

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

JOSÉ ALBERTO PÉREZ-BARRETO RODRÍGUEZ

**EFEITO DA CORROSÃO DO CHAPEAMENTO DO FUNDO DO
CASCO SOBRE A CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE NAVIOS**

São Paulo
2015

JOSÉ ALBERTO PÉREZ-BARRETO RODRÍGUEZ

**EFEITO DA CORROSÃO DO CHAPEAMENTO DO FUNDO DO
CASCO SOBRE A CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE NAVIOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Estruturas Navais.

Orientador:
Prof. Dr. Claudio Ruggieri

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 13 de Maio de 2015

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catlogação-na-publicação

Pérez-Barreto Rodriguez, José Alberto

Efeito da corrosão do chapeamento do fundo do casco sobre a confiabilidade estrutural de navios / J.A. Pérez-Barreto Rodriguez. -- São Paulo, 2015.

118 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

**1. Corrosão (Efeitos) 2. Navios 3. Estruturas (Confiabilidade)
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.**

*Dedico este trabajo a toda mi familia,
especialmente a mi hijo Diego Sebastián,
y a mis padres Gustavo y Pilar.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família, em especial a meu filho Diego Sebastian, minha mãe Pilar Rodríguez, meu pai Gustavo Pérez-Barreto, minha irmã Cecilia, meu avô Alberto e meus tios José e Teresa, pela paciência, pelo apoio incondicional e por serem meus maiores incentivadores e motivadores durante todo o tempo. À minhas avós Mamama e Teresa, e meu avô Jesus, que mesmo do céu sempre cuidam de mim.

Agradeço ao professor Dr. Claudio Ruggieri, pelo incentivo e a orientação inicial para o desenvolvimento deste trabalho e ao professor Dr. Thiago Pontin, pelo acompanhamento no curso de Mestrado em Engenharia Naval na Escola Politécnica da USP.

Agradeço ao professor Dr. Diego Sarzosa, pela orientação, pelo conhecimento transmitido durante o desenvolvimento do curso e por acreditar em mim até o final. Ao professor Dr. Fernando Stucchi, pela ajuda e compreensão. Aos professores Dr. Marcelo Ramos e Dr. André Beck, pela avaliação e pelas sugestões que melhoraram o trabalho.

Agradeço especialmente à “Marina de Guerra del Perú”, pela confiança na realização do mestrado e pelo apoio financeiro durante os dois anos de trabalho.

Agradeço, de modo especial, a meu companheiro e amigo Saulo Belli e à sua noiva e amiga Fiorella Andrade, pela paciência na convivência e por se tornarem parte de minha família em São Paulo.

Agradeço, finalmente, a todas as pessoas que conheci neste país, por me fazerem sentir em família, bem como pelo carinho e amizade que vão durar para a vida toda.

“O mais competente não discute, domina a sua ciência e cala-se.”
Voltaire

RESUMO

A engenharia é a ciência que transforma os conhecimentos das disciplinas básicas aplicadas a fatos reais. Nosso mundo está rodeado por essas realizações da engenharia, e é necessário que as pessoas se sintam confortáveis e seguras nas mesmas. Assim, a segurança se torna um fator importante que deve ser considerado em qualquer projeto. Na engenharia naval, um apropriado nível de segurança e, em consequência, um correto desenho estrutural é baseado, atualmente, em estudos determinísticos com o objetivo de obter estruturas capazes de suportar o pior cenário possível de solicitações durante um período de tempo determinado. A maior parte das solicitações na estrutura de um navio se deve à ação da natureza (ventos, ondas, correnteza e tempestades), ou, ainda, aos erros cometidos por humanos (explosões internas, explosões externas e colisões). Devido à aleatoriedade destes eventos, a confiabilidade estrutural de um navio deveria ser considerada como um problema estocástico sob condições ambientais bem caracterizadas. A metodologia probabilística, baseada em estatística e incertezas, oferece uma melhor perspectiva dos fenômenos reais que acontecem na estrutura dos navios. Esta pesquisa tem como objetivo apresentar resultados de confiabilidade estrutural em projetos e planejamento da manutenção para a chapa do fundo dos cascos dos navios, as quais são submetidas a esforços variáveis pela ação das ondas do mar e da corrosão. Foram estudados modelos estatísticos para a avaliação da estrutura da viga-navio e para o detalhe estrutural da chapa do fundo. Na avaliação da estrutura da viga-navio, o modelo desenvolvido consiste em determinar as probabilidades de ocorrência das solicitações na estrutura, considerando a deterioração por corrosão, com base numa investigação estatística da variação dos esforços em função das ondas e a deterioração em função de uma taxa de corrosão padrão recomendada pela DET NORSKE VERITAS (DNV). A abordagem para avaliação da confiabilidade dependente do tempo é desenvolvida com base nas curvas de resistências e solicitações (R-S) determinadas pela utilização do método de Monte Carlo. Uma variação estatística de longo prazo das adversidades é determinada pelo estudo estatístico de ondas em longo prazo e ajustada por uma distribuição com base numa vida de projeto conhecida. Constam no trabalho resultados da variação da confiabilidade ao longo do tempo de um navio petroleiro. O caso de estudo foi

simplificado para facilitar a obtenção de dados, com o objetivo de corroborar a metodologia desenvolvida.

Palavras-chave: Confiabilidade. Estruturas. Viga-Navio. Ondas. Corrosão.

ABSTRACT

Engineering is the science that transforms the processes of the applied science to real facts. Our world is surrounded by these achievements and it is necessary that people feel comfortable with them. Thus, safety becomes an important factor that must be considered in any design. In the engineering of ships, a satisfactory level of security and consequently a correct structural design is currently based on deterministic approaches aiming to obtain structures able to withstand the loads worst-case scenario over a period of time. The main loads in the structure of a ship is due to the action of nature (wind, waves, currents and storms), or even mistakes made by humans (internal explosions, external explosions and collisions). Due to the randomness of these events, the structural reliability of a ship should be considered as a stochastic environmental problem under specific conditions. The probabilistic approach based on statistical uncertainties provides a better perspective of the real phenomena that occur in the structure of the ships. This research has the objective of presenting results of structural reliability in projects and maintenance planning for the bottom plate of the ship hull, which is subjected to varying efforts by the action of the shock waves of the sea and thickness reduction due to corrosion effects. Statistical evaluations were performed for the hull-girder structure and the structural detail of the bottom plate. In the evaluation of the hull-girder model, the objective of the developed method is to determine the probability of occurrence of loads that support the structure, considering the deterioration due to corrosion. The wave loads occurrence have been defined on measurements of wave heights from buoy at the Peru's sea and deterioration of bottom plate due to corrosion rate defined by Det Norske Veritas (DNV) standard. The approach for assessing the time-dependent reliability is developed based on resistance and solicitations curves (R-S), determined using the Monte Carlo method. A statistical variation in long-term adversities is determined by statistical analysis of waves in long term and adjusted by a distribution based on life of known design. The study presents results of the variation of the reliability over time for an oil-tanker ship. The case of study was simplified to facilitate the acquisition of data for the purpose of corroborating the developed methodology.

Key-words: Reliability. Structures. Waves. Corrosion.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	O PROBLEMA DA CORROSÃO EM NAVIOS E SUA RELAÇÃO COM A INTEGRIDADE ESTRUTURAL	18
1.2	OBJETIVO DO ESTUDO	21
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
3	ANÁLISE ESTRUTURAL DO NAVIO	28
3.1	TENSÃO LONGITUDINAL PRIMÁRIA.....	28
3.2	TENSÃO LONGITUDINAL SECUNDÁRIA	34
3.2.1	TENSÃO SECUNDÁRIA EM PERFIS PESADOS	37
3.2.2	TENSÃO SECUNDÁRIA EM PERFIS LEVES	38
3.3	TENSÃO LONGITUDINAL TERCIÁRIA.....	39
4	ESTUDO DE ONDAS	41
4.1	ONDAS DE SUPERFÍCIE.....	41
4.1.1	CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS.....	42
4.2	ESTATÍSTICA DE ONDAS	43
5	CONFIABILIDADE	45
5.1	VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	45
5.2	VALORES CARACTERÍSTICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE	46
5.3	ESTADO LIMITE.....	47
5.4	SISTEMAS DO TIPO R-S	48
5.5	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	51
5.6	ÍNDICE DE CONFIABILIDADE β	52

6	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA.....	54
6.1	SOLICITAÇÕES	55
6.2	RESISTÊNCIA	60
6.2.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS	60
6.2.2	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA DO MATERIAL ...	61
6.2.3	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DO AÇO NAVAL.....	61
6.3	CONFIABILIDADE.....	63
7	ESTUDO DE CASO.....	65
7.1	COMPARAÇÃO DO ESTUDO	65
7.1.1	COMPARAÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES E FORÇAS CORTANTES.....	65
7.1.2	COMPARAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE FALHA E DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE	71
7.2	DETALHE DO TRABALHO	77
7.3	DADOS DO NAVIO.....	80
7.4	ANÁLISE ESTRUTURAL	81
7.5	ESTATÍSTICA DE ONDAS.....	88
7.6	DISTRIBUIÇÃO DAS SOLICITAÇÕES (S)	89
7.7	DISTRIBUIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS (R)	92
	Figura 7-23 Distribuição das resistências (R).....	93
7.8	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	93
7.9	Dimensionamento do navio	98
8	CONCLUSÕES	102
8.1	Sugestões para trabalhos futuros	103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXO A – FATOR DE FORMA K PARA TENSÃO LONGITUDINAL TERCIÁRIA 108	
ANEXO B – TABELA DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	109
ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO NAVIO ESTUDADO	111
ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO DOS CARREGAMENTOSNO NAVIO ESTUDADO	112
ANEXO E –CARREGAMENTOS , FORÇAS CORTANTES E MOMENTOS FLETORES	113
ANEXO F – DETALHE DO MÉTODO MONTE CARLO	116

LISTA DE FIGURAS

Figura1-1 Causas de perdas de navios no mundo de 1997 - 2006.....	18
Figura 2-1 Tensões admissíveis para Navios [22].....	25
Figura 3-1 Teoria da viga–vavio	29
Figura 3-2 Cargas distribuídas ao longo do navio[24].....	31
Figura 3-3 Forças cortantes ao longo do navio[24]	32
Figura 3-4 Momentos fletores ao longo do navio[24]	33
Figura 3-5 Detalhe de um painel do fundo[25]	35
Figura 3-6 Perfil e chapa colaborante.....	36
Figura 3-7 Estrutura terciária	40
Figura 4-1 Parâmetros de onda.....	42
Figura 5-1 Distribuições de probabilidade de R e de S[3][12]	50
Figura 6-1 Organograma.....	54
Figura 6-2 Ondas que atingem ao navio.....	58
Figura 6-3 Variação da tensão terciária.....	59
Figura 6-4 Movimentação da função de solicitações	59
Figura 6-5 Confiabilidade vs tempo.....	63
Figura 7-1 Forças cortantes na condição de mar calmo	68
Figura 7-2 Momento fletor na condição de mar calmo.....	68
Figura 7-3 Forças cortantes na condição de mar com ondas	70
Figura 7-4 Momento fletor na condição de mar com ondas	70
Figura 7-5 Treliça isostática	72
Figura 7-6 R-S na barra 1	73
Figura 7-7 Função G na barra 1.....	74
Figura 7-8 Chapa retangular com duas trincas numa das faces.....	76

Figura 7-9	Peso em aço do navio estudado	81
Figura 7-10	Tensões longitudinais na condição de mar calmo	82
Figura 7-11	Tensões longitudinais totais em mar calmo (h=0,1m)	83
Figura 7-12	Tensões longitudinais na condição de mar com onda crítica ($\varphi=0$, tosamento)	84
Figura 7-13	Tensões longitudinais totais na condição de mar com onda crítica (h=4,34m) em tosamento	84
Figura 7-14	Tensões longitudinais na condição de mar com onda crítica ($\varphi=\pi$, alquebramento)	85
Figura 7-15	Tensões longitudinais totais com onda crítica (h=4,34) em alquebramento	85
Figura 7-16	Tensões longitudinais totais para as condições de mar calmo, mar com onda crítica e $\varphi=0$, mar com onda crítica e $\varphi=\pi$	86
Figura 7-17	Tensões longitudinais máximas em função do deslocamento da onda	87
Figura 7-18	Máximas tensões longitudinais em função da amplitude de onda .	88
Figura 7-19	Função de probabilidade de ocorrência de ondas no mar do norte do Peru	89
Figura 7-20	Relação entre as tensões longitudinais totais e as amplitudes de ondas	90
Figura 7-21	Distribuição das solicitações (S)	91
Figura 7-22	Variação das solicitações (S) em função do desgaste da chapa	92
Figura 7-23	Distribuição das resistências (R)	93
Figura 7-24	Curva G para 0% de desgaste na chapa estudada	94
Figura 7-25	Efeito da corrosão na curva G	94

Figura 7-26 Probabilidade de falha (P_f) e probabilidade de sucesso (P_s) em função do tempo e a taxa de corrosão	96
Figura 7-27 Índice de confiabilidade ao longo do tempo.....	97
Figura 7-28 Probabilidade de falha (P_f) para o caso de estudo 2.....	99
Figura 7-29 Índice de confiabilidade para o caso de estudo 2.....	99
Figura 7-30 Variação do índice de confiabilidade em função do módulo da seção mestra	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Índice de confiabilidade-alvo de acordo com Mansour (1997)	27
Tabela 6-1 Ponto de fluência mínimo para materiais estruturais em navios [2]	60
Tabela 6-2 Dados do estudo estatístico do aço estrutural CA50 10	62
Tabela 7-1 Dados do navio	66
Tabela 7-2 Distribuição de carregamentos $w(x)$	66
Tabela 7-3 Resultados do programa PC-SHCP na condição de mar calmo.....	67
7-4 Resultados da planilha na condição de mar calmo	67
Tabela 7-5 Resultados do programa PC-SHCP na condição de mar com ondas	69
Tabela 7-6 Resultados da planilha na condição de mar com ondas	69
Tabela 7-7 Características das variáveis básicas no exemplo 1.....	75
Tabela 7-8 Primeira comparação de P_f e β	77
Tabela 7-9 Características das variáveis básicas no exemplo 2.....	72
Tabela 7-10 Segunda comparação de P_f e β	74
Tabela 7-11 Dados principais do navio a ser estudado	80
Tabela 7-12 Obtenção do índice de confiabilidade	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O PROBLEMA DA CORROSÃO EM NAVIOS E SUA RELAÇÃO COM A INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Os metais, desde os princípios da história, sempre foram utilizados pela humanidade como um meio para o progresso. O homem compreendeu a sua utilização e importância criando, assim, ciências, como a Metalurgia. Desde a era industrial foram criados vários tipos de aços para diferentes aplicações, mas, todos apresentavam o mesmo problema de desgaste ao longo do tempo. Esta deterioração do material foi denominada corrosão.

O dano estrutural é reconhecido como o principal fator causador de incidentes marítimos. De acordo com a figura 1-1, baseada num estudo recente, realizado pela Internacional Union of Marine Insurance (IUMI) [40], é possível observar que em um total de perdas de navios entre os anos de 1997 a 2006, a degradação do casco ocupou a quinta posição de causas, considerando-se perdas de navios com mais de 500 GT (Tonelagem Bruta).

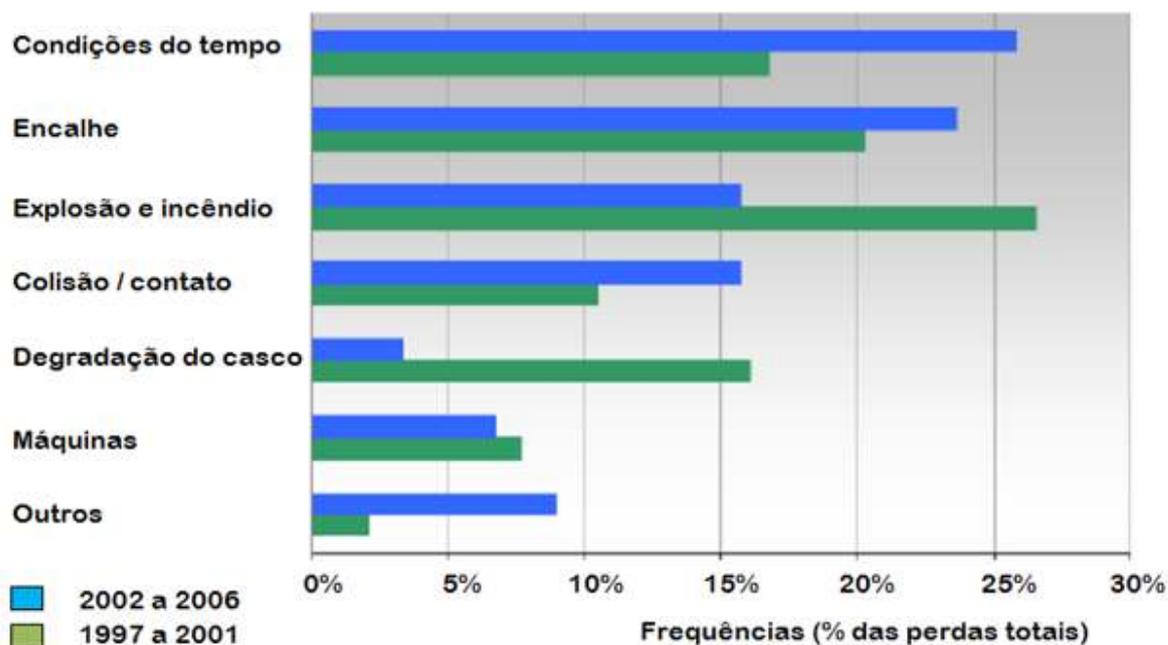


Figura1-1 Causas de perdas de navios no mundo de 1997 - 2006

Conhecendo-se a importância dos danos que ocorrem devido à deterioração estrutural, a maior barreira à implementação de boas práticas, com a finalidade de reduzir o impacto da corrosão, é a grande fluidez com que os navios são comprados e vendidos. Os proprietários sabem que não ficaram com os navios por tempo suficiente para preocupar-se com problemas relacionados à corrosão. Assim, percebe-se que grande parte dos navios não são construídos com os melhores materiais e recobrimentos contra a corrosão. Portanto, os navios, precisarão de maiores tempos de manutenção durante sua vida útil.

Diferentes métodos de proteção contra a corrosão foram criados com o objetivo de parar ou, ao menos, atenuar seus efeitos, porém, só se consegue diminuir a velocidade do processo. Atualmente, o principal agente protetor contra a corrosão na estrutura de navios são os recobrimentos de pinturas especiais, que garantem o isolamento da estrutura do meio corrosivo [13]. A adequada aplicação na estrutura e correta seleção da pintura garante uma boa proteção contra a corrosão.

As possíveis pinturas protetoras são [13],[39]:

- Epóxis:
 - Carvão epóxi
 - Silicone modificado epóxi
 - Eletrodeposição epóxi
 - Sólido de alta epóxi sobre a linha de água
 - Puro epóxi amime
 - Epóxi amino / amides
 - Hidrocarbono (cera)
- Termoplásticos:
 - Pulverização térmica termoplástico
 - 100% cera sólida preventiva de ferrugem
- Outras
 - Carvão poliuretano
 - Poliuretano (poliol alifático) revestimento superior
 - Zinco silicatos

Um método secundário utilizado é a proteção catódica, que foi introduzida pela primeira vez por Sir Humphrey Davy, em 1824, para a proteção do recobrimento feito de chapas de cobre, da madeira usada em navios na marinha de guerra britânica. Posteriormente, em 1849, o Instituto de Engenharia Civil da Inglaterra encomendou a Robert Mallet um estudo sobre a corrosão de estacas metálicas em estuários.

Para resolver o problema, Mallet sugeriu o uso de anodos de zinco e galvanização (processo pelo qual o material a ser protegido é revestido por um metal mais nobre com o objetivo de evitar a corrosão). Porém, na década de 60, com o início da crise do petróleo, a proteção catódica, para estruturas *off shore*, ganhou destaque. No Brasil, a Petrobrás utilizou a proteção catódica pela primeira vez em escala industrial na década de 60, na proteção de oleodutos submarinos e instalações portuárias, estendendo-a, posteriormente, para instalações terrestres [39].

A corrosão em navios é o resultado de diferentes tipos de alterações, cuja alteração mais comum é a corrosão geral. Estudos mostram que a taxa padrão de corrosão é de 0,01mm por ano [35], caracterizando uma demora de aproximadamente 62 anos para que a estrutura tenha uma redução de 6,4mm. Devido à baixa taxa de alteração, a corrosão geral não é considerada no aspecto da vida útil do navio. Esta falta de preocupação pela corrosão faz com que a mesma seja uma das principais responsáveis pelos danos estruturais em navios, como mostrado na figura 1-1.

Os acidentes com grande impacto ambiental, bem como, o rápido desenvolvimento observado na indústria naval nas últimas décadas mostram a necessidade da aplicação de técnicas de análise de riscos, já consagradas nas indústrias química, aeroespacial e nuclear, como uma tendência a ser seguida na complementação das técnicas de engenharias convencionalmente aplicadas a navios. É de vital importância considerar o efeito prejudicial causado pela corrosão, devido à falta de interesse neste aspecto.

1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um método para calcularo nível de confiabilidade estrutural de um navio ao longo do tempo, baseado no estudo das tensões longitudinais (primária, secundária e terciária), sua variabilidade em função das ondas do mar e a taxa de corrosão em um determinado período de tempo. Deste modo, será possível estabelecer critérios para definir intervalos seguros de manutenção preventiva do chapeamento do navio, oferecendo níveis aceitáveis de segurança.

Serão realizados cálculos das tensões primárias em função das alturas de ondas que atingem o navio, usando uma planilha do programa de cálculo Microsoft Excel 2007, desenvolvida na disciplina PNV5009 [25]. Os resultados da planilha serão comparados com o software comercial “*Ship Hull Characteristic Program (SHCP)*”. Será considerada a variação da tensão terciária devido à redução da espessura da chapa do fundo do navio. A confiabilidade estrutural, por sua vez, será analisada em função do tempo.

O cálculo da probabilidade de falha (P_f), e o índice de confiabilidade (β), serão feitos em uma planilha de Excel, utilizando-se o método Simulação de Monte Carlo. Esta planilha será validada com resultados da literatura [15],[30].

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho apresenta a seguinte organização:

O capítulo 2 apresenta uma cronografia dos trabalhos referentes à confiabilidade estrutural. Mostra a evolução dos estudos na engenharia naval, as normas e as pesquisas atuais.

O capítulo 3 faz uma revisão dos conceitos de análise estrutural daviga-navio. Neste capítulo, é apresentada a análise determinística clássica utilizada para os projetos de navios.

O capítulo 4 apresenta um estudo probabilístico de ondas e o capítulo 5 faz uma revisão básica dos conceitos de confiabilidade.

O capítulo 6 introduz a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo da confiabilidade estrutural do navio, baseado nas tensões longitudinais, nas probabilidades de ocorrência de ondas e na taxa de corrosão.

O capítulo 7 apresenta o desenvolvimento do método apresentado no capítulo 6, e os resultados obtidos a partir do estudo simplificado de um navio petroleiro.

Finalmente, no capítulo 8 são apresentadas as conclusões, com base nos resultados e nas pesquisas de literatura referentes ao tema de investigação e de planejamento, seguido pela bibliografia utilizada no presente trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O projeto ideal é aquele que não sofre falhas e cumpre com as funções estabelecidas durante um período de tempo determinado em condições de projeto específicas [1],[9],[10],[12],[17],[27]. Para isto, seria necessário o estudo de todos os possíveis cenários que poderiam causar falhas, estabelecendo parâmetros adequados no desenho do projeto. No entanto, isto é impossível, seja por questões técnicas ou econômicas. Além disso, o processo de falha não é totalmente compreendido e a presença de incertezas faz que sejam necessários estudos das informações históricas e estatísticas do problema. Devido a estas limitações do conhecimento, faz-se necessário desenvolver um estudo probabilístico que analise o custo-benefício de fazer uma manutenção num tempo específico, com o objetivo de reduzir a ocorrência de falhas no sistema.

