Based Fatigue Analysis for FPSO Installations*, ABS, 2013.

ANSYS Inc., Workbench Platform 14.5, *Manual do Usuário*, 2012.

ALMAR-NAESS, A., *Fatigue Handbook Offshore Steel Structures*. Tapir Publishers, Trondheim, 1985.

BALTROP, N. D. P., ADAMS, A. J., *Dynamics of Fixed Marine Structures*, Butterworth Heinemann, Third edition, 1991.

BATALHA, A. F., *Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside*, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2009.

BENTLEY SYSTEMS Inc., SACS Offshore Analysis and Design Software v8i, *Manual do Usuário*, 2013.

BHATTACHARYYA, R., *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley & Sons, 1st edition, New York, USA, 1978.

BOMOS, *Brazil Offshore Metocean Storm Joint Industry Project*, Oceanweather Inc., 1999.

CHAKRABARTI, S. K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1987.

DET NORSKE VERITAS, POSTRESP, Postprocessor for Statistical Processing and Presentation of Response, *Manual do Usuário*, 2007.

DET NORSKE VERITAS, WADAM, Wave Analysis by Diffraction and Morison Theory, *Manual do Usuário*, 2007.

DET NORSKE VERITAS, *Classification Notes 30.7 – Fatigue Assessment of Ship Structures*, DNV, 2010.

DET NORSKE VERITAS, *Recommended Practice C203 – Fatigue Design of Offshore Steel Structures*, DNV, 2012.

ELLWANGER, G. B., SAGRILO, L. V. S., SIQUEIRA, M. Q., *Análise e Projeto de Estruturas Offshore I*, Apostila do Programa de Engenharia Civil – Área de Estruturas, COPPE/UFRJ, 2008.

LIN, Y.K., *Probabilistic Theory of Structural Dynamics*. New York, McGraw-Hill, 1967.

MATHSOFT Inc., MATHCAD 14, *Manual do Usuário*, 2007.

MINER, M. A., *Cumulative Damage in Fatigue*, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 12, 1945.

PAZ, M., *Structural Dynamics – Theory and Computation*, Chapman & Hall, 4th edition, University of Louisville, Kentucky, USA, 1997.

PETROBRAS, *Metoccean Data*, 2011.

PIERSON, W.J., MOSKOWITZ, L., *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii*. Journal of Geophysical Research 69, 1964.

PRICE, W.G., Bishop, Richard Evelyn Donohue, *Probabilistic Theory of Ship Dynamics*, Chapman & Hall”, 1974

RYCHLIK, I., *A note on significant wave height*, Department of Mathematical Statistics, Lund University, 1995.

SAGRILO, L. V. S., ELLWANGER, G. B., *Análise e Projeto de Estruturas Offshore II*, Apostila do Programa de Engenharia Civil – Área de Estruturas, COPPE/UFRJ, 2008.

STEWART, R. H., *Introduction to Physical Oceanography*, Department of Oceanography, Texas A & M University, 2008.

TORRES, A. L. F. L., SAGRILO, L. V. S., SIQUEIRA, M. Q., LIMA, E. C. P., *A Procedure for Random Fatigue Analysis of Offshore Structures*, Brazil Offshore, 1995.

WIEGEL, R. L., *Oceanographical Engineering*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 2005.

WIRSCHING P. H., LIGHT M. C., *Fatigue under wide band random loading*, J Struct. Div, ASCE, 1980.