O início das pesquisas de confiabilidade começou com Rice, onde em seu trabalho intitulado *Mathematical Analysis of Random Noise* [28], estabeleceu pela primeira vez a teoria sobre a taxa média de ultrapassagem de barreiras (*up-crossing rate*). Posteriormente, outros autores como Belyaev [5], Cramer e Ladbetter [5][7] trabalharam na taxa média ao cruzar um limite de segurança (*mean out-crossing rate*).

Na Engenharia, foi na Segunda Guerra Mundial que a confiabilidade se expandiu para as áreas de energia nuclear e pesquisas aeroespaciais e a partir da década de 70, para a indústria aeronáutica, automobilística e civil.

Em 1999, M. Modarres [20] concluiu que um estudo determinístico é baseado em fatos ideais, sendo que, trabalhar dessa forma nas estruturas reais não é prático, além de ser economicamente inapropriado. De acordo com o mesmo autor, o estudo probabilístico é a melhor solução para prever quando o item (produto ou sistema) vai falhar.

Na Engenharia Naval, o estudo da segurança estrutural foi iniciado com métodos determinísticos que proporcionavam margens satisfatórias de segurança. Baseado

em estudos determinísticos, foi verificado que as tensões admissíveis nos navios variam em função do comprimento dos mesmos e uma fórmula que é considerada razoável foi proposta por Abell [10]

$$\sigma_{xx} = 5 \left(1 + \frac{L}{1000} \right) \quad (2.1)$$

onde L é o comprimento do navio e está em pés, σ_{xx} é a tensão longitudinal máxima permitida em Ton / in^2 .

As tensões assim obtidas supõem um navio construído com aço naval comum, que deve estar pousado estaticamente em uma onda de igual comprimento do navio, e de altura $1/20$ deste comprimento.

Outra forma de expressar a variação de tensões admissíveis com o comprimento do navio é através da fórmula de Tobin [7]

$$\sigma_{xx} = \sqrt[3]{L} \quad (2.2)$$

As duas curvas, juntamente com os dados de alguns navios de grande porte, derivados de um trabalho de Bates e Wanless [4], junto com os dados de navios petroleiros do trabalho de Murray [22] são apresentados na figura 2-1.

A figura 2-1 mostra que as tensões admissíveis para os grandes petroleiros eram muito maiores que as fornecidas pelas fórmulas 2.1 e 2.2. Se estender essas tensões de grandes petroleiros para outros navios, então qualquer projeto baseado naquelas expressões será muito conservador, o que pressupõe um sobre dimensionamento estrutural, que faz com que o projeto seja antieconômico.

Posteriormente, Murray, em 1964, adota aproximações estatísticas para determinar o máximo momento fletor na estrutura. A partir desse momento é introduzido o conceito de altura efetiva da **onda crítica**, que é definida como a altura da onda que tem igual comprimento ao do navio [22].

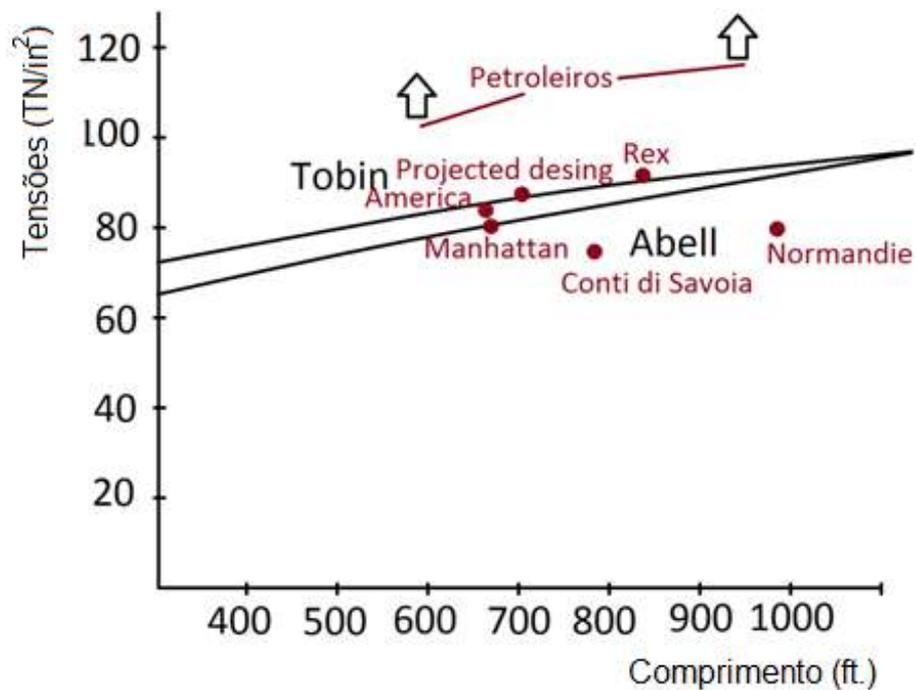


Figura 2-1 Tensões admissíveis para Navios [22]

Determinou-se, desse modo, que a probabilidade de exceder uma dada razão altura/comprimento, que é plotada em um gráfico para navios de 700, 800 e 900 pés de comprimento e com altura de onda igual ao comprimento do navio, corresponde a uma probabilidade de $2 * 10^{-8}$ [10],[22].

Baseado nesses princípios, Murray encontrou uma relação entre o comprimento e a altura para a onda crítica efetiva [10]

$$h = 3,75 L^{0,3} \quad (2.3)$$

onde h é altura da onda em pés.

Atualmente, nas tensões adotadas nos petroleiros, a influência dos métodos de controle da corrosão tem grande importância. Assim, em navios nos quais esse controle é aplicado, foi permitida uma redução de aproximadamente 5% no módulo da secção, que aumenta na mesma porcentagem a tensão admissível.

De acordo com o International Ship Structure Committee (ISSC) [40], a teoria da confiabilidade estrutural foi introduzida em estruturas de navios nos anos 70, tendo sido utilizada como ferramenta para estabelecer margens de segurança entre o carregamento e a resistência, levando-se em consideração incertezas no carregamento e na resistência estrutural.

Um problema importante e frequentemente estudado é a confiabilidade da viga-navio, que é a simulação da estrutura do navio como se fosse uma viga simples. A confiabilidade dependente do tempo tem sido extensivamente aplicada para os efeitos de deterioração por corrosão e trincas de fadiga [33],[34], mas no presente trabalho é apresentado um estudo baseado na probabilidade de ocorrência de solicitações maiores que as projetadas em função das alturas das ondas do mar.

Em 1997, Mansour [17] revisou as pesquisas de informações disponíveis em índices de confiabilidade β , índice que estabelece um determinado grau de confiabilidade numa estrutura para a viga-navio, e sugeriu que o índice de confiabilidade β , a ser definido na posterior seção 5.6, para que a resistência ao colapso de navios comerciais fosse de 3,5 para a tensão longitudinal primária.

Mansour estudou quatro navios (2 cruzeiros, 1 navio porta-contêinerese e 1 navio petroleiro), durante 15 anos em determinadas zonas marítimas, com o objetivo de analisar os momentos fletores. Na sua pesquisa, observam-se desenhos gráficos dos momentos fletores e a probabilidade de que eles sejam maiores que os momentos fletores de projeto.

Fundamentado nos resultados dos momentos fletores, Mansour estabeleceu índices de confiabilidade β , baseado no nível de risco associado a desenhos satisfatórios de navios que foram alvo de estudos de confiabilidade, (e.g. Mansour, 1972, 1974, 1981, 1990; Mansour e Faulkner, 1973; Soares e Moan, 1985) [17]. Os estudos foram embasados por análise da confiabilidade a curto e longo prazo em função da probabilidade de falha estrutural, baseada na teoria de estados limites em função do tempo, da corrosão e da fadiga.

A tabela 2-1 apresenta os índices de confiabilidade β propostos por Mansour, em 1997, para navios comerciais e navios de guerra, nas tensões longitudinais primária, secundária e terciária.

Estado Limite	Navios Comerciais	Navios de Guerra
Último Primário	3,5	4,0
Último Secundário	2,5	3,0
Último Terciário	2,0	3,0

Tabela 2-1 Índice de confiabilidade-alvo de acordo com Mansour[17]

Guedes Soares *et. al.*[33] sugeriram que o índice de confiabilidade (β) para resistência ao colapso da viga-navio fosse de 3,7 para a condição “**as built**” e 3,0 o limite mínimo de cascos corroídos.

Atualmente, as empresas certificadoras como a DNV, IACS, ABS, entre outras, utilizam fórmulas baseadas em estudos determinísticos para a obtenção do máximo momento fletor permitido para um navio de determinada geometria. Os momentos fletores máximos são obtidos em função de uma onda de comprimento igual ao do navio.

3 ANÁLISE ESTRUTURAL DO NAVIO

O navio é alvo de estudo em diferentes níveis de detalhes estruturais, que abrange do geral (tensões primárias) ao específico (tensões secundárias e terciárias), devido a sua permanente exposição às tensões normais e de cisalhamento geradas por forças cortantes e momentos fletores.

A estrutura do navio está projetada para suportar satisfatoriamente as solicitações presentes ao longo da vida útil, sendo submetido constantemente a cargas (seu próprio peso acrescido dos carregamentos) durante um determinado período de tempo.

A presente seção expõe o método de análise das forças estáticas e dinâmicas que afetam a estrutura do navio.

Devido à geometria do navio, pode-se assumir, na fase de projeto, que as principais tensões responsáveis pela correta seleção de material e geometria estrutural são as tensões longitudinais divididas em três: tensão longitudinal primária, que estuda a estrutura global do navio baseada na teoria de viga-navio; tensão longitudinal secundária, que estuda os reforços longitudinais entre duas seções do navio e a tensão longitudinal terciária, que estuda o chapeamento entre quatro suportes estruturais quaisquer do navio.

As seguintes subseções apresentam, detalhadamente, as tensões longitudinais envolvidas no presente trabalho.

3.1 TENSÃO LONGITUDINAL PRIMÁRIA

Na tensão longitudinal primária o estudo é baseado na teoria simples de viga, a qual considera a estrutura inteira do navio como se fosse uma viga. Isto é possível devido à particular geometria que o navio possui, na qual o comprimento é superior às outras dimensões, como a boca e o pontal.

Ao se fazer o estudo da tensão longitudinal primária baseado na teoria da viga-navio, é necessário que, no navio a ser estudado, a relação entre o comprimento (L) e a boca (B), e entre o comprimento (L) e o pontal (D), sejam maiores que oito (8) [10]. Para considerar que uma estrutura possa atuar como reforçador longitudinal é necessário que tenha um comprimento maior que $2/3$ do comprimento do navio [10],[38].

A figura 3-1 mostra a representação de um navio petroleiro baseado na teoria da viga-navio.

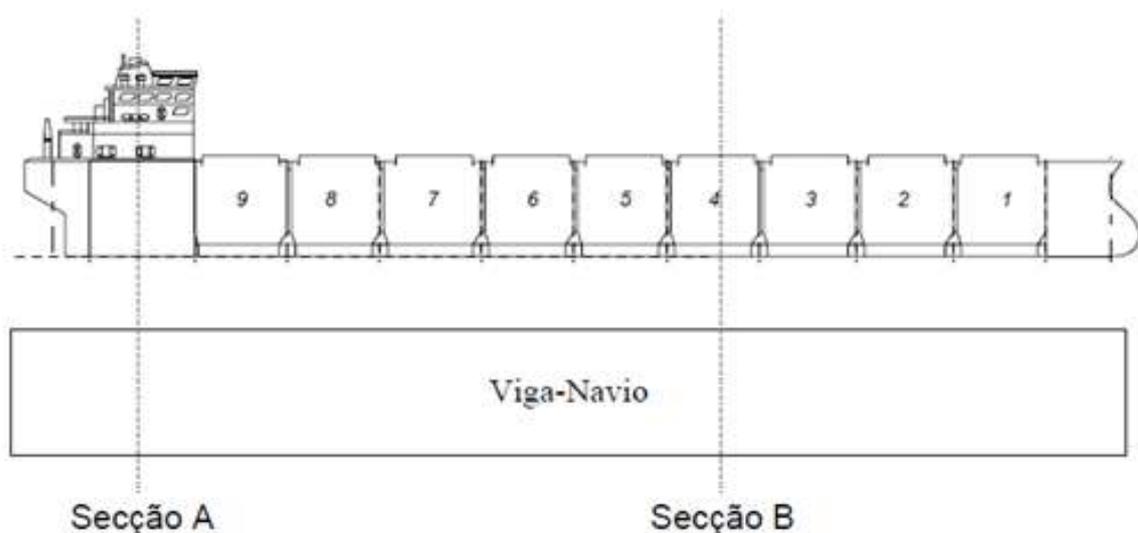


Figura 3-1 Teoria da viga-vavio

A tensão primária varia ao longo do comprimento do navio, uma vez que a distribuição das cargas e os empuxos gerados pelas ondas não são homogêneos.

A tensão primária é obtida a partir de uma série de operações matemáticas, as quais têm início com a determinação do próprio peso do navio e o empuxo efetuado pelo mar.

O peso do navio é expresso pela seguinte equação [25]

$$\vec{P} = \int_0^x p(x)dx + \sum \text{cargas} \quad (3.1)$$

onde, $p(x)$ representa o peso linear (peso por unidade de comprimento) num determinado ponto do navio.

O empuxo do navio é a reação gerada pela água e depende da geometria da onda que atinge o navio e da geometria submersa do navio no tempo t . Ele é obtido pela seguinte expressão

$$\vec{E} = \int_0^x e(x)dx \quad (3.2)$$

onde $e(x)$ representa o empuxo por unidade de comprimento do navio para um tempo t que é igual à área da seção submersa no ponto de análise.

Uma vez determinado o peso e o empuxo atuantes no navio, deve-se verificar se as duas medidas satisfazem as condições do equilíbrio

Peso igual ao empuxo

LCB (posição longitudinal do centro de flutuação) e o LCG (posição longitudinal do centro de gravidade) devem ser rigorosamente iguais.

O LCB depende da distribuição do volume submerso que é função da área submersa em cada seção do navio até o calado de análise, o que é comprovado quando $\vec{P} = \vec{E}$. O LCG , por sua vez, depende da distribuição de massas, o que é comprovado quando a soma dos momentos gerados pelas cargas do navio é igual a zero. Os momentos do peso e do empuxo são determinados pelas seguintes equações

$$\text{Momento do peso} = \int_0^x xp(x)dx + \sum \text{cargas} * LCG_{\text{carga}} \quad (3.3)$$

$$\text{Momento do empuxo} = \int_0^x xe(x)dx \quad (3.4)$$

Tendo-se os momentos correspondentes ao peso e ao empuxo do navio pode-se determinar o LCG e o LCB pelas seguintes equações

$$LCG = \text{Momento do peso} / \vec{P} \quad (3.5)$$

$$LCB = \text{Momento do empuxo} / \vec{E} \quad (3.6)$$

Uma vez que o equilíbrio é obtido, podem-se determinar as cargas discretas que atingem todo o comprimento do navio, representadas na seguinte equação

$$q(x) = p(x) + \text{cargas}(x) - e(x) \quad (3.7)$$

onde $q(x)$ representa as cargas num determinado ponto do comprimento do navio.

A figura 3-2 mostra uma distribuição típica de cargas/comprimento em um navio petroleiro nas condições de mar calmo, tosamento e alquebramento [11].

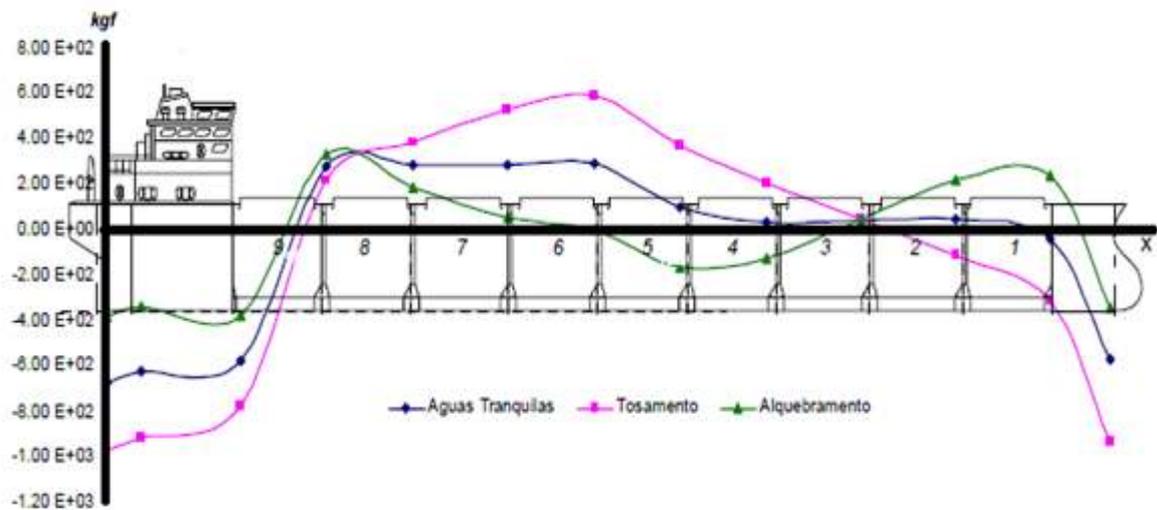


Figura 3-2 Cargas distribuídas ao longo do navio[25]

Baseado numa integração simples pode-se obter, a partir da função de cargas $q(x)$, a função de forças cortantes atuantes ao longo da viga-navio

$$Q(x) = \int_0^x q(x)dx \quad (3.8)$$

onde $Q(x)$ representa as forças cortantes num determinado ponto do comprimento do navio.

Em geral, o diagrama de força cortante apresenta valor nulo próximo à meia nau e valor máximo próximo à $L/4$. A figura 3-3 ilustra uma distribuição típica das forças cortantes em um navio petroleiro nas condições de mar calmo, tosamento e alquebramento [25].

Novamente, por meio de uma integração simples, pode-se obter, a partir da função de força cortante, a função de momento fletor

$$M(x) = \int_0^x Q(x)dx \quad (3.9)$$

onde $M(x)$ representa os momentos fletores num determinado ponto do comprimento do navio.

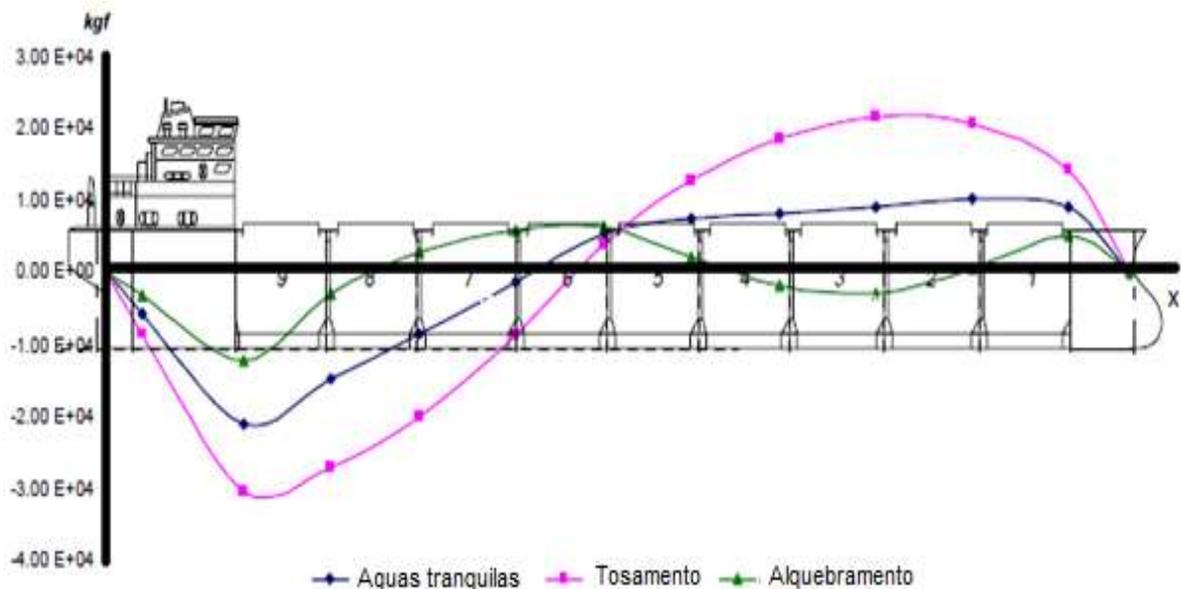


Figura 3-3 Forças cortantes ao longo do navio [25]

Em geral, o diagrama de momento fletor apresenta valor máximo próximo à meia-nau e valor nulo nos extremos. A figura 3-4 mostra uma distribuição típica dos

momentos fletores em um navio petroleiro, nas condições de mar calmo, tosamento e alquebramento [25][11].

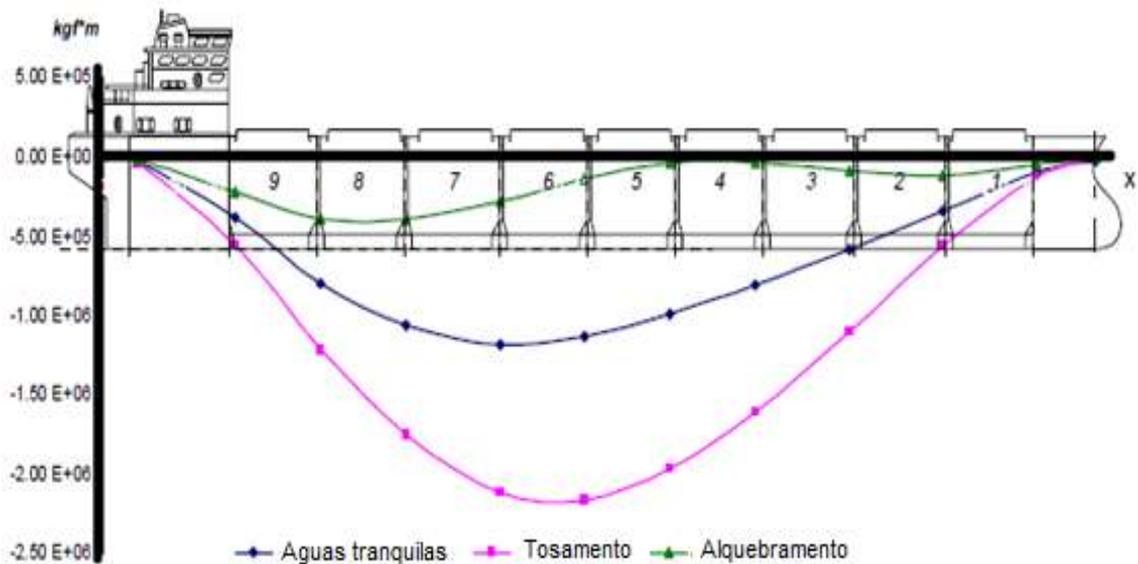


Figura 3-4 Momentos fletores ao longo do navio[25]

Uma vez calculada a função de força cortante e a função do momento fletor, pode-se saber os pontos críticos (Lx), onde as tensões normais e cortantes são máximas. Nesses pontos críticos serão obtidos a altura da linha neutra, que é a altura no pontal do navio onde a tensão normal atuante é nula, (Y_{LN}); e o momento de inércia em relação à linha neutra.

Estes dois fatores são necessários para a obtenção da tensão primária nesses pontos críticos. A altura até a linha neutra desde a linha base do navio (quilha) é obtida a partir da equação 3.10 [10],[25]

$$Y_{LN} = \frac{\sum(A_i * Y_{i,quilha})}{\sum A_i} \quad (3.10)$$

onde A_i representa a área dos elementos estruturais que formam parte da seção analisada e $Y_{i,quilha}$ representa a distância do elemento analisado até a quilha.

O momento de inércia, com respeito à linha neutra, representado por I_{LN} , é obtido a partir da equação 3.11 [10],[25]

$$I_{LN} = \sum(I_p + I_t) \quad (3.11)$$

onde I_p representa a inércia própria de cada elemento da seção com respeito a seu centro de gravidade e I_t representa a inércia de transferência, segundo o teorema de Steiner, e são obtidas pelas seguintes equações [10],[25]

$$I_p = (a_x b_x^3) / 12 \quad (3.12)$$

$$I_t = A_i * (Y_{LN})^2 \quad (3.13)$$

onde a_x representa as medidas verticais das chapas da seção estudada de área A_i e b_x representa as medidas horizontais das chapas da seção estudada de área A_i . Lembrando que o momento de inércia representa a resistência de uma dada seção transversal em girar em torno de um eixo (no caso em estudo o eixo transversal da seção, ou seja, na direção da boca do navio).

Finalmente, é possível determinar a tensão longitudinal primária, expressa pela seguinte equação [25]

$$\sigma_{xx}^1(x) = M(x) \frac{(Y_{i,quilha})}{I_{LN}} \quad (3.14)$$

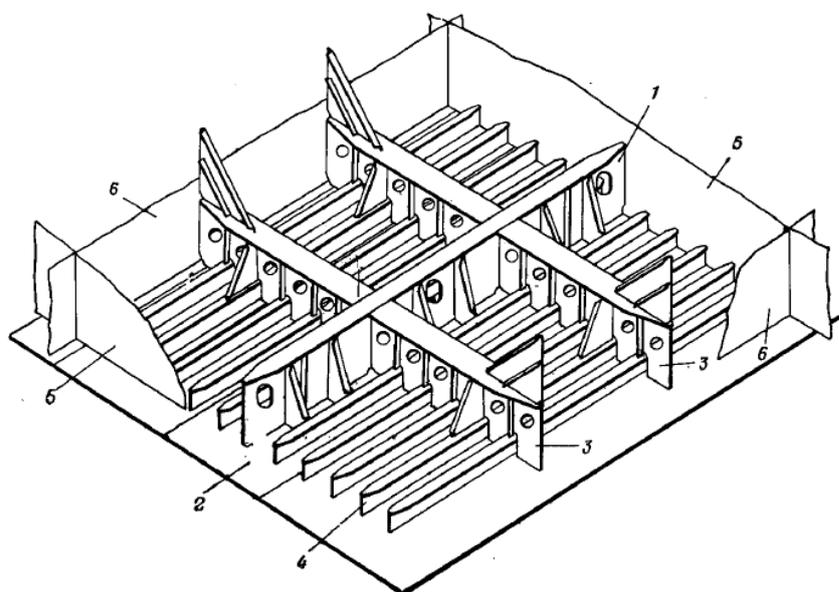
onde $Y_{i,quilha}$ representa a altura vertical entre a altura da linha neutra (Y_{LN}) e o ponto de análise.

3.2 TENSÃO LONGITUDINAL SECUNDÁRIA

A tensão secundária é um estudo local no navio, baseado numa seção com uma determinada geometria, onde o chapeamento combinado com os perfis pesados (que sempre servem de apoio aos perfis leves, recebendo destes a carga

que lhes foi transmitida pelas unidades de chapeamento, são perfis pesados os anéis gigantes, as sicordas, as hastilhas, as quilhas, as longarinas e as escoas) e os perfis leves (que limitando as dimensões das unidades de chapeamento o enrijecem, tais como cavernas, vaus de conveses, longitudinais, entre outros) suportam diferentes forças. Entre essas, a força hidrostática da pressão da água do mar. Por ter basicamente dois tipos de perfis, este tipo de tensão é analisado em duas partes, quais sejam: tensão secundária em perfis pesados e tensão secundária em perfis leves.

Esse conjunto de chapeamento, perfis leves e perfis pesados, considerado entre duas anteparas estruturais, é que se costuma designar por estrutura secundária. Vê-se que, como a estrutura secundária contém unidades de chapeamento, nela também está contida a própria estrutura terciária, a qual nada mais é do que o conjunto de unidades de chapeamento, sem que nele se considerem os perfis. Entretanto, as tensões secundárias estão associadas com as deformações secundárias e as tensões terciárias com as deformações terciárias.



1. Quilha
2. Chapeamento
3. Hastilhas
4. Longitudinal leve
5. Antepara transversal
6. Antepara longitudinal

Figura 3-5 Detalhe de um painel do fundo [25]

Observando-se, da figura 3-5, nota-se que todos os enrijecedores leves ou pesados estão sujeitos à flexão devida às cargas laterais no chapeamento e, como possuem ligações entre si, formam um conjunto para resistir a estas cargas, tornando assim a análise deste tipo de estrutura bastante difícil em face ao grande número de elementos que a envolve. Pode ser utilizado o seguinte esquema para análise preliminar das tensões secundárias e sua superposição com as terciárias:

Cálculo das tensões terciárias nas unidades de chapeamento, devido a pressão lateral, considerando esta unidade limitada por perfis leves e/ou pesados, desprezando qualquer deflexão dos perfis. Esta unidade deve ser verificada quanto a estabilidade sob a ação da tensão primária.

Cálculo das tensões secundárias nos perfis leves, supondo que estes se apóiam sem recalque nos perfis pesados. Associa-se aos perfis leves uma certa largura de chapa, para funcionar como um de seus flanges. Essa porção de chapa denomina-se chapa colaborante. Emprega-se a teoria simples de viga e adotam-se hipóteses adequadas sobre as rotações nas extremidades de cada tramo da viga constituída do perfil mais sua chapa colaborante. Assim o problema se reduz ao da análise de uma viga com um só tramo. Atribui-se a essa viga uma certa fração da carga lateral que age sobre o chapeamento, daí se transmitindo ao perfil. A estima dessa fração de carga será discutida posteriormente.

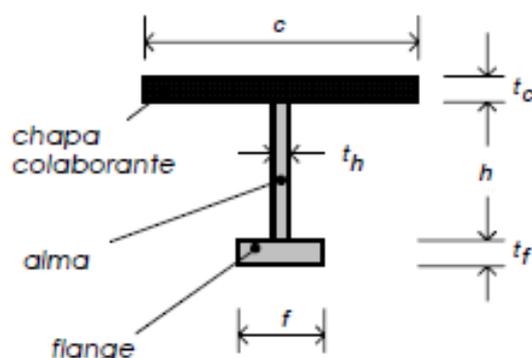


Figura 3-6 Perfil e chapa colaborante

Cálculo das tensões secundárias em perfis pesados, atuantes na grelha formada pelo chapeamento com os perfis mais pesados. Existem diversos métodos para o cálculo de tensões secundárias em perfis pesados com diferentes graus de complexidade e precisão. No mais simples, método da teoria simples de viga com um só tramo procura-se estimar as tensões secundárias em perfis pesados ignorando-se o comportamento de grelha e imaginando-se que ela pode ser suficientemente bem representada analisando-se cada um daqueles perfis separadamente, como se desligado estivesse dos demais, e com chapas colaborantes, cargas e condições de extremidade arbitradas. Embora esse método simplifique muito o cálculo, é por demais subjetivo e impreciso, sendo inviável estimar bem aquelas condições que nele devem ser arbitradas, a não ser para certos casos convencionais. Apesar disto é o mais adequado para fases iniciais de análise.

3.2.1 TENSÃO SECUNDÁRIA EM PERFIS PESADOS

A tensão secundária em perfis pesados envolve uma estrutura pesada como a quilha, o chapeamento colaborador e os perfis leves, que ficam dentro do chapeamento colaborador. Isto é estudado entre duas anteparas (existem navios onde os perfis pesados podem ser estudados entre duas cavernas gigantes), que são considerados elementos transversais pesados [10].

A tensão secundária em perfis pesados é analisada no médio vão e no engaste dos perfis pesados. O momento fletor necessário para calcular a tensão longitudinal secundária em perfis pesados é obtido pelas seguintes equações [25]

$$M_{1/2vão}^{Pesado} = \left[\frac{(b^P * P) * (L^P)^2}{24} \right] \quad (3.15)$$

$$M_{Engaste}^{Pesado} = \left[\frac{(b^P * P) * (L^P)^2}{12} \right] \quad (3.16)$$

onde L^P representa a distância entre as anteparas, b^P representa a distância entre perfis pesados, P representa a pressão que age sobre o perfil pesado, a qual é obtida pela seguinte equação: $P = P1(ondas) - P2(carga)$.

Considerando a teoria de vigas [10],[25], a tensão de flexão no reforço longitudinal pesado é obtida pela seguinte equação

$$\sigma_{xx}^{2'} = \frac{M^{Pesado} * (Y_i)}{I_{LN}^P} \quad (3.17)$$

onde Y_i representa a distância entre a linha neutral do perfil e o ponto de estudo e I_{LN}^P representa o momento de inercia em um perfil pesado.

3.2.2 TENSÃO SECUNDÁRIA EM PERFIS LEVES

A tensão secundária leve envolve uma estrutura leve como as longarinas e o chapeamento. Tal tensão é estudada entre duas cavernas [10].

O momento fletor necessário para obter a tensão longitudinal secundária em perfis leves, que é analisada no médio vão e no engaste dos perfis, pode ser calculado pelas seguintes equações

$$M_{1/2vão}^{Leve} = \left[\frac{(b^L * P) * (L^L)^2}{24} \right] \quad (3.18)$$

$$M_{Engaste}^{Leve} = \left[\frac{(b^L * P) * (L^L)^2}{12} \right] \quad (3.19)$$

onde L^L representa a distância entre as cavernas, b^L representa a distância entre perfis leves.

Considerando a teoria de vigas [10],[25], a tensão de flexão no reforço longitudinal leve é obtida pela seguinte equação:

$$\sigma_{xx}^{2''} = \frac{M^{Leve} * (Y_i)}{I_{LN}^L} \quad (3.20)$$

onde Y_i representa a distância entre a linha neutral do perfil e o ponto de estudo e I_{LN}^L representa o momento de inercia em um perfil leve.

3.3 TENSÃO LONGITUDINAL TERCIÁRIA

Em navios e em algumas estruturas oceânicas encontramos como componente estrutural básico o painel estrutural ou chapeamento reforçado. O painel estrutural é composto pelo chapeamento, que assegura a estanqueidade, ao qual é soldado reforçadores, perfis em uma única direção ou em direções ortogonais.

A tensão longitudinal terciária estuda as solicitações que são geradas entre quatro reforçadores quaisquer. O estudo da tensão longitudinal terciária é uma análise de chapas e, conforme mencionado anteriormente, depende de dois fatores importantes, quais sejam: as pressões que agem sobre a chapa, que envolvem a pressão hidrostática gerada pelo oceano e a pressão do carregamento, e a diminuição da espessura da chapa gerada pela corrosão [10]. A tensão longitudinal terciária é obtida pela seguinte equação

$$\sigma_{xx}^3 = [K P] * [b / T^2] \quad (3.21)$$

onde K representa uma constante que depende de a (lado longo da chapa estudada) e b (lado curto da chapa estudada), e é obtida a partir do gráfico apresentado no Anexo-A; P representa as pressões que agem sobre a chapa estudada e T representa a espessura da chapa estudada.

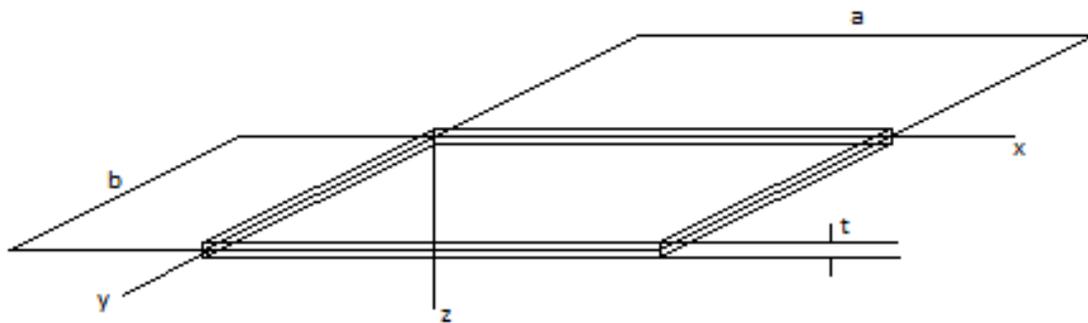


Figura 3-7 Estrutura terciária

Essa análise estrutural das tensões longitudinais primárias, secundárias e terciárias é do tipo determinístico, tendo como objetivo certificar que a soma das solicitações primária, secundária e terciária (tensão longitudinal total), excederá à resistência estrutural do aço naval utilizado na construção do navio.

Atualmente, esta análise é utilizada pelas empresas certificadoras, no entanto, não determina se a estrutura suportará os carregamentos futuros, dada uma redução da área da seção mestra, com índices de confiabilidades ainda aceitáveis.

Nos capítulos seguintes será destacada a importância de incluir um estudo probabilístico na análise estrutural do navio.

4 ESTUDO DE ONDAS

A análise do comportamento do navio no mar tem como objetivo estudar os movimentos e esforços que resultam da ação das ondas nos sistemas oceânicos.

Tendo em vista que é muito difícil uma descrição determinística da superfície do mar, propõe-se, para o estudo do comportamento do navio no mar, um estudo estocástico das ondas, em função de suas amplitudes e comprimentos.

Em 1898, Krylov [36] estudou os movimentos do navio, considerado em um sólido rígido, movimentando-se segundo seus seis graus de liberdade em ondas regulares, que têm uma direção de propagação qualquer em relação ao navio.

Pierson e St. Denis, em 1953 [36], se aproximaram da realidade das movimentações das ondas e do navio com a teoria dos processos aleatórios. Eles consideraram num lugar determinado e em um curto período de tempo, a superfície livre do mar como um processo aleatório gaussiano, devido à sua compatibilidade com as leis da hidrodinâmica, aplicáveis à cinemática e à dinâmica de partículas na água.

O presente capítulo pretende introduzir os princípios básicos da análise probabilística das ondas e suas características.

4.1 ONDAS DE SUPERFÍCIE

As ondas produzidas na superfície livre do mar influenciam nos movimento e também os esforços que suportam a estrutura do navio. Considerando que o mar se apresenta na superfície de forma irregular, a necessidade de poder prever o comportamento dos navios requer um estudo estatístico [26].

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS

Uma das formas mais simples de descrever um perfil de onda livre na superfície do mar é pela onda senoidal bidimensional, quer dizer, uniforme e não limitada no espaço. Os termos mais usados no estudo das ondas são apresentados nesta subseção.

Crista: Parte mais elevada da onda

Cavado: Parte mais baixa da onda

H: Representa a altura da onda, variação vertical entre a crista e o cavado da onda

a: Representa a amplitude de onda, que é igual a metade da altura ($a=H/2$)

L, λ : Representa o comprimento da onda, distância entre duas cristas sucessivas

T: Representa o período da onda, intervalo de tempo entre sucessivas ondas passando em um ponto fixo

f: Representa a frequência, número de picos ou número de cavados que passa por um ponto fixo por segundo. É o inverso do período ($f=1/T$)

A figura 4-1 apresenta de forma gráfica os parâmetros que caracterizam uma onda.

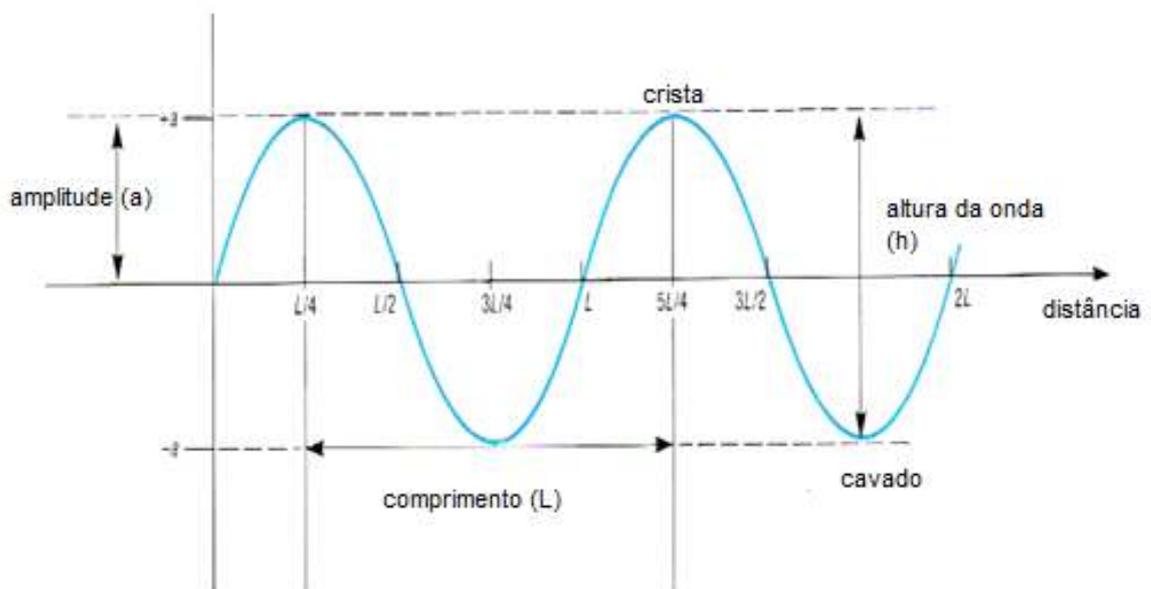


Figura 4-1 Parâmetros de onda

Observações do mar mostram que as partículas seguem trajetórias harmônicas. Isto de fato é considerado na teoria de ondas[36]. Uma partícula tem uma movimentação harmônica simples ao longo do eixo “X” quando sua elongação x é expressa pela equação 4.1[26]

$$x = A \cos (\omega * t + \varphi_0) \quad (4.1)$$

onde A representa a amplitude da onda, ω representa a frequência circular e φ_0 representa a fase entre a resposta e a excitação.

4.2 ESTATÍSTICA DE ONDAS

Como as propriedades fundamentais das ondas de superfície (altura, comprimento, velocidade de fase, etc.) são geradas pelos ventos, o estudo de tais propriedades só pode ser representado mediante métodos estatísticos que são efetuados a partir do domínio do tempo e da frequência.

No domínio do tempo, que é o principal objeto de estudo no presente trabalho, as funções de auto-correlação são avaliadas a partir do registro das ondas medidas. A função de auto-correlação é uma medida que relaciona os valores de $h(t)$ e $h(t + \Delta t)$ da variável aleatória $h(t)$ [16],[26].

As ondas oceânicas possuem características irregulares, sendo compostas por número infinito de trens de ondas regulares de frequências e direções diferentes, que ficam superpostas. Por este motivo, o estudo das amplitudes das ondas é de característica estocástica. Assim, para se conhecer as máximas alturas de ondas esperadas, são definidos vários tipos de alturas de ondas oceânicas, como, por exemplo, a altura de onda significativa ($H_{1/3}$) introduzida por Sverdrup e Munk em 1947 [36] e a máxima altura da onda (H_{max}), introduzida por Longuet-Higgins em 1952 [16]. Tais alturas são as mais utilizadas nas análises estatísticas de ondas.

Sverdrup e Munka mostraram alturas de N ondas que foram medidas durante certo período em determinado ponto no oceano, organizando-as de maneira descendente

e as dividindo em três subconjuntos com o mesmo número de ondas $1/3N$, onde a altura de onda significativa $H_{1/3}$ foi determinada como a média das alturas no subgrupo $1/3N$ das maiores alturas de ondas. Assim, foi possível descrever esta altura significativa de ondas na equação 4.2 [26].

$$H_{1/3} = \left(1 / \frac{1}{3} N \right) \sum_{k=1}^{1/3N} H_k \quad (4.2)$$

No presente estudo, com a finalidade de simplificar a análise, a estatística de ondas vai ser caracterizada pela coleção de dados de amplitudes de ondas num mar determinado. Esclareça-se que a coleção de dados será realizada por uma bóia hidrográfica.

Tendo um histórico de amplitudes de ondas num período de tempo determinado (período de tempo de pelo menos três décadas), pode-se desenvolver um histograma e, posteriormente, a probabilidade de ocorrência de uma onda de amplitude determinada.

5 CONFIABILIDADE

Com o objetivo de se obter cálculos mais exatos sobre como um determinado projeto irá se comportar ao longo de sua vida útil é imprescindível considerar o maior número de variáveis envolvidas. O fator da aleatoriedade possui grande importância, trazendo muitas controvérsias, no sentido de determinar ou prever a resposta estrutural mais próxima da realidade. Sabe-se que o nosso conhecimento é incompleto quando almejamos estudar aquilo que não entendemos em 100%.

Neste capítulo serão apresentados conceitos estatísticos básicos e diversos métodos estocásticos da Teoria da Confiabilidade para determinação da probabilidade de ruína de um navio qualquer.

5.1 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

As principais cargas consideradas no projeto de estruturas marítimas são de origem aleatória, normalmente ondas, ventos e correntes. Devido a isso, toda vez que fazemos uma nova medição dessas grandezas, durante um determinado período de tempo “ t ”, obtemos uma nova realização. Um processo aleatório caracteriza-se por uma coleção de séries randômicas, onde cada série individual constitui uma realização do processo [10],[24],[25]. Por definição temos que uma variável aleatória real $X(w)$ é uma função real que atribui a cada ponto amostral w de um espaço amostral Ω um valor real x , tal que o conjunto $\{X \leq x\}$ é um evento para qualquer número real x [23].

Os vários resultados de um fenômeno aleatório podem ser vistos como os resultados de uma função. Em probabilidade e estatística, tal função é definida como aleatória, sendo usualmente representada por uma letra maiúscula, enquanto realizações de uma variável aleatória são representadas por letras minúsculas.

Sendo X uma variável aleatória, sua função de densidade de probabilidade $f_X(x)$ é definida segundo a equação 5.1[8]

$$P \left(x - \frac{dx}{2} \leq X \leq x + \frac{dx}{2} \right) \cong f_x(x)dx \quad (5.1)$$

onde P representa a probabilidade de a variável aleatória X estar contida num intervalo determinado. A função de densidade de probabilidade (PDF) dá uma idéia de como se distribuem as probabilidades ao longo do eixo real.

A função acumulativa de probabilidades (CDF) $F(X)$ de x é definida na equação 5.2.

$$F_X(a) = \int_{-\infty}^a f_x(x)dx \quad (5.2)$$

onde $F_x(a)$ representa a probabilidade da variável x assumir valores menores ou iguais a a . Portanto, a probabilidade de X estar contida entre $-\infty$ e $+\infty$ é igual a 1 (100%), de modo que $f_x(x)$ tem a propriedade apresentada na equação 5.3.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x)dx = 1 \quad (5.3)$$

Uma vez admitida a validade das condições de integração e de derivação entre as funções $f_x(x)$ e $F_x(x)$, existirá a relação dada pela equação 5.4.

$$f_x = dF_x(x) / dx \quad (5.4)$$

Na literatura existem muitas funções teóricas. A escolha de uma delas para representar um determinado fenômeno (ou variável) passa, basicamente, por um processo de ajuste em relação aos dados coletados do mesmo.

5.2 VALORES CARACTERÍSTICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Dada uma variável aleatória X , cuja PDF é $f_x(x)$, o valor *médio*, ou a *média*, ou o *valor esperado* é representado pela equação 5.5 [12].

$$E(X) = \mu_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x) dx \quad (5.5)$$

A variância, momento de segunda ordem, da variável aleatória X é definida como o valor esperado da função, e é expressa na equação 5.6 [12].

$$\sigma_x^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_x)^2 * f_x(x) dx \quad (5.6)$$

A raiz quadrada da variância é, por definição, o *desvio-padrão* (σ_x). Este parâmetro fornece uma idéia da dispersão que existe em relação à média. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média; um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados longe da média.

O *coeficiente de variação* de X é definido como a razão entre o desvio padrão e a média, e é apresentado na equação 5.7, medindo, de forma adimensional, a dispersão dos dados da variável aleatória em torno da média [12].

$$COV = \delta_x = \sigma_x / \mu_x \quad (5.7)$$

5.3 ESTADO LIMITE

Um estado indesejável é quando a operação de um componente ou sistema não satisfaz um requisito de funcionamento. O conjunto de estados indesejáveis é denominado como domínio de falha (Df), já o conjunto de estados desejáveis é denominado como domínio de segurança (Ds). O meio pelo qual o componente ou sistema chega, da condição de operatividade, à condição de falha é chamado de modo de falha. Da quantificação dos diferentes modos de falha são geradas as equações de estados limites. As equações de estados limites são equações que dividem o domínio das variáveis aleatórias do problema em uma densidade de falha e densidade de segurança (Ds) [23],[24].

Uma equação de estado limite $g(X) = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0$, representam os modos de operação do componente, onde os valores negativos representam a Df , e os valores positivos representam a Ds [23].

$$\begin{aligned}
 Df &= \{x \mid g(x) \leq 0\} \\
 Ds &= \{x \mid g(x) > 0\}
 \end{aligned}
 \tag{5,8}$$

No contexto das estruturas de navios, as falhas podem ser definidas usando-se dois tipos de funções de estados limites [27], quais sejam: estado limite de serviço (estado de falha de operação, e.g. concentrações de tensões por trincas de fadiga, corrosão do casco), estado limite último (colapso da estrutura, e.g. carregamentos maiores à resistência estrutural, corrosão que gere perda da resistência estrutural).

A probabilidade de falha está representada pela probabilidade de que o evento X pertença à Df [23].

$$\begin{aligned}
 Pf &= P[\{X \in Df\}] \\
 Pf &= P[\{g(X) \leq 0\}]
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Para o problema fundamental, envolvendo apenas duas variáveis aleatórias, esta probabilidade é dada por

$$\begin{aligned}
 Pf &= P[\{R \leq S\}] \\
 Pf &= P[\{R - S \leq 0\}]
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

e é conhecido com problema fundamental da confiabilidade [23].

O escopo deste trabalho abrange o estado limite último, isto é, o colapso da estrutura e o problema fundamental da confiabilidade, com o objetivo de simplificar os cálculos.

5.4 SISTEMAS DO TIPO R-S

A determinação da resistência disponível, bem como da máxima solicitação da estrutura, na realidade, não são problemas simples. Estimativas e previsões são sempre necessárias para estes tipos de problemas, e as incertezas são inevitáveis,

pois as informações disponíveis, relativas aos problemas de engenharia, são, na maior parte das vezes, incompletas. Diante de tais incertezas, a resistência disponível e a solicitação real não podem ser determinadas precisamente [21].

O tratamento das variáveis estruturais como grandezas aleatórias é um dos principais aspectos do modelo probabilístico de verificação de segurança, e será apresentado através da análise do problema $G = R - S$.

Com relação à aleatoriedade das ações, estas podem ser representadas simbolicamente pela expressão 5.11.

$$S = S(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m; C_x) \quad (5.11)$$

onde as variáveis X_i ($i = 1, 2, \dots, m$) são grandezas aleatórias que influem no nível de solicitação, simbolizado por S , e onde C_x representa um conjunto de constantes e de funções determinísticas que relacionam cada variável aleatória X_i a S [12].

Analogamente, a capacidade resistente da estrutura pode ser representada simbolicamente pela expressão 5.12.

$$R = R(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n; C_y) \quad (5.12)$$

onde as variáveis Y_j ($j = 1, 2, \dots, m$) são grandezas aleatórias que influem na capacidade de resistência, simbolizado por R , e onde C_y representa um conjunto de constantes e de funções determinísticas que relacionam cada variável aleatória Y_j a R [12].

O objetivo da análise de confiabilidade é avaliar a probabilidade de que o evento $G = R - S < 0$ não ocorra durante toda a vida útil da estrutura. A ruína da estrutura ocorrerá quando se der o evento $R < S$ [21].

As variáveis R e S na função de estado limite $G = R - S$ são mostradas, em suas respectivas PDF, na figura 5.1.

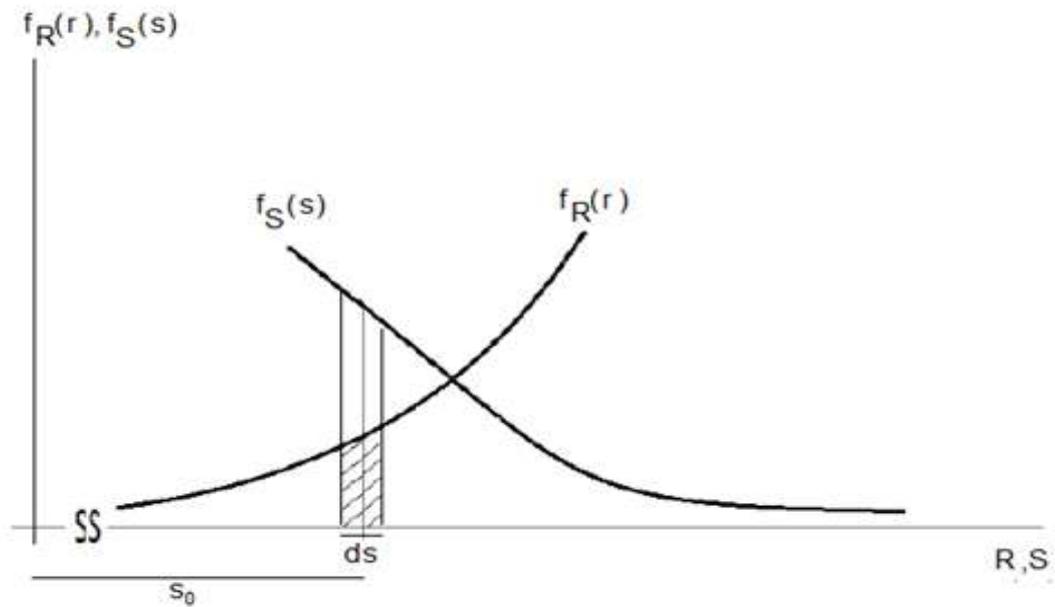


Figura 5-1 Distribuições de probabilidade de R e de S[3][12]

Uma vez conhecidas as PDF de R e de S , $f_R(r)$ e $f_S(s)$, e suas respectivas CDF, F_R e F_S , então a probabilidade de ruína poderá ser calculada segundo a equação 5.13 [3],[12].

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(x)F_R(x)dx \quad (5.13)$$

onde F_R representa a probabilidade de que a resistência R , seja menor que uma solicitação x , e é determinada pela equação 5.14

$$F_R(x) = \int_{-\infty}^x fr(x)dx \quad (5.14)$$

As integrais apresentadas nas equações 5.13 e 5.14, são, aparentemente, simples, mas, na prática, são inviáveis de serem resolvidas analiticamente, devido ao caráter multidimensional que elas assumem, bem como à dificuldade de se obter explícita ou implicitamente as PDF de R e S .

5.5 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Simulação de Monte Carlo é o nome dado ao método que envolve uma simulação utilização de números aleatórios. O Método de Monte Carlo surgiu no ano de 1949, com o artigo “*The Monte Carlo Method*” [24], de autoria dos matemáticos Jhon Von Neumann e Stanislaw Ulam. Este método de cálculo de probabilidade, que se baseia em simulações aleatórias, é um dos mais antigos do gênero, sendo de fácil compreensão física e amplamente utilizada pelos engenheiros. O nome é uma referência à cidade de Monte Carlo, no principado de Mônaco, famosa por seus cassinos. Este método apresenta boa precisão e é de fácil implementação computacional, não exigindo maiores conhecimentos matemáticos.

Devido à grande dificuldade ou, até mesmo, à impossibilidade de se calcular as probabilidades de ruína a partir da expressão 5.13 apresentada, ou ainda à dificuldade de se obter a função $G = R - S$, faz-se necessário o uso de métodos numéricos, como a Simulação de Monte Carlo, para o cálculo da probabilidade de ruína.

A Simulação de Monte Carlo consiste na análise estatística de um grande número de resoluções de uma equação de estado limite qualquer:

$$G = G(a_0, X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (5.15)$$

em que as variáveis X_i são variáveis aleatórias de parâmetros (média e desvio padrão) e tipo de distribuição de probabilidade conhecidos. Segundo Schneider[31], são realizadas N simulações com o uso de um gerador de números aleatórios $0 \leq \alpha \leq 1$, com densidade de probabilidade constante dentro deste intervalo. Cada “ k -ésima” simulação ($k = 1, 2, \dots, N$) fornece valores individuais x_{ik} das variáveis aleatórias do problema que, aplicadas na equação de estado limite G , resultam em valores g_k que têm a forma

$$g_k = G(a_0, x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk}) \quad (5.16)$$

Para cada número aleatório α_{ik} , da “k-ésima” simulação, associa-se uma probabilidade acumulada $F_{xi}(x_i) = \alpha_{ik}$, para cada variável aleatória, podendo-se obter cada valor individual x_{ik} pela equação 5.17.

$$x_{ik} = F_{xi}^{-1}(\alpha_{ik}) \quad (5.17)$$

O número de ruínas durante as simulações deve ser contado, ou seja, o número de vezes em que $g_k < 0$, o que resultará no número N_f . A probabilidade de ruína poderá ser estimada segundo a equação 5.18 [14].

$$\bar{P}_f = N_f / N \approx P_f \quad (5.18)$$

que será a média da amostra quando N for o número total de simulações.

Métodos de simulação são, muitas vezes, chamados de métodos exatos porque, teoricamente, o resultado da simulação tende ao resultado exato quando o número de simulações tende ao infinito.

5.6 ÍNDICE DE CONFIABILIDADE β

Para a formulação do índice de confiabilidade, considere um produto ou uma estrutura cuja resistência R e solicitação S sejam variáveis aleatórias, e G uma das funções de desempenho mais conhecidas, definida como margem de segurança dada pela diferença entre estas duas variáveis, isto é $G = R - S$

Se R e S forem variáveis aleatórias normais e estatisticamente independentes, G será função uma normal com uma PDF $f_G(m)$, com $\mu_G = \mu_R - \mu_S$ e $\sigma_G = \sigma_R - \sigma_S$. Neste caso, considerando o evento falha $G < 0$, a probabilidade de ocorrência deste evento é expressa na equação 5.17 [12].

$$P_f = P\{G(x) \leq 0\} = F_G(0) = \int_{-\infty}^0 f_G(x) dx \quad (5.17)$$

por meio da transformação de Hasofer-Lind, temos que

$$Y = (G - \mu_G)/\sigma_G \quad (5.18)$$

substituindo a equação 5.18 na equação 5.17, considerando que o estado limite se obtem na condição de $G = 0$, temos que

$$Pf = P[\{Y \leq -\mu_G/\sigma_G\}] = \Phi[-\mu_G/\sigma_G] = \Phi[-\beta] \quad (5.19)$$

finalmente, o índice de confiabilidade β , pode ser obtido pela equação 5.20.

$$\beta = \mu_G / \sigma_G \quad (5.20)$$

Pode-se notar que a confiabilidade é uma função da razão μ_G e de σ_G .

Esta expressão é referida na literatura por Melchers[18],entre outros, como índice de segurança ou índice de confiabilidade e pode ser interpretada como uma medida recíproca ao coeficiente de variação da variável aleatória G . Portanto, a probabilidade de segurança (P_s) ou confiabilidade do sistema e a correspondente probabilidade de falha (P_f) são expressas, em função do índice de confiabilidade, nas equações 5.21 e 5.22, respectivamente.

$$P_s = \Phi(\beta) \quad (5.21)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (5.22)$$

6 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

O presente capítulo detalha o processo de desenvolvimento do trabalho, a partir da análise da variação do índice de confiabilidade do navio ao longo do tempo.

O organograma abaixo mostra que, a confiabilidade, para o presente trabalho, dependerá das solicitações (S) e das resistências (R). As solicitações, por sua vez, dependem das tensões longitudinais; as resistências dependem da geometria estrutural e do material de construção. Nas solicitações, a tensão longitudinal primária depende das cargas e do empuxo, o qual depende das ondas; as tensões longitudinais terciárias dependem da taxa de corrosão.

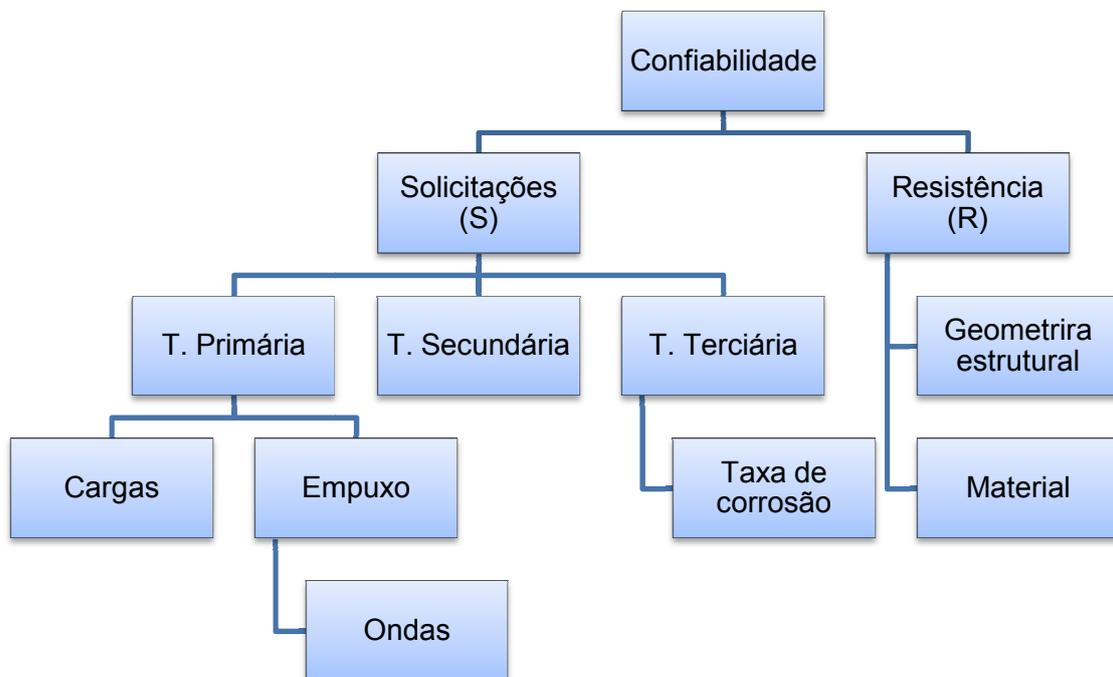


Figura 6-1 Organograma

No presente trabalho, a confiabilidade será determinada em duas fases: a primeira tem como objetivo obter uma distribuição de probabilidades das solicitações que atingem o navio e uma distribuição de probabilidades das resistências da estrutura do navio; e a segunda fase tem como objetivo obter uma curva de confiabilidade estrutural do navio ao longo do tempo.

Na primeira fase, no cálculo das solicitações, será realizado um estudo estatístico das tensões longitudinais primárias, devido à sua dependência em relação à variabilidade das ondas do mar num determinado período de tempo. O período de tempo de análise considerado é função da vida útil dos ânodos de sacrifício utilizados no sistema de proteção catódica, já que a manutenção do navio é programada para que coincida com a vida útil do zinco.

No tocante às tensões longitudinais secundárias e terciárias, o estudo será feito em função da espessura da chapa do fundo, que representa a deterioração gerada pela taxa de corrosão no mesmo período de tempo determinado para o estudo da tensão primária. Nas resistências, considerando que o material é aço naval comum e possui uma geometria estrutural determinada, o estudo será do tipo probabilístico, assumindo uma distribuição normal para determinar o ponto de fluência do material.

Na segunda fase, por meio da Simulação de Monte Carlo e das curvas de distribuição das solicitações (S) e as resistências (R), vai se obter uma distribuição $G(X)$ fundamental, que tem como resultado a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade. Esclareça-se que, dependendo da variação da espessura da chapa do fundo do navio, em função da taxa de corrosão, a função S muda em função do tempo, e, por consequência, G também será alterado.

6.1 SOLICITAÇÕES

As solicitações, conforme mencionado no capítulo 3, são representadas pelas tensões longitudinais que atuam ao longo do navio e que dependem do comportamento do mar e da geometria da chapa de fundo (objetivo do estudo a ser realizado).

O estudo das tensões longitudinais primária, por ter uma participação direta em função das ondas que agem sobre o navio, será considerado estocástico, associado à probabilidade de ocorrência de uma onda de amplitude A . Esta onda de amplitude A será analisada ao longo de seu deslocamento pelo comprimento do navio, uma vez que a ondulação da onda irá gerar diferentes tensões primárias. Nessa linha,

destaca-se que a variável φ determina a posição da onda em relação ao navio, como será mostrado nas próximas subseções.

No tocante às tensões longitudinais secundárias e terciárias, estas serão calculadas deterministicamente, conforme as equações 3.17, 3.20, 3.21, por meio dos valores da amplitude de onda e posição de deslocamento da onda φ em relação ao comprimento do navio, obtidos para a análise da tensão longitudinal primária.

De acordo com o observado no capítulo 3, por meio das equações 3.14, 3.17, 3.20, 3.21, temos que a equação das solicitações S está dada por:

$$S = F [\sigma_{xx}^1(x, A, \varphi) + \sigma_{xx}^{2'}(x, A, \varphi) + \sigma_{xx}^{2''}(x, A, \varphi) + \sigma_{xx}^3(x, A, \varphi)] \quad (6.1)$$

Os conceitos associados à análise estrutural do navio apresentados anteriormente no capítulo 3, correspondem à simplificação do método de Muckle [10], que é baseado no estudo da localização do navio em uma onda crítica (onda de igual comprimento que o navio) em duas condições: quando a crista da onda se encontra na meia-nau (alquebramento) e quando o vale da onda se encontra na meia-nau (tosamento). Neste contexto, a altura e o comprimento da onda são preestabelecidos, permitindo, portanto, a determinação dos esforços longitudinais primários, secundários e terciários de forma direta.

Uma vez que o presente trabalho objetiva a determinação da confiabilidade estrutural de um navio, torna-se necessário considerar a variação dos esforços que atingem a sua estrutura, devido à variação da onda e à redução da espessura da chapa do fundo.

A influência da variação da onda modifica os valores obtidos na equação 3.2, devido à variação do empuxo $e(x)$, já que ele depende diretamente do calado $h(x)$. A variação do calado $h(x)$ em função da onda ao longo do comprimento do navio pode ser resumida numa expressão que envolve três aspectos: a influência da oscilação da onda de amplitude A ; a influência do ângulo de trim do navio devido à organização das cargas à bordo e o calado médio h_m , que cumpre a condição de

estabilidade do navio representada pelas equações 3.5 e 3.6 do capítulo 3. Advindo da união dessas três condições obtemos a seguinte fórmula [10],[25]:

$$h(x) = h_m + A \operatorname{sen} ((2\pi x / \lambda) + \varphi) + (L / 2 - x)tg\phi \quad (6.2)$$

Onde o primeiro componente h_m representa o calado médio, o segundo componente corresponde à correção em função da oscilação da onda (proposta por Newton em seu livro Principia em 1687, modificada posteriormente por Laplace, onde A representa a amplitude de onda e L representa o comprimento da onda[25]) e o terceiro componente corresponde, finalmente, à correção do ângulo de trim do navio (onde ϕ é o ângulo de trim) [10].

Neste contexto, com as conseqüentes variações das amplitudes das ondas, haverá uma alteração no empuxo, que faz modificar as formulações feitas no capítulo 3, mais precisamente, nas equações 3.7, 3.8, 3.9 e 3.14. Essas são as equações que se referem, respectivamente, à distribuição ao longo do navio, das cargas, dos esforços cortantes, dos momentos fletores e das tensões primárias.

Tendo em vista que serão analisadas ondas com diferentes amplitudes, e, por conseguinte, comprimento de ondas diferente do comprimento do navio, não é óbvio apontar em qual posição da onda ocorre o maior momento fletor, havendo a necessidade do estudo do efeito da onda de amplitude A ao longo de seu deslocamento pelo comprimento do navio, com a variação de φ na equação 6.2 tendo finalmente uma variação na formulação das tensões primárias:

$$\sigma_{xx}^1(x, A, \varphi) = M(x, A, \varphi) * [(Y_{quilha} - Y_{LN}) / (I_{LN})] \quad (6.3)$$

As tensões secundárias e terciárias serão obtidas utilizando os mesmos valores das variáveis x , A e φ , utilizadas na equação 3.14.

Uma vez obtidas as tensões longitudinais primárias, secundárias e terciárias, mediante a soma delas, de forma conservadora, se tem a tensão longitudinal total para diferentes amplitudes de ondas num determinado ponto do navio e num determinado deslocamento de onda, as quais geram a maior tensão primária

possível para aquela amplitude A . Pode-se obter a probabilidade de ocorrência daquelas tensões, já que cada amplitude de onda possui uma probabilidade de ocorrência para um determinado mar.

A figura 6-2 apresenta um navio petroleiro sendo atingido por ondas de diferentes amplitudes e deslocamentos em relação ao navio.

Uma vez obtida a probabilidade de ocorrência das possíveis solicitações que atingem à chapa do fundo do navio, deve-se analisar a variação em função do tempo, já que devido ao mar, que é um ambiente agressivo para a estrutura do navio, a espessura da chapa diminuirá em função da taxa de corrosão.

A tensão terciária é baseada em três variáveis no estudo clássico. Da equação 3.21 temos K em função da geometria da chapa, P em função da pressão hidrodinâmica e b depende da geometria de chapa. A fim de ser possível estudar melhor a influência da espessura T na tensão terciária, supondo um caso específico onde a operação das variáveis mencionadas (K, P, b) é igual a 1, então temos:

$$\sigma_{xx}^3 = [1 / T^2] \quad (6.4)$$

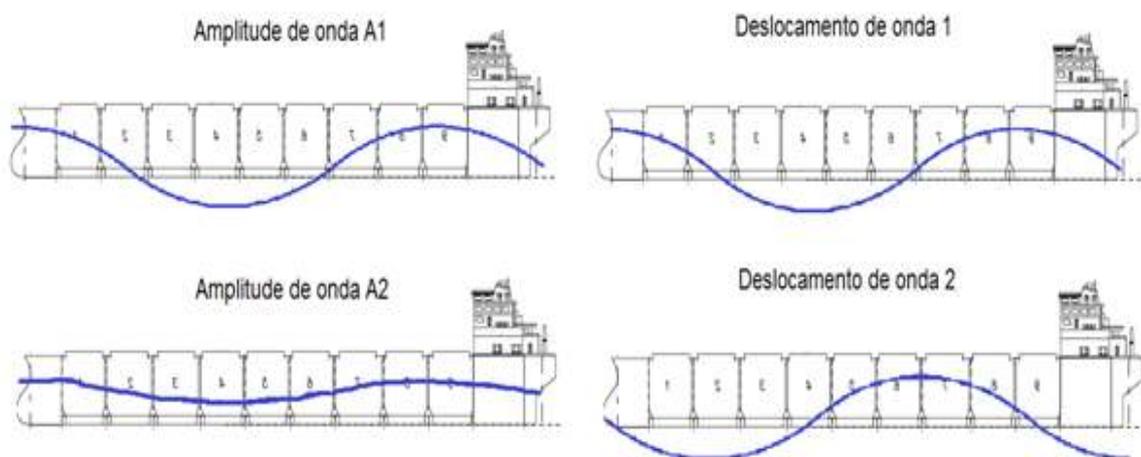


Figura 6-2 Ondas que atingem ao navio

A figura 6-3 mostra a variação da tensão longitudinal terciária, em função da espessura da chapa, conforme equação 6.4.

Depreende-se da figura 6-3 que quando a espessura da chapa tende a infinito, a tensão terciária tende a zero e vice-versa. A primeira conclusão é que na redução da espessura da chapa a distribuição das solicitações movimenta-se à direita.

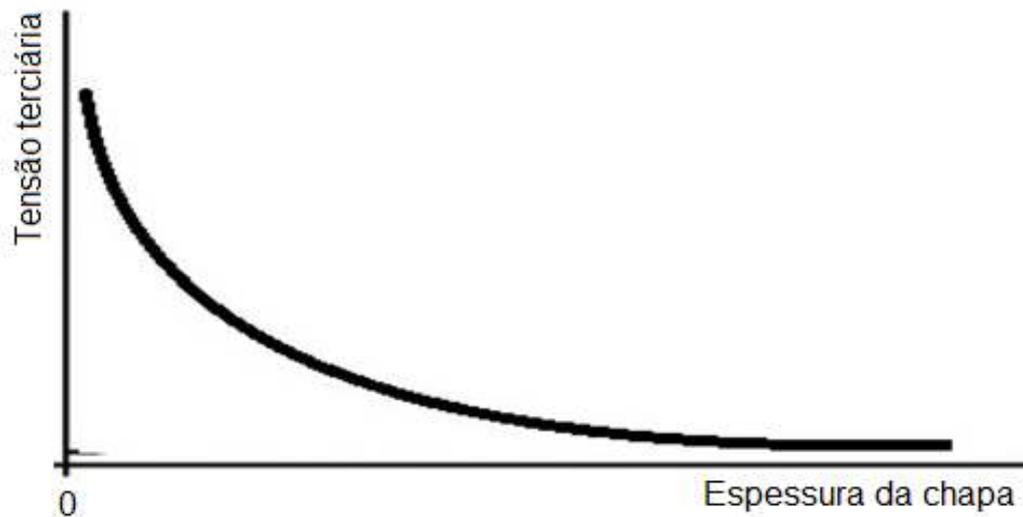


Figura 6-3 Variação da tensão terciária

Na figura 6-4 expõe-se a influência da variação da tensão longitudinal terciária na tensão longitudinal total apresentada na equação 6.1.

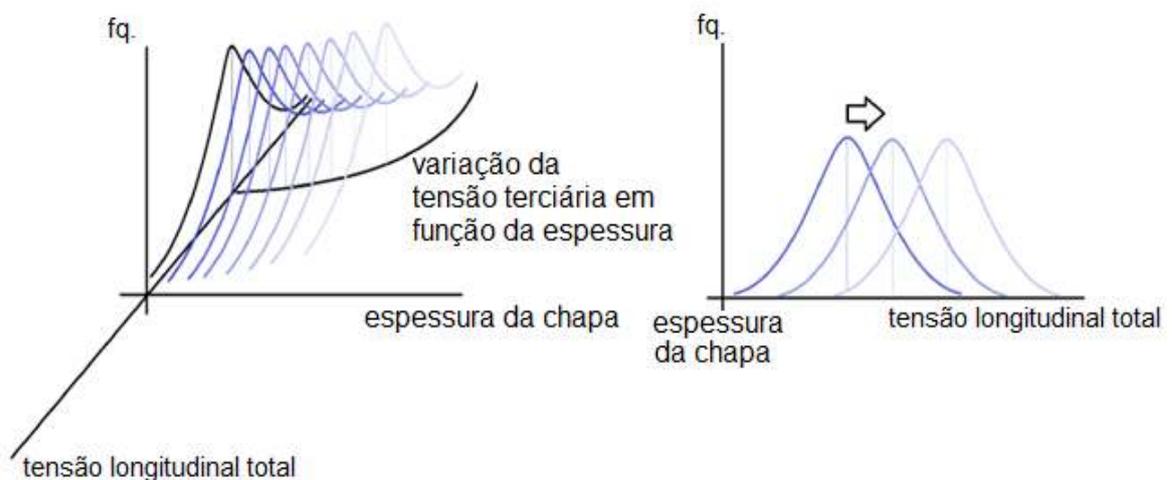


Figura 6-4 Movimentação da função de solicitações

6.2 RESISTÊNCIA

O aço naval comum é a exemplificação mais clássica de um aço estrutural de grãos finos [6]. É um aço ferrítico de baixa liga e baixo carbono ligados ao manganês, com teores de fósforo e enxofre controlados, e baixa liga (ARBL) [6], utilizado em partes estruturais, quando a economia de peso é importante. Atende à solicitações de tenacidade até -40°C para navegação em regiões frias, ou em temperaturas mais baixas, mediante consulta e autorização da classificadora [2].

Os aços estruturais navais apresentam boa tenacidade e soldabilidade, sendo aplicados em navios de médio e grande porte e em plataformas marítimas de extração de petróleo. Os aços navais são especificados, principalmente, pelas entidades classificadoras para construção naval.

6.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os materiais ferrosos são, em essência, ligas de ferro e de carbono, que aparecem associados a outros elementos. O ferro puro tem uma densidade de 7,87 e um ponto de fusão de 1536°C .

A tabela 6.1 apresenta os pontos mínimos de fluência aceitáveis na construção naval. No presente trabalho vai ser utilizado o aço naval comum (NV-NS)

Material	Ponto de fluência mínimo
NV - NS	235 MPa
NV – 27	265 MPa
NV – 32	315 MPa
NV – 36	355 MPa
NV – 40	390 MPa

Tabela 6-1 Ponto de fluência mínimo para materiais estruturais em navios[2]

onde *NV-NS* é denominado aço de resistência comum (*normal strength structural steel*) e *NV-27,32,36,40* são denominados aços de elevada resistência (*high strength structural steel*).

6.2.2 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA DO MATERIAL

Para o presente trabalho, utilizou-se um estudo feito pela companhia *Arcelor-Mittal* de aços estruturais para construções civis, por não ser possível o acesso a esta informação para aços navais [24]. Os dados relevantes para a pesquisa são os que podem fornecer uma distribuição de probabilidades adequada para a resistência do material (aço naval comum).

Nas provas de resistência feitas com diferentes tipos de aço estrutural civil (*CA50 10, CA50 12.5, CA50 16*) obteve-se curvas normais, com média entre 638 – 605 *MPa*, e desvio padrão entre 15 e 25 *MPa*[24].

Para o cálculo da curva de distribuição do limite de fluência para o aço naval de resistência normal, considera-se, neste trabalho, uma curva de distribuição normal, com valores adotados das estatísticas obtidas através das provas feitas para o aço estrutural civil *CA50 10*.

6.2.3 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DO AÇO NAVAL

Devido à falta de informação, para o presente trabalho, foi preciso estudar os parâmetros do aço estrutural *CA50 10* da empresa *Arcelor-Mittal*, pressupondo que na Engenharia Civil são exigidos os mesmos parâmetros de segurança quanto ao material na indústria naval.

A tabela 6-2 apresenta os resultados do controle de qualidade do aço estrutural CA50 10 [24], onde n representa o número de ensaios feitos para o material, LE representa o limite elástico e LR o limite de ruptura.

Neste trabalho, o aço naval escolhido para o navio estudado foi o aço estrutural de resistência normal $NV - NS$, com $LE = 235 MPa$.

CA50 10	Controle estatístico			
	n = 400	LE (MPa)	LR (MPa)	LR / LE
Média	638	763	1,2	0,612
Máximo	686	815	1,24	0,630
Mínimo	581	716	1,15	0,604
Desvio Padrão	15	16	0,02	0,003

Tabela 6-2 Dados do estudo estatístico do aço estrutural CA50 10

Tendo conhecidos os dados e das estatísticas do aço estrutural civil, pode-se calcular a distribuição padrão do aço estrutural naval. A equação 6.5 faz uma relação simples entre as médias e desvios padrões dos aços de estrutural civil e de estrutural naval. A referência é o aço estrutural CA50 10 com média definida como M_{CA} e desvio padrão DP_{CA} . A média do aço estrutural naval é definida como M_{NV} e desvio padrão DP_{NV} .

Usando uma simples proporção linear, DP_{NV} pode ser determinado como:

$$DP_{NV} = DP_{CA} * (M_{NV} / M_{CA}) \quad (6.5)$$

Com os dados apresentados na tabela 6-2 e do aço naval $NV - NS$ apresentados na tabela 6-1, temos que o valor do desvio padrão para o aço estrutural naval $NV - NS$ é de 5,52 MPa. No presente trabalho não será utilizada uma curva de distribuição normal para o limite elástico do aço naval $NV - NS$, com média 235 MPa e desvio padrão de 5,52 MPa, devido a que o limite de fluência do aço é de 235 MPa. Para

possuir limites de segurança segundo a regra brasileira de construção civil [24], o valor de limite de fluência do material, numa amostra de aços deve ter um valor de 5 %, quer dizer, que uma amostra de aços estruturais só é aceita se um 5 % da amostra ultrapasa o limite de fluência no valor de 235 MPa . Segundo isto, a média a ser utilizada no presente trabalho, para o aço estrutural naval será de 250 MPa com um desvio padrão de 5.88 MPa .

6.3 CONFIABILIDADE

Finalmente, temos as funções de solicitações, que não têm uma distribuição de probabilidades conhecida e que se movimentam à direita em função do tempo, e da função de resistência, que é uma distribuição normal. Com as duas distribuições pode-se obter, utilizando a Simulação de Monte Carlo, uma função G , sendo $G = R - S$, conforme já apresentado no capítulo 5.

Calculando a probabilidade de falha a partir da função G , por médio da tabela apresentada no anexo B, pode-se obter o índice de confiabilidade β do navio estudado, os quais variam em função do tempo devido à taxa de corrosão. A probabilidade de falha, como já apresentado no capítulo 5, é obtida com a integração da função G , quando $G < 0$, devido ao fato de que aquela área representa os casos onde as solicitações (S) foram maiores que as resistências (R), ou seja, quando o sistema apresenta uma falha.

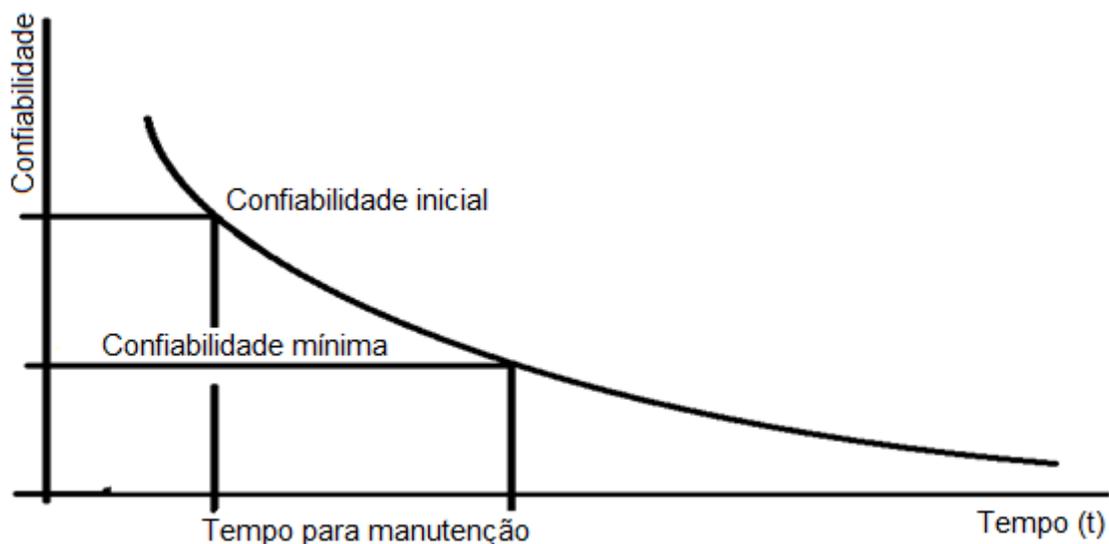


Figura 6-5 Confiabilidade vs tempo

A figura 6-5 apresenta a variação da confiabilidade estrutural em função do tempo. No gráfico, observa-se que em função dos valores do índice de confiabilidade (β) estabelecidos por Soares [33], define-se o início e o limite inferior da confiabilidade alvo, os quais determinam o tempo para a manutenção do navio.

Apresentou-se, no presente capítulo, o método que vai ser utilizado no estudo do caso, em um navio petroleiro. O método utiliza dois valores para descrever cada variável, isto é, sua média e desvio padrão, complementada com uma medida de correlação entre as variáveis. Índices de confiabilidade determinados como medidas de segurança têm uma interpretação geométrica, como, por exemplo, a distância medida em unidades de desvio padrão do valor médio ao ponto de projeto.

No capítulo seguinte, será apresentada a implementação do método a um caso de estudo simplificado.

7 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta um estudo estrutural simplificado de um navio petroleiro, tendo como objetivo aplicar a metodologia apresentada no capítulo 6. As seguintes subseções mostram as simplificações feitas à aplicação da metodologia, bem como os resultados obtidos.

7.1 COMPARAÇÃO DO ESTUDO

A presente subseção mostra duas comparações dos cálculos realizados. A primeira compara a utilização do programa Microsoft Excel 2007, utilizado para a análise das tensões e resistências no presente estudo, com o software PC-SHCP para os cálculos dos momentos fletores e esforços cortantes aos quais o navio é submetido nas condições de mar calmo e mar com ondas (para o mar com ondas nas condições de alquebramento e tosamento especificamente). A segunda apresenta uma comparação entre dois exemplos de obtenção de probabilidades de falha e índice de confiabilidade (β), para uma treliça com carga aplicada com incerteza e para uma chapa com duas trincas numa das faces laterais.

7.1.1 COMPARAÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES E FORÇAS CORTANTES

O software PC-SHCP é um programa de desenho de navios que permite o cálculo de estabilidades (intacta e avariada), cálculo de propriedades hidrostáticas e resistência longitudinal. O principal *input* são as balizas do navio. Definindo alguns parâmetros adicionais, o programa pode executar todos os cálculos previamente descritos de forma automática e eficiente. As saídas são produzidas em forma de gráficos e relatórios tabulares.

A planilha utilizada no presente estudo foi desenvolvida na disciplina PNV5009, tendo sido utilizada na análise do navio por sua simplicidade e rápida utilização para poder obter as tensões longitudinais primárias, secundárias e terciárias; e devido a que o desenvolvimento da Simulação de Monte Carlo também foi realizado no

programa Microsoft Excel 2007, o que facilita a compatibilidade de dados ao longo da análise.

A metodologia apresentada no capítulo 6 pode ser utilizada independente do método de cálculo de análise das solicitações e resistências do navio.

Foi feita a comparação entre os métodos pelos resultados da obtenção dos momentos fletores de um navio simplificado estudado na condição de mar calmo e mar com ondas. Os dados do navio analisado são apresentados na tabela 7-1.

Desplazamento de desenho	83339,062 (Ton)
LCG de desenho	100 (m)
Comprimento	200 (m)
Coeficiente de bloco	0,97
Boca	42,976 (m)

Tabela 7-1 Dados do navio

A tabela 7-2 apresenta a distribuição dos carregamentos ($w(x)$) do navio estudado.

w(x) (Ton)	X (m)
200	0
500	20
500	40
500	60
500	80
500	100
500	120
500	140
500	160
200	180
0	200

Tabela 7-2 Distribuição de carregamentos $w(x)$

A tabela 7-3 apresenta os resultados do programa PC-SHCP.

A tabela 7-4 apresenta os resultados, segundo a aplicação da planilha feita no programa Microsoft Excel 2007. A planilha foi desenvolvida e utilizada na disciplina PNV5009 para os cálculos dos momentos longitudinais primários.

As figuras 7-1 e 7-2 apresentam as forças cortantes e momentos fletores obtidos pelos métodos utilizados no presente capítulo.

MAR CALMO		
X	V(X)	M(X)
0	0	0
20	-2400	-17400
40	-1800	-42900
60	-1200	-56400
80	-600	-57900
100	0	-57900
120	600	-57900,2
140	1200	-56400,2
160	1800	-42900
180	2400	-17400
200	0	-0,5

Tabela 7-3 Resultados do programa PC-SHCP na condição de mar calmo

MAR CALMO		
X	V(X)	M(X)
0	0	0
20	-3480	-1604,06
40	-2655	-36054,4
60	-1755	-52535,6
80	-720	-63144,4
100	180	-65113,1
120	1080	-60331,9
140	2115	-46488,7
160	3015	-27195
180	2640	-2595
200	0	0

7-4 Resultados da planilha na condição de mar calmo

As tabelas 7-5 e 7-6 apresentam os resultados feitos no programa PC-SHCP e pela planilha de Microsoft Excel 2007 para a condição de mar com ondas. O estudo de

mar com ondas foi feito na condição de tosamento, onde o vale da onda atinge na metade do comprimento do navio.

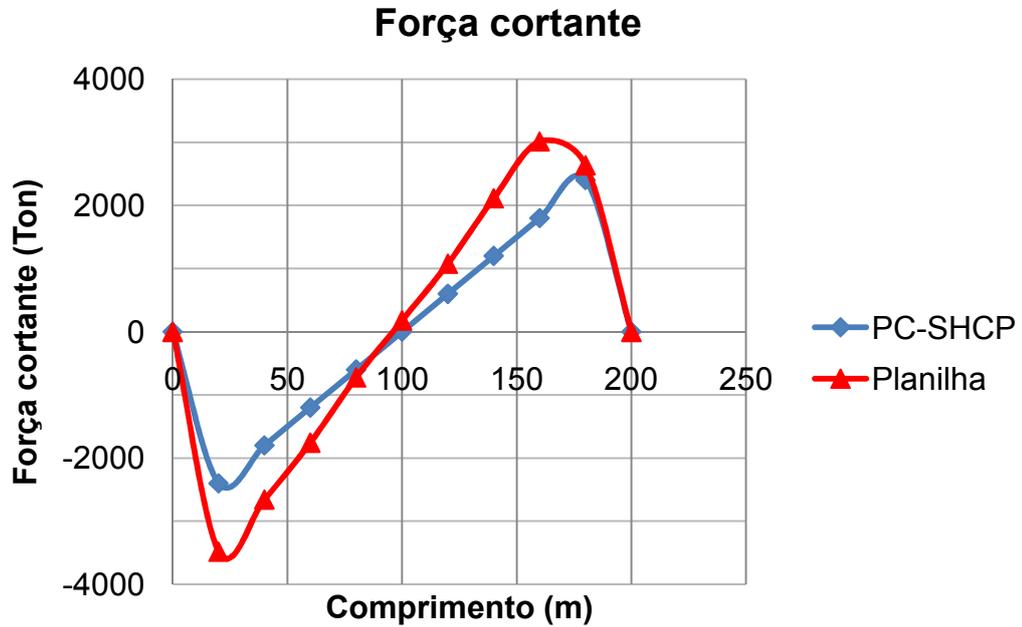


Figura 7-1 Forças cortantes na condição de mar calmo

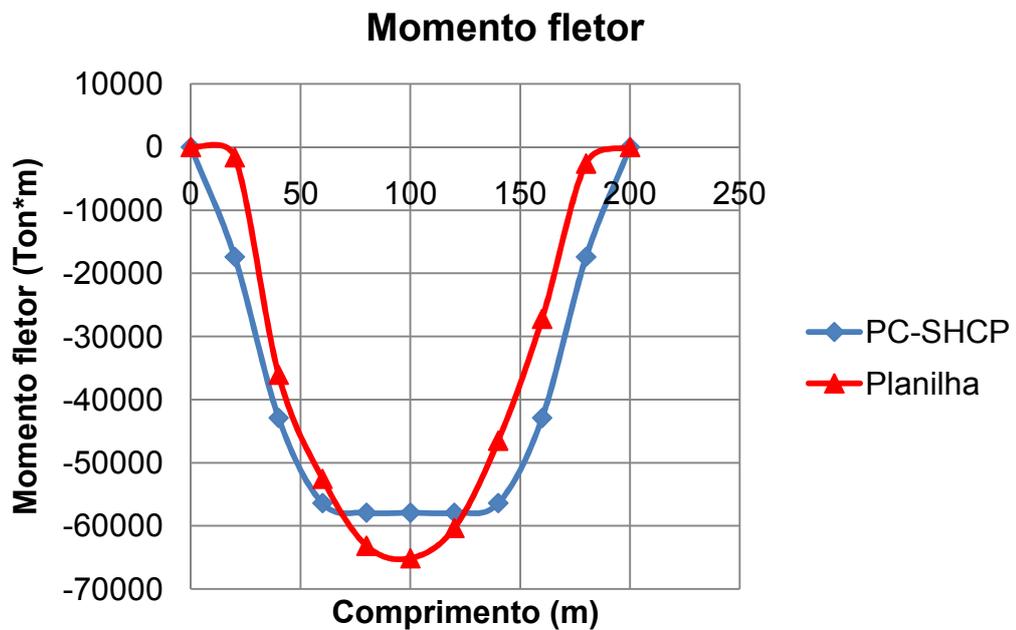


Figura 7-2 Momento fletor na condição de mar calmo

MAR COM ONDAS		
X	V(X)	M(X)
0	0	0
20	-4448,81	-38679,2
40	-5076,42	-119378
60	-4375,19	-199588
80	-2531,07	-253766
100	0	-263155
120	2531,08	-253766
140	4375,19	-199588
160	5076,42	-119378
180	4448,81	-38679,2
200	0	-0,5

Tabela 7-5 Resultados do programa PC-SHCP na condição de mar com ondas

TOSAMENTO		
X	V(X)	M(X)
0	0	0
20	-4780,21	-4171,24
40	-6838,13	-116503
60	-6584,26	-212225
80	-3519,75	-295648
100	508,6274	-316632
120	4298,594	-281777
140	6625,486	-190735
160	6111,272	-99842,5
180	3074,621	-32570,6
200	0	0

Tabela7-6 Resultados da planilha na condição de mar com ondas

As figuras 7-3 e 7-4 apresentam graficamente os resultados das tabelas 7-5 e 7-6. Pode-se observar a incerteza da planilha em comparação de um programa de elementos finitos. No caso da figura 7-3, dos esforços cortantes, a maior força cortante foi obtida aos 160 m. de comprimento do navio, com a utilização do programa. Neste ponto a planilha tem uma diferença a mais de 20.38% em relação ao valor obtido pelo programa. Na figura 7-4, dos momentos fletores, o maior momento fletor foi obtido aos 100 m. do comprimento do navio com a utilização do programa. Neste ponto a planilha tem uma diferença a mais de 20.32% em relação ao valor obtido pelo programa.

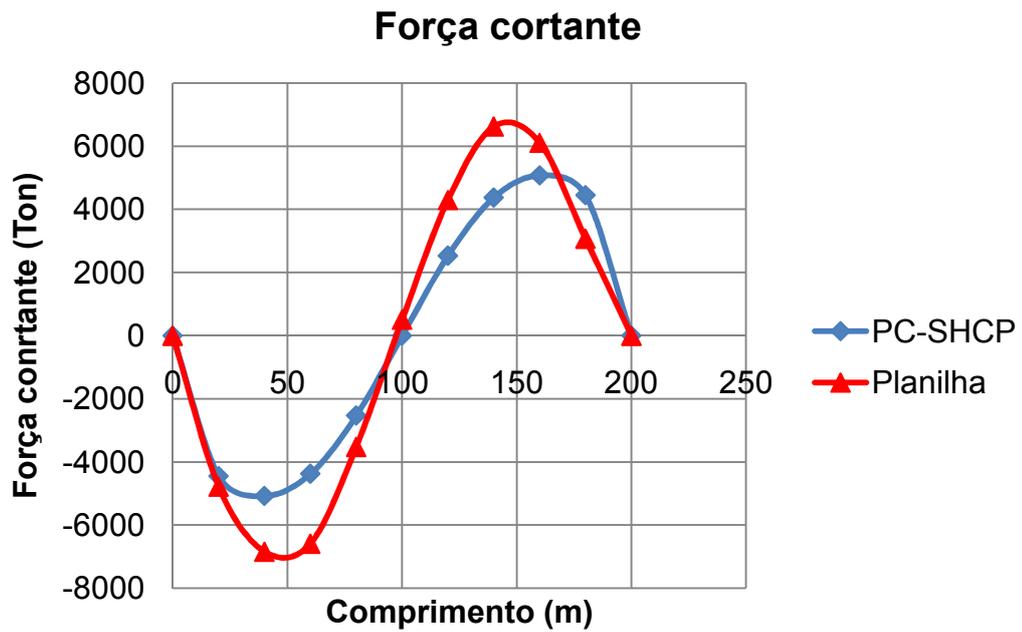


Figura 7-3 Forças cortantes na condição de mar com ondas

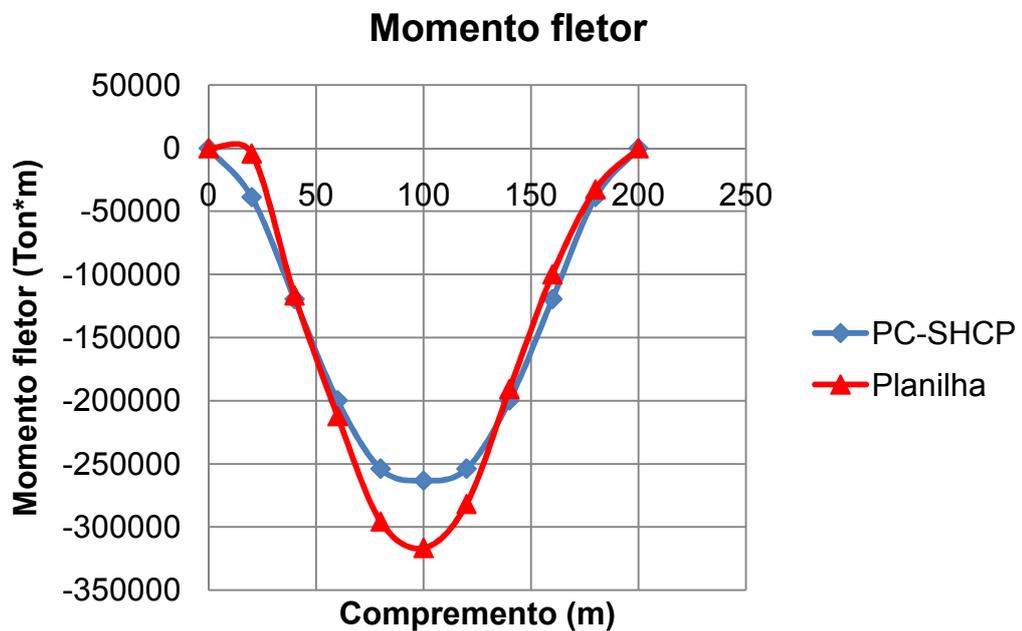


Figura 7-4 Momento fletor na condição de mar com ondas

Os dois métodos apresentam resultados diferentes, o que ocorre devido a certas condições adotadas durante o desenvolvimento de cada método. Condições como a geometria estrutural do navio, correta distribuições dos pesos, exatidão dos métodos utilizados, entre outros. Nessa linha, observa-se que o método do programa SHCP

oferece um menor momento fletor, porém, uma menor tensão primária e uma estrutura de menores dimensões, devido à precisão computacional.

O método da planilha, por sua vez, por ser um método de simples cálculos no Microsoft Excel 2007, possui mais incertezas e apresenta resultados com maiores momentos fletores. O método da planilha é um método para estudantes, permitindo, facilmente, o desenvolvimento da metodologia apresentada no capítulo 6, além de possibilitar ao estudante observar e manipular, passo a passo, o desenvolvimento do cálculo estrutural.

Embora o uso dos valores de solicitações obtidos pela planilha diferam do valor mais acurado do programa SHCP, o objetivo principal deste estudo é estabelecer uma metodologia para o cálculo dos índices de confiabilidade em navios devidos a solicitações de ondas e efeitos da corrosão na chapa do fundo. Portanto, o interesse não foca nos valores do índice β e sim na metodologia necessária para sua obtenção. Recomenda-se ao leitor que os erros ou incertezas relacionadas as estimativas das solicitações sejam levadas em conta na hora do cálculo do índice de confiabilidade da estrutura em análise.

7.1.2 COMPARAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE FALHA E DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

Com o objetivo de validar as planilhas desenvolvidas no programa Microsoft Excel 2007, a presente subseção pretende ilustrar a aplicação das mesmas e compará-las com dois exemplos desenvolvidos em trabalhos encontrados na literatura aberta.

O primeiro caso apresenta uma treliça com carga aplicada com incerteza. O exemplo estudado consiste da treliça isostática apresentada na figura 7-5. As variáveis básicas são: a carga aplicada S e a resistência R_i para cada barra [30].

A tabela 7-7 apresenta as características físicas das variáveis básicas.

Variável	Distribuição	Média	Desvio padrão
Carga (S)	Normal	14 kN	1,25 kN
Resistência (R)	Normal	11 kN	1,50 kN

Tabela 7-7 Características das variáveis básicas no exemplo 2

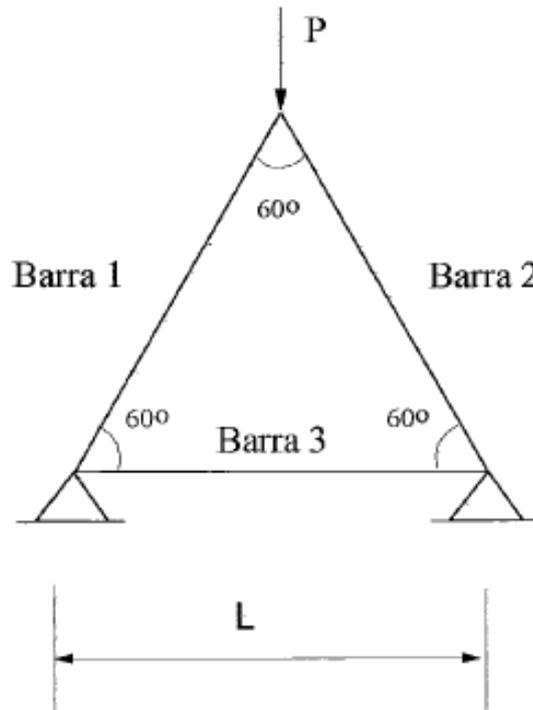


Figura 7-5 Treliça isostática

No presente exemplo a confiabilidade de cada barra será representada pela função de densidade G_i onde $G = R - S$. A confiabilidade do sistema em série é igual à multiplicação da confiabilidade de cada barra. A confiabilidade de cada barra será determinada pela Simulação de Monte Carlo, desenvolvida no programa Microsoft Excel 2007, com a geração de 20,000.00 números aleatórios para cada função G_i .

Sabendo que os esforços normais nas barras da treliça valem $P\sqrt{3}/3$ nas barras 1 e 2, e $P\sqrt{3}/6$ na barra 3, a tabela 7-8 apresenta os resultados obtidos pelo programa computacional CALREL para a determinação destes valores para as barras

individuais e para o sistema estrutural pelo método FORM; e pela Simulação de Monte Carlo, segundo a planilha desenvolvida no programa Microsoft Excel 2007.

As figuras 7-6 e 7-7 apresentam os resultados da Simulação de Monte Carlo para o caso da barra 1. São apresentadas na figura 7-6 as curvas R, com média 11 e desvio padrão 1,5, e S, com média 8 e desvio padrão 0,72, feitas por meio da geração de 20 000 dados aleatórios.

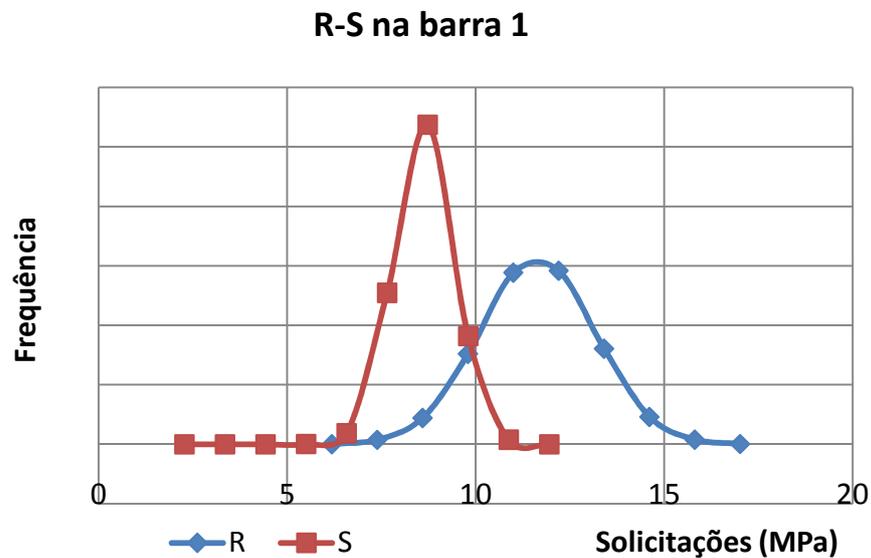


Figura 7-6 R-S na barra 1

A figura 7-7 apresenta a função G, com uma média de 2,93 e um desvio padrão de 1,66, gerada a partir das curvas R e S. Como as curvas R e S seguem uma distribuição normal, a função G também possui uma distribuição normal. O índice de confiabilidade β foi obtido pela fórmula 5.18 e a probabilidade de falha pela fórmula 5.16.

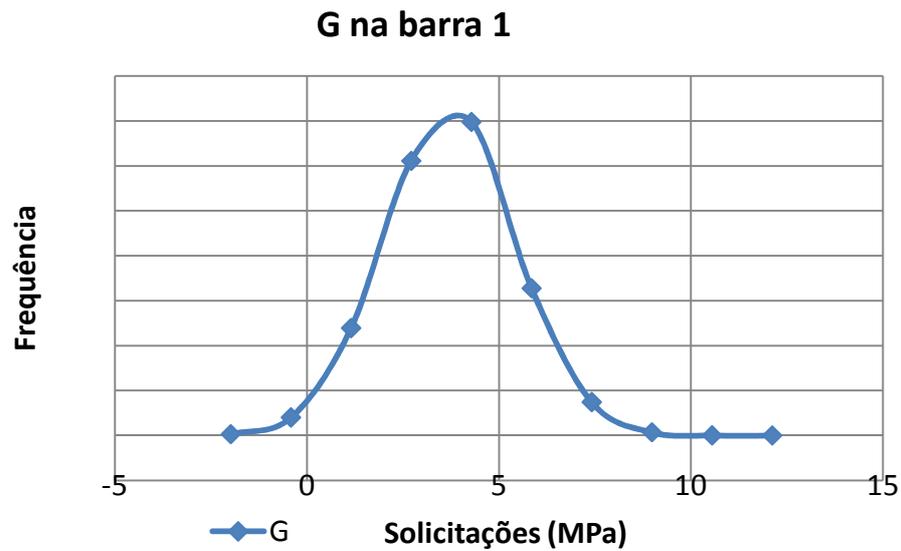


Figura 7-7 Função G na barra 1

A tabela 7-8 apresenta os resultados da Simulação de Monte Carlos e faz uma comparação com a solução exata do problema.

Barras/Sistema	Solução exata		SMC	
	Pf	β	Pf	β
Barra 1	0,03985	1,75	0,0401	1,7625
Barra 2	0,03985	1,75	0,0385	1,7660
Barra 3	3,2E-6	4,5	0	4,5226
Sistema (treliça)	0,078	1,4	0,0770	1,4201

Tabela 7-8 Segunda comparação de Pf e β

A obtenção da probabilidade de falha e índice de confiabilidade individual das barras foi feita diretamente a partir da função de densidade G, gerada pela SMC. A probabilidade de falha do sistema foi obtida pela equação 7.1 [41]. A equação 7.1 obtém a probabilidade de falha de um sistema composto por n componentes.

$$Pf_{sistema} = 1 - Confiabilidade_{sistema} = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} [1 - Pf_i] \quad (7.1)$$

onde Pf_i é a probabilidade de falha de cada componente e n representa o número de componentes do sistema. A obtenção do índice de confiabilidade β foi obtida com a utilização da tabela da curva da distribuição normal apresentada no Anexo-B.

Nas duas comparações, a diferença entre os resultados foi razoável para poder ser aceita. Pode-se observar que a SMC possui uma maior exatidão quanto maior forem a quantidade de números aleatórios gerados. Oportuno observar que no programa Microsoft Excel 2007 se tem uma quantidade limitada de gerações de números aleatórios. Ainda assim, os resultados apresentados validam a planilha, que fornece a solução da SMC, desenvolvida nesta dissertação para o cálculo das probabilidades de falha e do índice de confiabilidade.

O segundo caso de interesse prático é um problema de estrutura danificada, abordado pelos princípios da mecânica da fratura. Adaptou-se um exemplo utilizado no trabalho de LEE e ANG[15], alterando, aleatoriamente, uma das variáveis básicas do problema.

Seja uma chapa retangular de 1 in. De espessura e com uma área de $5 \times 20 \text{ in}^2$, com duas trincas numa das faces laterais conforme mostrado na figura 7-5. As características mecânicas da chapa são: módulo de elasticidade $E = 30000 \text{ ksi}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,03$, sendo considerado um regime elasto-plástico. A tabela 7-9 apresenta as características das variáveis básicas.

Variável	Distribuição	Média	Desv. Padrão
Carregamento (w)	Normal	8.5 lb/in	1,275 lb/in
Tenacidade (K_{Ic})	Normal	43 Ksi $\sqrt{\text{in}}$	6,45 Ksi $\sqrt{\text{in}}$

Tabela 7-9 Características das variáveis básicas no exemplo 1

A figura 7-8 apresenta a chapa retangular com duas trincas numa das faces, utilizada para os cálculos de confiabilidade no presente exemplo.

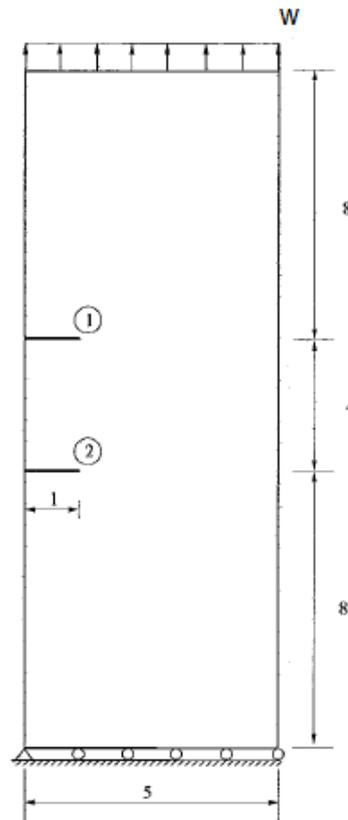


Figura 7-8 Chapa retangular com duas trincas numa das faces

Para a determinação da probabilidade de falha (pf), os resultados obtidos por LEE e ANG [15], foram desenvolvidos utilizando-se um programa para a análise de mecânica da fratura[10] e o programa PACONF[29] para a análise de confiabilidade. O problema foi dimensionado com uma função de falha definida e com um sistema em série, onde a função de falha é representada pela equação 7.2[37]

$$G(w, K_{Ic}) = K_{Ic} - K_{calc}(w) \quad 7.2$$

onde K_{Ic} representa a tenacidade à fratura (a função densidade das resistências) e K_{calc} representa o fator de intensidade de tensões da trinca i obtido através da Simulação Monte Carlo desenvolvida no programa Microsoft Excel 2007.

A equação 7.3 [37] representa o método para obter os parâmetros da função de densidade de K_{calc} .

$$K_{calc} = S = \sigma \sqrt{\pi a} f_1(s) \quad 7.3$$

onde σ representa a média do carregamento em lb/in, a representa o tamanho da trinca, $f_1(s)$ representa função de forma. Para a obtenção de $f_1(s)$ é utilizada a equação 7.4[37]

$$f_1(s) = 1 - 0,2935 [1 - (1 - s)^4] \quad 7.4$$

onde h representa a distância entre as duas trincas e $s = a/(a + h)$ [37].

Na tabela 7-10 são apresentados os resultados obtidos dos programas mencionados anteriormente e o método aplicado no presente trabalho. A Simulação de Monte Carlo foi realizada no programa Microsoft Excel 2007, com uma geração de 20,000.00 números aleatórios para as distribuições de densidade de R e S.

Tendo em vista que a equação do fator de intensidade de tensões do livro de Tada [37] não corresponde exatamente à geometria considerada neste problema, duas trincas paralelas na borda livre versus duas trincas paralelas no centro da placa, um fator de ajuste foi incluído na equação 7.3 para levar em conta os efeitos da borda livre na intensidade de K . A equação 7.3 foi multiplicada por 1.4 para obter resultados próximos da referência consultada.

A probabilidade de falha e a confiabilidade foram obtidas utilizando-se a metodologia apresentada nas subseções 5.5 e 5.6.

Pf	β	Pf SMC	β SMC
7,71E-4	3,17	7,092E-4	3,16

Tabela 7-10 Primeira comparação de Pf e β

7.2 DETALHE DO TRABALHO

A presente subseção mostra as considerações propostas para o desenvolvimento do método de estudo de um navio petroleiro.

Os dados do navio (dimensões, espaçamentos de estruturas transversais, carregamento, etc.) foram obtidos de notas de aula da disciplina PNV-5009 [25]. O navio foi desenhado com base nas normas ABS [2].

Para os cálculos do peso leve do navio, foi considerado: o peso em aço, a massa transversal, o peso do motor e o peso da superestrutura da seguinte forma [25]:

Peso em aço: (área transversal da secção mestra * comprimento * δ do aço) + massa transversal)

Peso transversal: peso em aço das cavernas + peso em aço das anteparas

Peso do motor: 10% do peso em aço do navio

Peso da superestrutura: 10% do peso em aço do navio

Para o cálculo do carregamento do navio, foi considerada uma distribuição uniforme ao longo do navio, com o objetivo de facilitar o estudo, que é igual ao máximo valor na seção mestra; isto é, o navio é considerado tipo caixote, com uma distribuição de cargas que não gere na condição de ondas uma tensão longitudinal maior à suportada pelo aço estrutural utilizado na construção do navio.

Para o cálculo da flutuação, foi considerada uniforme a geometria da boca do navio, igual à seção mestra. Foi utilizada a equação 6.2 para a determinação do calado em cada ponto do comprimento do navio, variando a amplitude e deslocamento da onda ao longo do navio. A flutuação, expressada na equação 7.5, foi obtida pela multiplicação do calado vezes a boca da seção mestra, considerando o peso específico (γ) da água do mar com um valor de $1 \text{ Ton}/\text{m}^3$ [10],[25]

$$e(x) = b * h_x * \gamma_{h_2o} \quad (7.5)$$

onde $e(x)$ representa a flutuação, B representa a boca da seção mestra do navio, para o caso simplificado, e γ_{h_2o} representa o peso específico da água do mar.

Foi considerado o equilíbrio da viga-navio, isto é, a igualdade entre o peso e o empuxo, para poder variar o calado em cada caso em que se estudavam ondas de amplitudes diferentes.

A carga, força cortante, momento fletor, tensão longitudinal primária, tensão longitudinal secundária e tensão longitudinal terciária foram determinadas conforme as fórmulas 3.7, 3.8, 3.9, 3.14, 3.17, 3.20 e 3.21, correspondentes ao capítulo 3, para diferentes amplitudes e deslocamentos de ondas.

Nas tensões longitudinais secundárias foi incluído o conceito do chapeamento colaborante. Na chapa colaborante do reforço longitudinal secundário pesado, com o objetivo de facilitar os cálculos no presente estudo, não foram incluídos os elementos estruturais leves.

As amplitudes de ondas foram variadas de 0,1m a 7,0m, com o objetivo de ter uma grande variedade de amplitudes de onda a serem analisadas, e o deslocamento da onda, ao longo do comprimento do navio, foi calculado desde 0 a 2π , com o objetivo de obter a maior tensão longitudinal total ao longo do navio.

A estatística das amplitudes de ondas foi o resultado de dados obtidos por um período de 10 anos pela bóia “*Virgen del Carmen*”, localizada no mar do norte de Perú, a 200 milhas da costa. Os dados foram obtidos entre os anos 2000 e 2009, diariamente, documentando 15 amostras por dia. Os dados foram analisados no programa Microsoft Excel 2007. Foram projetadas probabilidades de ocorrência de ondas para um período de 100 anos, fazendo uma tendência das maiores ondas de cada ano, e projetando estatisticamente a probabilidade de ocorrência de ondas extremas, devido a que a vida útil de projeto de um navio é medida em décadas. Foram testadas distribuições de densidades de extremos conhecidas, para representar o histograma, tendo sido avaliada, como a mais aceitável, a distribuição de Gumbel. A distribuição de Gumbel foi ajustada pela teoria de mínimos quadrados e testada a compatibilidade da distribuição pelo teste de “Qui-quadrado”.

A relação entre o comprimento e a altura de onda, foi obtida pela equação 7.6, estabelecida por Murray e utilizada atualmente pela “Lloyd’s Register” [10]

$$h = 3,75 L^{0,3} \quad (7.6)$$

7.3 DADOS DO NAVIO

O navio estudado no presente trabalho é um navio petroleiro. A tabela 7-11 apresenta as dimensões do navio a ser objeto do estudo.

A distribuição das cavernas, anteparas e outros elementos estruturais são detalhadas no Anexo-C. O peso em aço do navio foi estimado ao longo de seu comprimento, dividindo o navio em 262 partes iguais (o navio foi dividido em cada metro de seu comprimento).

A figura 7-9 apresenta a distribuição do peso em aço do navio. Nos primeiros 50 metros, o peso em aço do navio é maior devido à superestrutura e ao peso do motor. As anteparas e as cavernas podem ser observadas no gráfico representadas com os picos no gráfico, onde os maiores picos correspondem às anteparas e os menores às cavernas.

Dimensões principais do navio	
Comprimento (m)	262
$\delta_{\text{aço}}$ (Ton/m ³)	7,8
Coeficiente de bloco	0,848
Pontal (m)	24,5
Calado do projeto (m)	17,76
Deslocamento (Ton)	15442,74
Boca (m)	43

Tabela 7-11 Dados principais do navio a ser estudado

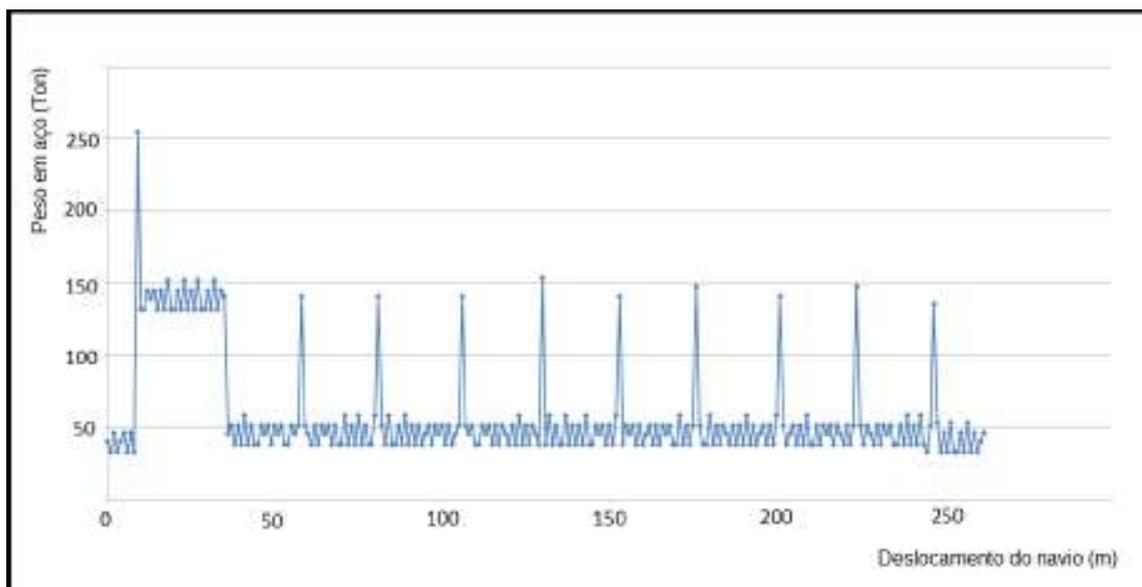


Figura 7-9 Peso em aço do navio estudado

O carregamento do navio foi distribuído nos tanques, ao longo de seu comprimento, com o objetivo de obter uma tensão longitudinal total menor que a tensão de escoamento do aço estrutural naval. A distribuição dos carregamentos nos tanques do navio são apresentados no Anexo-D.

7.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise das cargas, forças cortantes e momentos fletores atuantes no navio foi desenvolvida segundo a metodologia apresentada no capítulo 6 e com a mesma planilha validada na seção 7.1. Os gráficos das cargas, forças cortantes e momentos fletores para as condições de mar calmo, tosamento e alquebramento com onda crítica, serão apresentados no Anexo-E.

Utilizando a equação 6.2 foi variada a amplitude e deslocamento da onda que atinge o navio num tempo “t”. Com a variação da amplitude e deslocamento da onda, foram simulados, no programa Microsoft Excel 2007, todos os cenários possíveis, com ondas que atingem o navio pela parte frontal dele, durante a vida útil do navio petroleiro trabalhando no mar do norte do Peru, com o objetivo de estudar

as variações das tensões longitudinais primárias, secundárias e terciárias, obtendo dados críticos de solicitações que atuam sobre a estrutura do navio.

A máxima tensão longitudinal gerada neste estudo aconteceu próxima à seção mestra do navio na condição de tosamento. Isto se deve à distribuição dos pesos e cargas no navio. Cabe esclarecer que o estudo das tensões longitudinais foi desenvolvido no engaste de dois elementos estruturais, um longitudinal e um transversal, com o objetivo de analisar pontos críticos ao longo do comprimento do navio e facilitar o estudo.

A figura 7-10 apresenta as tensões longitudinais primárias, secundária pesada, secundária leve e terciária, obtidas na condição de mar calmo. Pode-se observar o comportamento uniforme das tensões secundárias e terciárias, devido ao fato de que a pressão hidrostática ao longo do navio é constante na condição do mar sem ondas. A leve inclinação das curvas representa o ângulo de trim que possui o navio para ter o equilíbrio entre o peso e o empuxo.

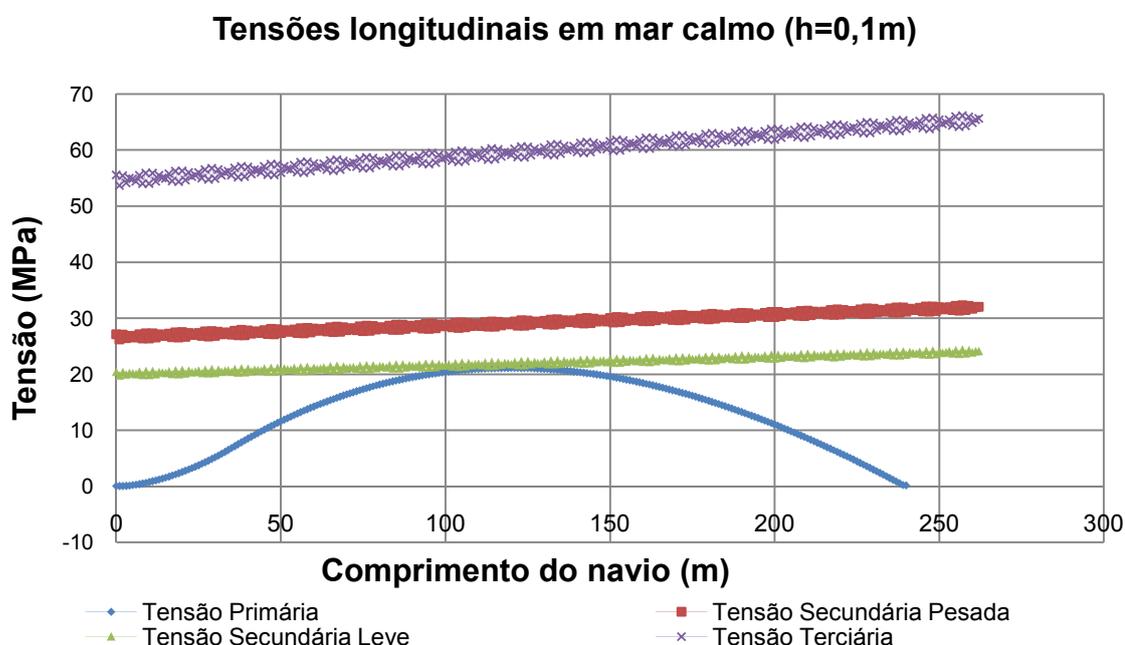


Figura 7-10 Tensões longitudinais na condição de mar calmo

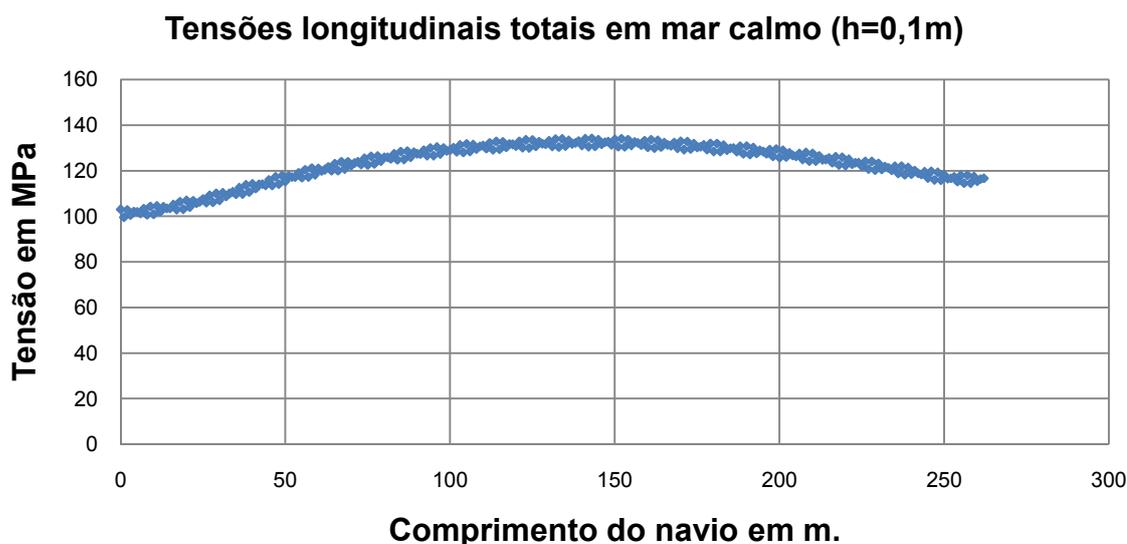


Figura 7-11 Tensões longitudinais totais em mar calmo (h=0,1m)

Na figura 7-11 a máxima tensão longitudinal foi aos 143 m. do comprimento do navio, com um valor de $134,18 \text{ MPa}$. A influência da tensão terciária é grande devido à pressão hidrostática. A tensão longitudinal primária, por sua vez, é menor, devido ao fato de que o navio inteiro está distribuindo uniformemente as forças ao longo de seu comprimento, diante da ausência de ondas. Pode-se observar a influência do ângulo de trim, que faz com que a maior tensão longitudinal seja obtida a 12 m. da seção mestra do navio, que fica aos 131 m. do comprimento. Isto se deve à influência do ângulo de trim nas tensões longitudinais secundárias e terciárias.

Nesta condição, o deslocamento da onda, segundo a equação 6.2, possui um $\varphi = 0$. Na condição de mar calmo a variação do φ não afeta as tensões longitudinais, devido ao fato de que não se tem variações do calado com a variação do φ .

Afigura 7-12 apresenta as mesmas tensões analisadas nafigura 7-10 na condição de mar com uma onda (tosamento) de igual comprimento ao do navio, onda crítica, definida por Murray no capítulo 2 e com altura determinada segundo a equação 7.6 na condição de deslocamento de onda com ($\varphi = 0$). No gráfico pode-se observar que as condições críticas para as tensões primárias, secundárias e terciárias, não coincidem no mesmo ponto.

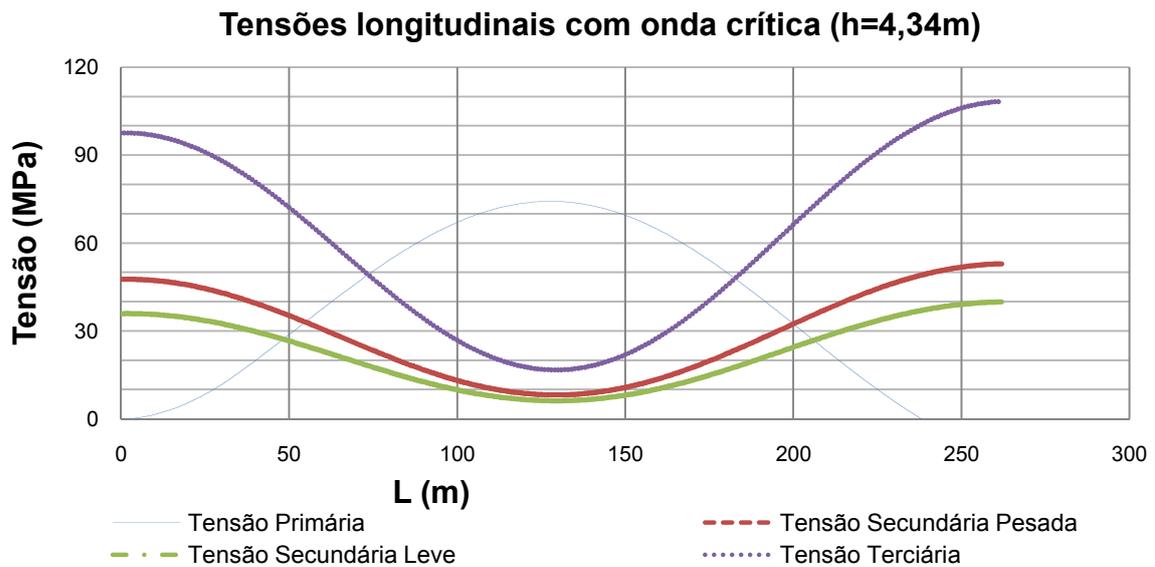


Figura 7-12 Tensões longitudinais na condição de mar com onda crítica ($\varphi=0$, tosamento)

Na figura 7-13 nota-se a grande influência das tensões secundárias e terciárias, sendo a maior tensão longitudinal total de 190,40 *Mpa*, devido à pressão hidrostática nas seções de proa e popa no navio.

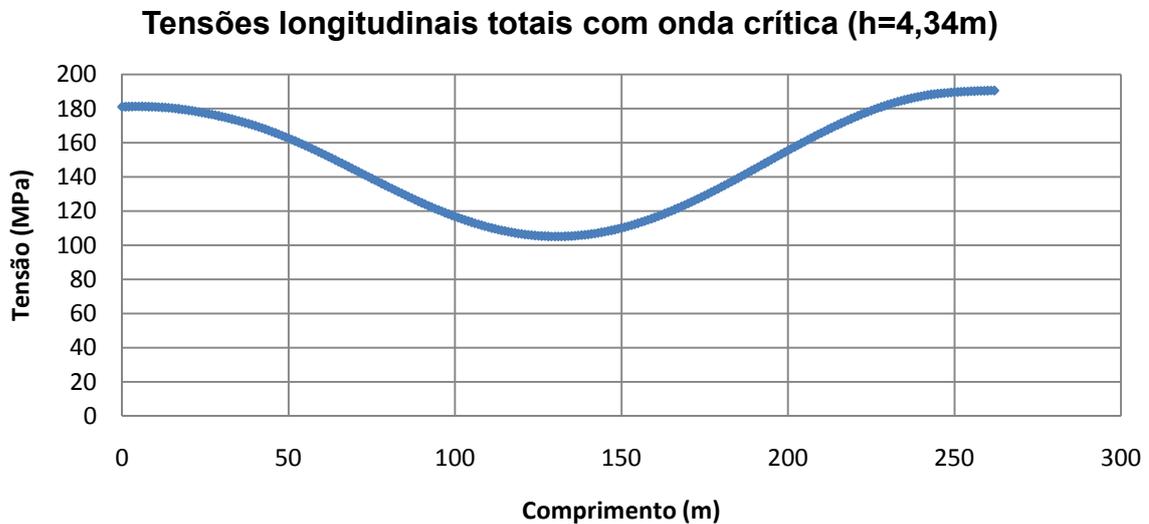


Figura 7-13 Tensões longitudinais totais na condição de mar com onda crítica (h=4,34m) em tosamento

A figura 7-14 apresenta o mesmo estudo realizado na figura 7-10, na condição de alquebramento, onde se pode notar o aumento das tensões secundárias e terciárias perto da seção mestra do navio devido à pressão hidrostática, já que a crista da onda atinge a meia-nau.

Tensões longitudinais com onda crítica (h=4,34m)

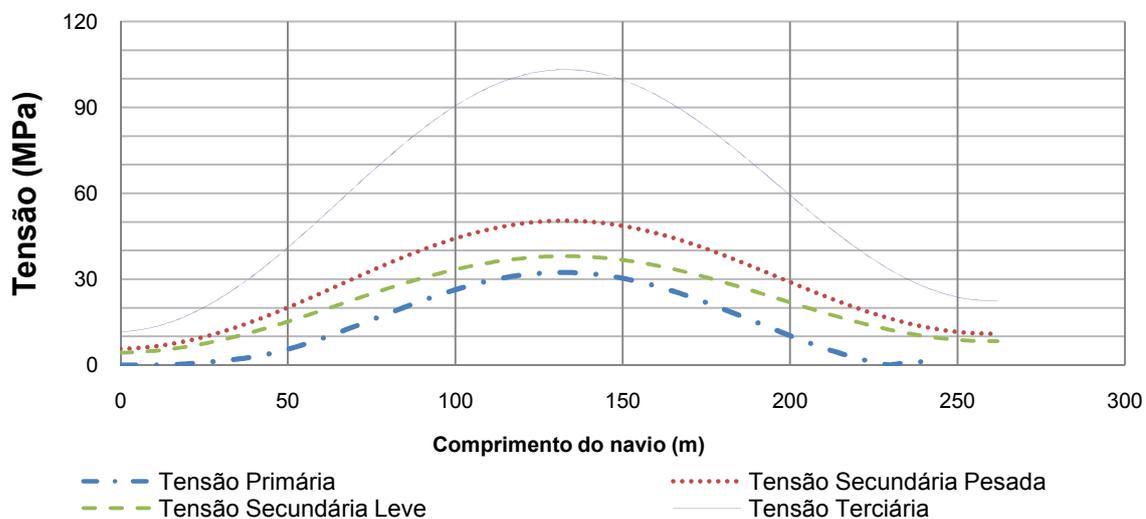


Figura 7-14 Tensões longitudinais na condição de mar com onda crítica ($\varphi=\pi$, alquebramento)

A figura 7-15 apresenta a condição crítica no presente estudo, onde a tensão longitudinal máxima foi obtida aos 133 m. de comprimento do navio, só 2 m. fora do centro do navio, que é o resultado do ângulo de trim. A tensão longitudinal obtida aos 133 m. do comprimento do navio foi de 223,93 MPa.

Tensões longitudinais totais com onda crítica (h=4,34m) em alquebramento

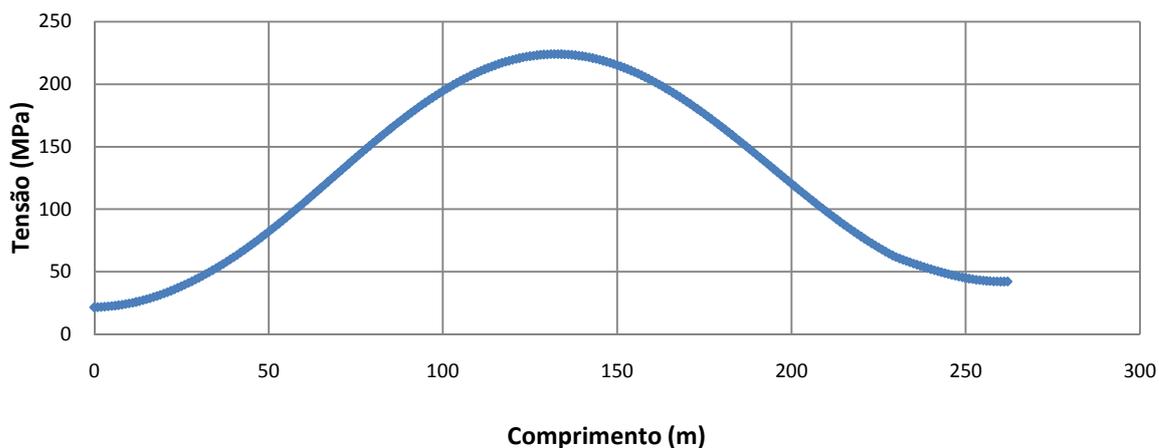


Figura 7-15 Tensões longitudinais totais com onda crítica (h=4,34) em alquebramento

O navio foi construído com o aço estrutural naval $NV - NS$. Segundo o capítulo 6, ele possui uma resistência de $235 MPa$, o que garante que nosso navio, na pior condição possível, não tenha a possibilidade de ocorrência de falha. Segundo o cálculo realizado na condição de navio “*as built*”, possui um G positivo, baseado em estudos determinístico pode-se dizer que é um navio seguro. Note-se que até o momento só foi realizado um estudo sem desgaste estrutural. Nas seguintes subseções será realizada a complementação do estudo, incluindo o desgaste estrutural e a probabilidade de ocorrência de ondas de determinadas amplitudes.

A figura 7-16 apresenta as tensões longitudinais totais para as figuras 7-10, 7-13 e 7-15.

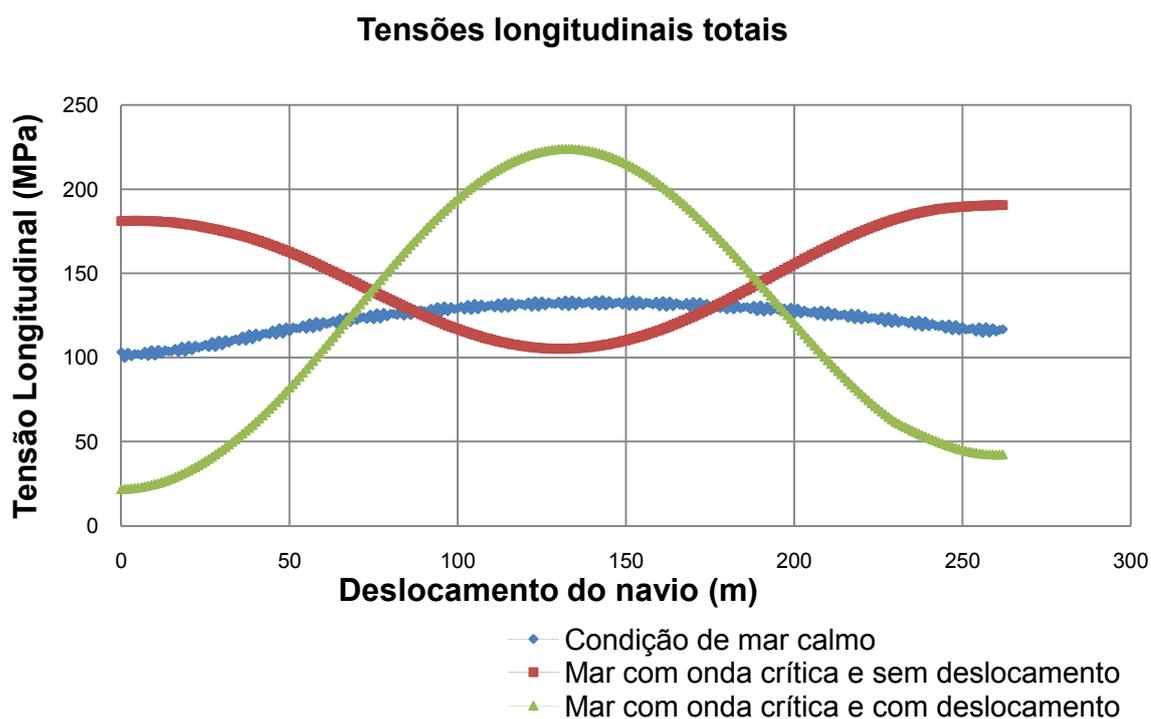


Figura 7-16 Tensões longitudinais totais para as condições de mar calmo, mar com onda crítica e $\varphi=0$, mar com onda crítica e $\varphi=\pi$

A figura 7-17 apresenta as tensões longitudinais totais para a condição de mar com onda de altura 0,3m. Neste gráfico, o eixo x representa a variação do φ , para determinar em que posição do deslocamento da onda é gerada a maior tensão longitudinal.

O mesmo estudo foi feito para todas as condições possíveis de φ , de 0 a 2π , e para ondas de amplitudes desde 0.1m a 7m.

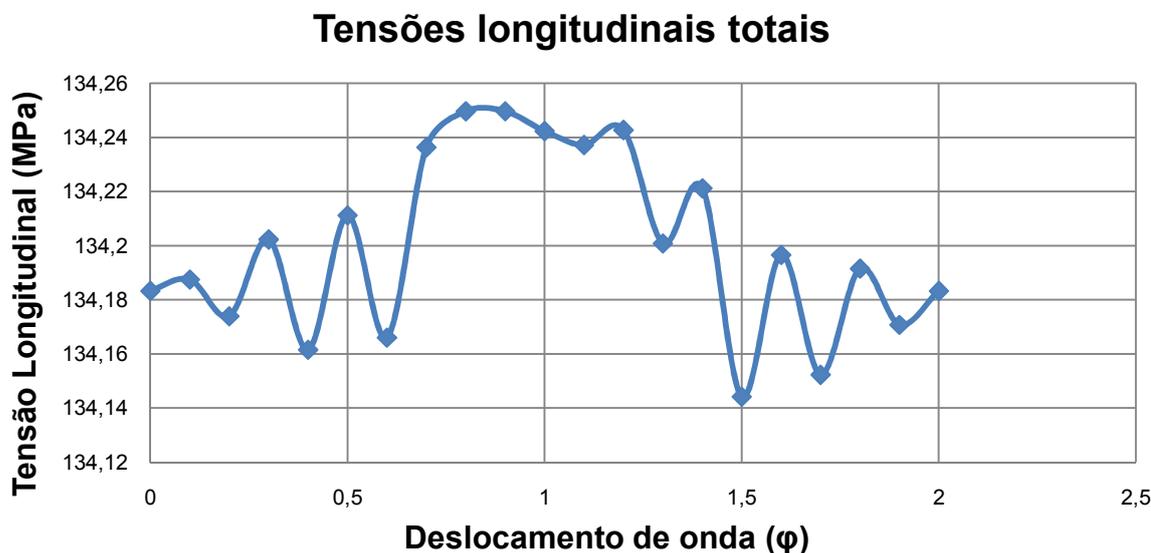


Figura 7-17 Tensões longitudinais máximas em função do deslocamento da onda

A figura 7-18 apresenta as máximas tensões longitudinais totais obtidas para cada amplitude de onda considerada neste trabalho. Nota-se que o gráfico apresenta amplitudes de ondas desde os 0 m até os 4.5 m de amplitude com o objetivo de facilitar o estudo, uma vez que, com maiores amplitudes de onda a tensão longitudinal total decresce. Isto pode ser justificado, uma vez que, no estudo estatístico de ondas, que será apresentado na subseção 7.5, as ondas com amplitude maior que 4.5 m. possuem probabilidades de ocorrência de 10^{-23} .

Embora os resultados das tensões máximas apresentados na figura 7-18 correspondem a diferentes pontos materiais, observa-se um incremento bastante linear da tensão longitudinal máxima com a amplitude da onda. Observa-se um desvio dessa linearidade na faixa de amplitudes desde 3.5 até 4.5m.

Devido às simplificações feitas ao navio e considerando que os pesos ao longo do navio não são totalmente uniformes, surgem irregularidades quando as ondas geram maiores tensões longitudinais. Para o caso de estudo, pode-se adotar valores a partir dos resultados apresentados na figura 7-16, mas, para desenho de navios é recomendável a utilização de programas especializados na obtenção desses tipos

de dados, a fim de garantir que os resultados sejam os mais próximos possíveis da realidade.



Figura 7-18 Máximas tensões longitudinais em função da amplitude de onda

7.5 ESTATÍSTICA DE ONDAS

Os dados das ondas registradas no norte do mar do Peru, pela bóia “*Virgen del Carmen*”, durante um período de dez anos, foram analisados e representados numa função de probabilidade de ocorrência no programa de cálculo Microsoft Excel 2007, com uma projecção a 100 anos a partir do método da tendência dos máximos anuais.

Para fins deste estudo, a função de probabilidade de ocorrência de ondas foi caracterizada por uma distribuição de probabilidades conhecida. Nessa linha, com o objetivo de obter uma função de solicitações com relativa simplicidade, foi escolhida a distribuição de Gumbel, ajustada pelo método de mínimos quadrados, e testada pelo teste qui-quadrado, obtendo um aceitável nível de correspondência [19].

A figura 7.19 apresenta os dados de amplitudes obtidos pela bóia “*Virgen del Carmen*”, e a distribuição normal que foi utilizada no presente estudo.

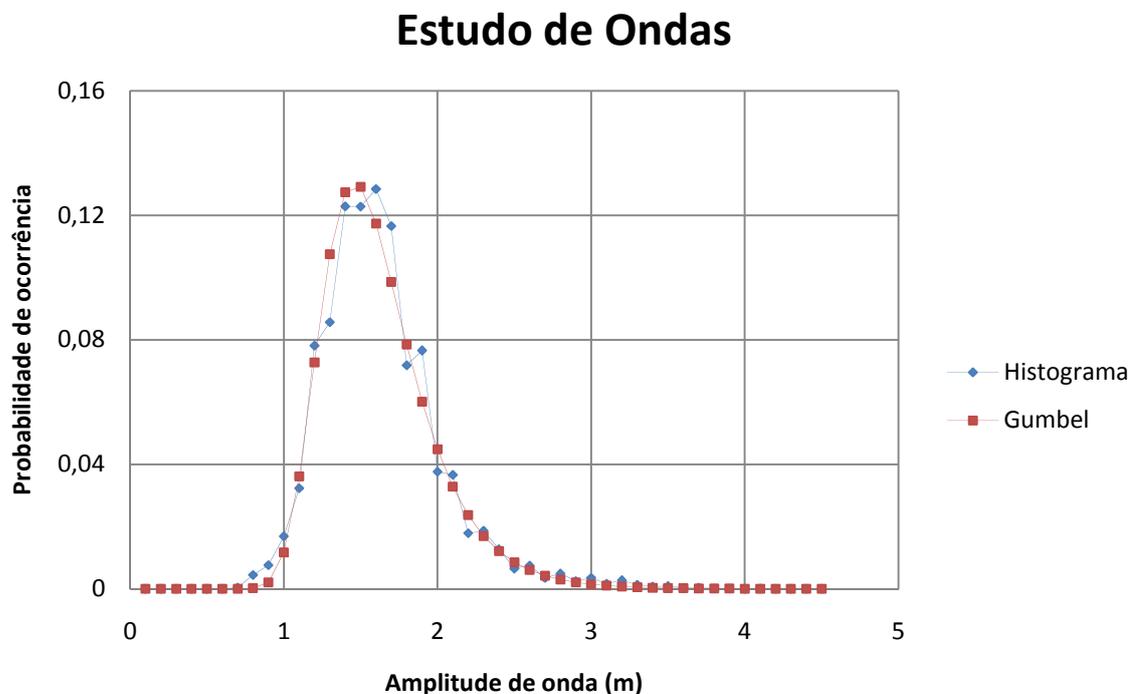


Figura 7-19 Função de probabilidade de ocorrência de ondas no mar do norte do Peru

7.6 DISTRIBUIÇÃO DAS SOLICITAÇÕES (S)

Para a obtenção da distribuição das solicitações (S) que atingem o navio foi aplicada a relação entre a tensão longitudinal total máxima, que é gerada com uma determinada amplitude de onda, e a probabilidade de que essas ondas ocorram.

A figura 7-20 apresenta a relação entre as figuras 7-18 e 7-19. Na coluna da esquerda é apresentada a probabilidade de ocorrência correspondente às ondas, enquanto na coluna da direita são apresentadas as tensões longitudinais totais correspondentes à figura 7-18.

A figura 7-21 foi determinada a partir do fato de que cada tensão longitudinal total é produto de uma onda com uma determinada altura e possui uma probabilidade de

ocorrência conhecida. A referida figura apresenta a distribuição das solicitações (S), representada pelas tensões longitudinais totais.

Oportuno dizer, ainda, que a figura 7-21 representa as solicitações presentes no navio na condição de navio “*as built*”, possuindo uma média de 164,32 MPa e um desvio padrão de 7,5 MPa. A probabilidade de falha é muito menor que 10^{-5} , cabendo lembrar que o desenho do navio foi projetado com um carregamento igual ao carregamento que gere uma tensão longitudinal crítica inferior à resistência do material.

Nessa linha, no presente estudo, verifica-se que a seção mestra do navio poderia ser menor ou o navio poderia ter um maior carregamento, devido à baixa probabilidade de ocorrência daquela onda na área de trabalho do navio.

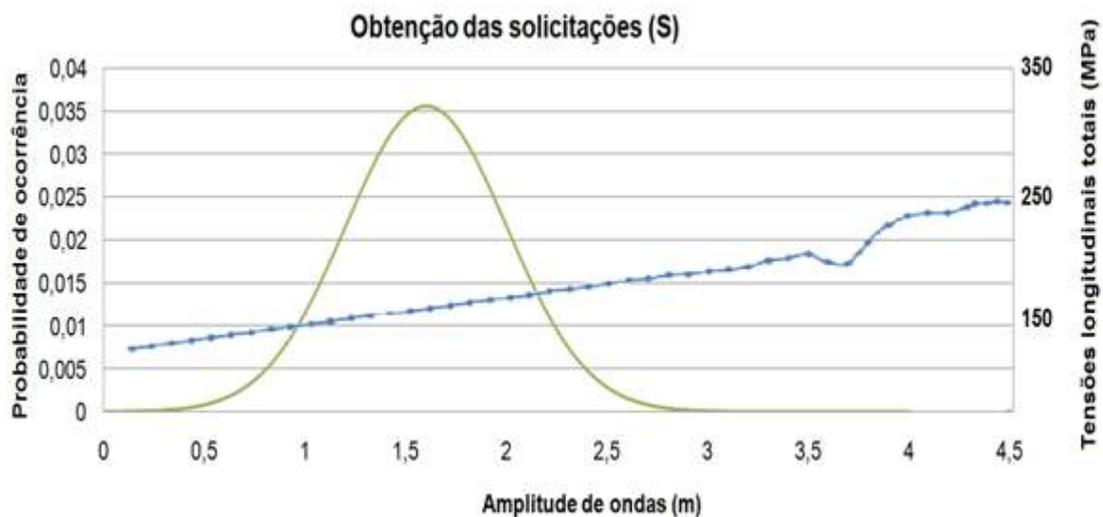


Figura 7-20 Relação entre as tensões longitudinais totais e as amplitudes de ondas

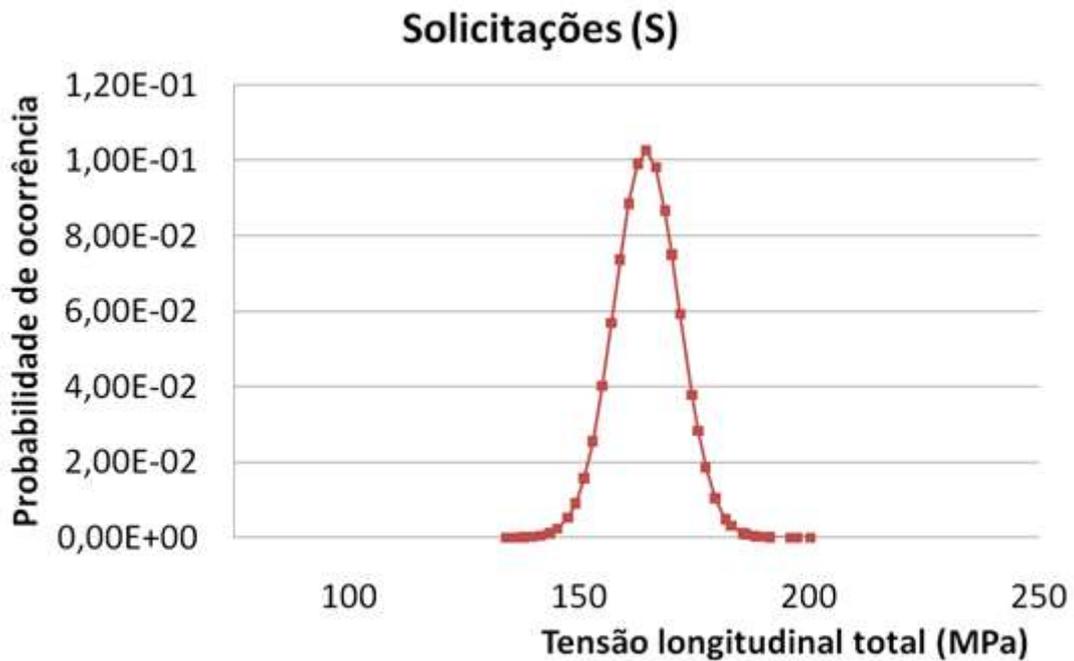


Figura 7-21 Distribuição das solicitações (S)

Conforme visto no capítulo 6, a espessura da chapa do fundo do navio, foco do estudo, possui uma deterioração ao longo do tempo em função de uma taxa de corrosão estabelecida no capítulo 1. Tal deterioração da chapa do fundo causa uma movimentação à direita da curva de solicitações ao longo do tempo.

A figura 7-22 apresenta a variação das solicitações (S) em função da taxa de corrosão. Nota-se que foram analisadas todas as solicitações possíveis geradas por ondas desde 0,1 até 7 m. de altura de onda, fazendo-se uma variação da espessura da chapa do fundo do navio com uma taxa de corrosão fixa. Foram analisados os pontos onde são geradas as maiores tensões longitudinais para cada caso de estudo (dependendo da altura de onda). Foram comparadas as tensões resultantes com suas devidas probabilidades de ocorrência dependendo da probabilidade de ocorrência da onda que as gera. A figura 7-22 apresenta a influência da taxa de corrosão nas solicitações do navio ao longo do tempo.

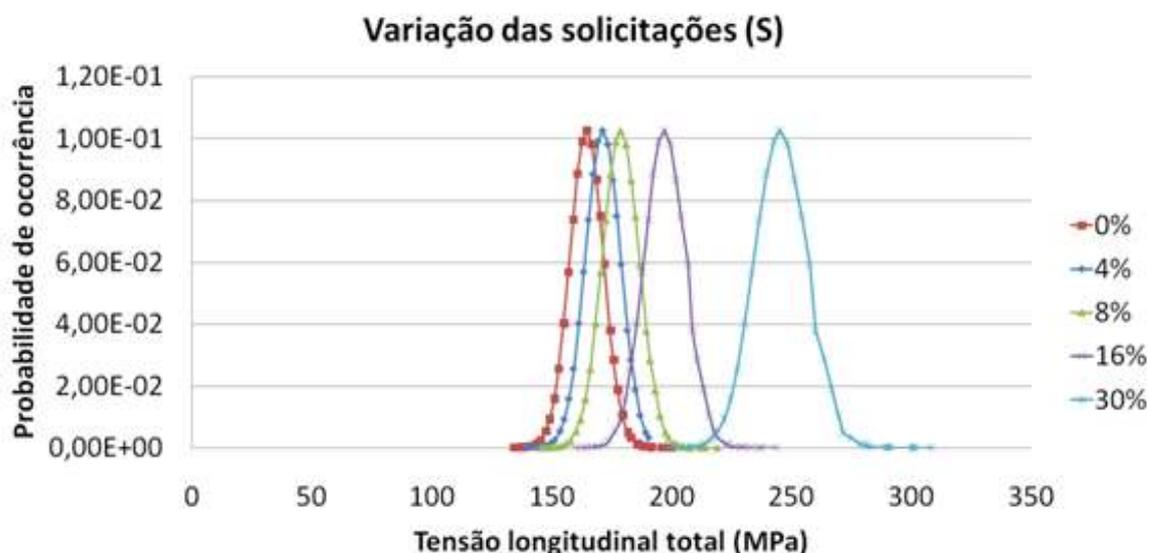


Figura 7-22 Variação das solicitações (S) em função do desgaste da chapa

Na direita do gráfico pode-se observar a porcentagem de deterioração da chapa estudada em relação à sua espessura de projeto.

Com a deterioração da chapa do fundo do navio, a curva das solicitações é movimentada à direita, aumentando a probabilidade de ocorrência de maiores solicitações. A média das solicitações sem deterioração é de $164,9 \text{ MPa}$ e a média das solicitações com 30% de redução da espessura é de $244,98 \text{ MPa}$, que corresponde a um período de 43 anos pra ter aquela deterioração. O aumento das médias em função de uma redução da espessura da chapa do fundo de 2% é de 2,69%.

7.7 DISTRIBUIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS (R)

Segundo exposto no capítulo 6, o estudo das resistências (R) é representado pelo aço estrutural naval comum. A distribuição das resistências (R) depende do ponto de fluência do aço, que é representada por uma distribuição normal com média igual a 250 MPa e desvio padrão igual a $5,88 \text{ MPa}$, segundo os cálculos realizados na subseção 6.2.3. A figura 7-23 apresenta a distribuição das resistências (R).

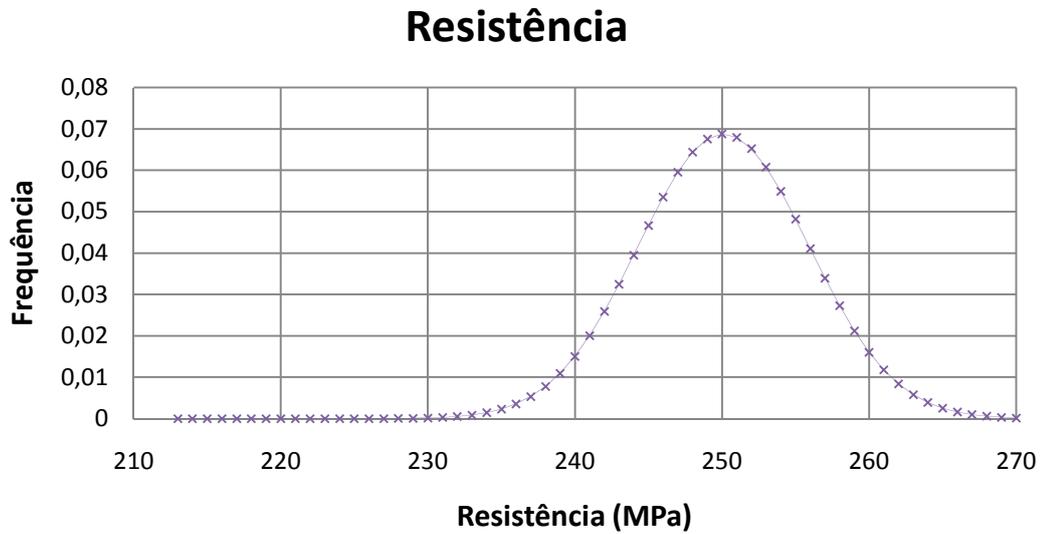


Figura 7-23 Distribuição das resistências (R)

7.8 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Conforme o capítulo 6 e baseado na teoria apresentada no capítulo 5, a confiabilidade estrutural será determinada pela relação $G = R - S$, onde será utilizada a Simulação Monte Carlo, fazendo uma subtração de números aleatórios que seguem as distribuições das solicitações (S) e as resistências (R). A simulação foi realizada no programa de cálculo Microsoft Excel 2007. Importante mencionar que os detalhes do desenvolvimento do método de Monte Carlo serão apresentados no Anexo F.

A figura 7-24 apresenta a distribuição $G = R - S$ para a condição inicial, isto é, a chapa não possui redução da espessura. A condição inicial é definida por Soares no capítulo 2 como condição “*as built*”. A curva G para a condição de navio sem redução de espessura possui uma média de 70,61 MPa e um desvio padrão de 9,17 MPa, e pode ser considerado seguro.

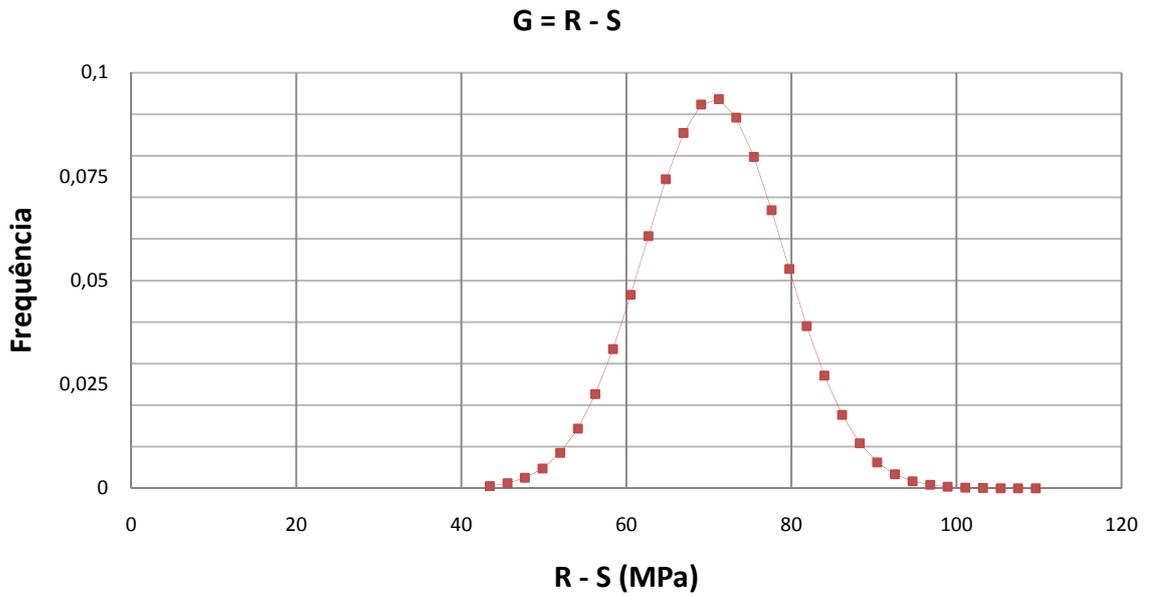


Figura 7-24 Curva G para 0% de desgaste na chapa estudada

Com a variação das solicitações (S) devido à corrosão, a função G possui uma movimentação apresentada na figura 7-25. Na direita do gráfico pode-se observar o desgaste da chapa estudada em porcentagem, e.g. 8% representa uma chapa com uma espessura de 92% do valor original.

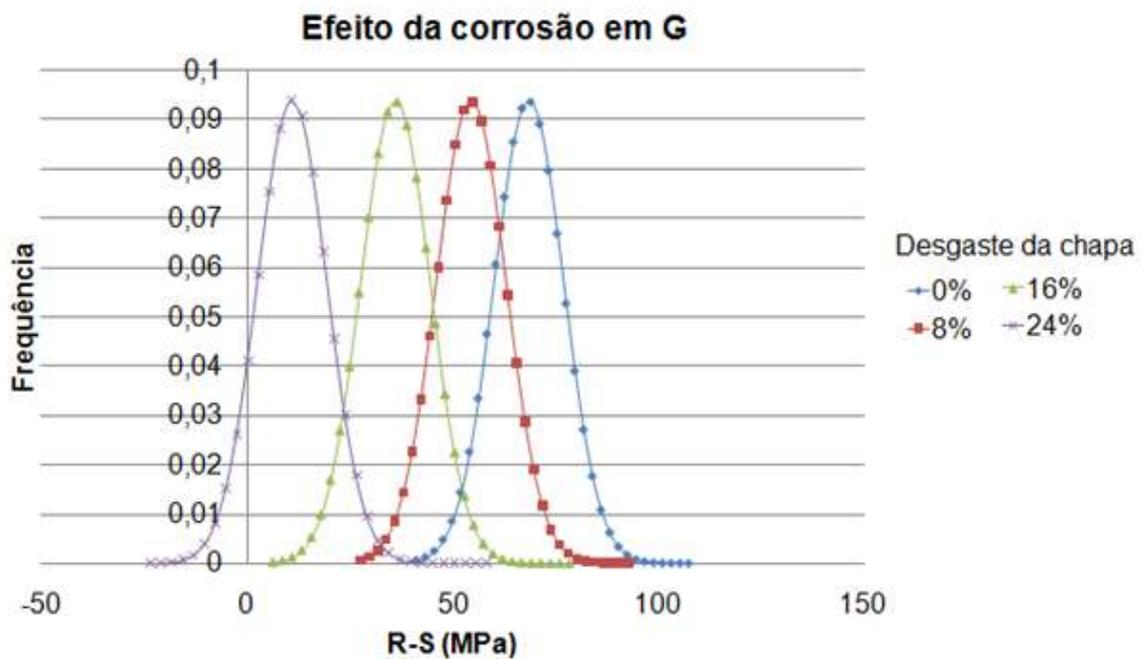


Figura 7-25 Efeito da corrosão na curva G

A função G que representa o estudo de confiabilidade do navio, com uma redução da espessura da chapa de 24% do valor original, possui uma média de 13,64 MPa, e uma probabilidade de falha (P_f) de 13,27%.

A partir das curvas apresentadas na figura 7-25 e segundo a equação 5.15, é possível obter a probabilidade de falha de forma direta. A figura 7-26 apresenta a queda da confiabilidade e o aumento da probabilidade de falha do navio estudado em função do tempo, tendo em consideração uma taxa de corrosão fixa de 0,01mm/ano previamente definida.

É preciso mencionar que o presente estudo propõe um caso ideal, com corrosão uniforme atingindo ao navio ao longo de toda sua vida útil. O estudo da corrosão, na realidade, tem que ser levado em conta como um processo estocástico e não uniforme ao longo do comprimento do navio.

Em navios de mais de trinta anos, como os navios da Marinha de Guerra do Peru, são apresentados fatores que incrementam consideravelmente a taxa de corrosão. As saídas de dutos de refrigeração fazem com que se tenha uma corrosão localizada nessa área, por apresentar diferenciais de temperatura, as modificações em equipamentos elétricos e eletrônicos ao longo do navio mudam o potencial elétrico do casco, em função disso, a proteção catódica pode não trabalhar de forma correta, incrementando a corrosão. O gráfico 7-26 apresenta a queda da confiabilidade de um navio simplificado em condições de estudo específicas, como são as taxas fixas de corrosão e as probabilidades de alturas de ondas que geram as solicitações numa condição de carga constante. O gráfico 7-26 mostra que durante os primeiros trinta anos de vida útil do navio, a confiabilidade é de 100%, mas é preciso mencionar, que o presente trabalho estuda só uma condição de estado limite, estado limite último gerado pelas solicitações devido às alturas de ondas e corrosão uniforme. Os estudos de confiabilidade em cascos de navios, atualmente, são baseados na concentração de tensões por trincas geradas por fadiga e corrosão, considerada como um processo estocástico. O gráfico 7-26 não é uma referência para estabelecer índices de confiabilidades reais, mas permite apresentar a queda da confiabilidade em função às especificações do presente trabalho.

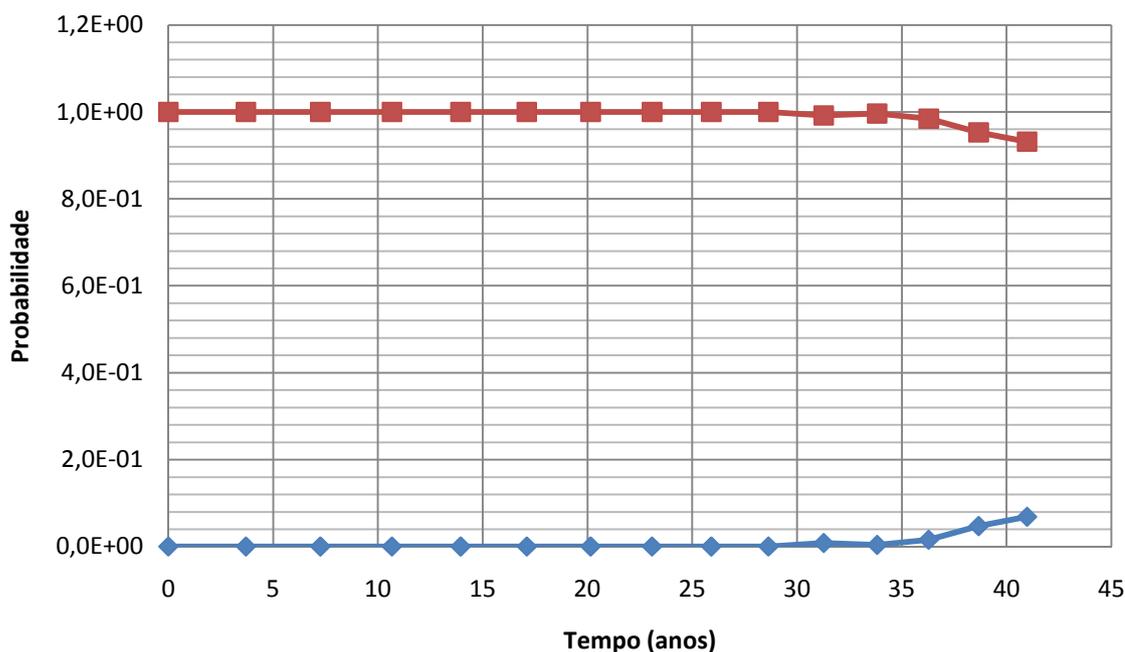


Figura 7-26 Probabilidade de falha (P_f) e probabilidade de sucesso (P_s) em função do tempo e a taxa de corrosão

Para a obtenção do índice de confiabilidade β , já o Método de Simulação Monte Carlo faz com que a curva G tenha uma boa aproximação a uma curva de distribuição normal [24]. Portanto, pode-se obter diretamente o índice de confiabilidade a partir das probabilidades de falhas obtidas anteriormente. Utilizando a tabela apresentada no Anexo-B pode-se obter o índice de confiabilidade para cada condição de desgaste do casco ao longo do tempo, e será analisado no seguinte gráfico.

A figura 7-27 apresenta a queda constante do índice de confiabilidade em função da diminuição da espessura da chapa do fundo do navio desde a condição de chapa nova, até apresentar um desgaste de 30%, limite de desgaste permissível para troca de chapa segundo o SIMA (estaleiro da Marinha de Guerra do Peru).

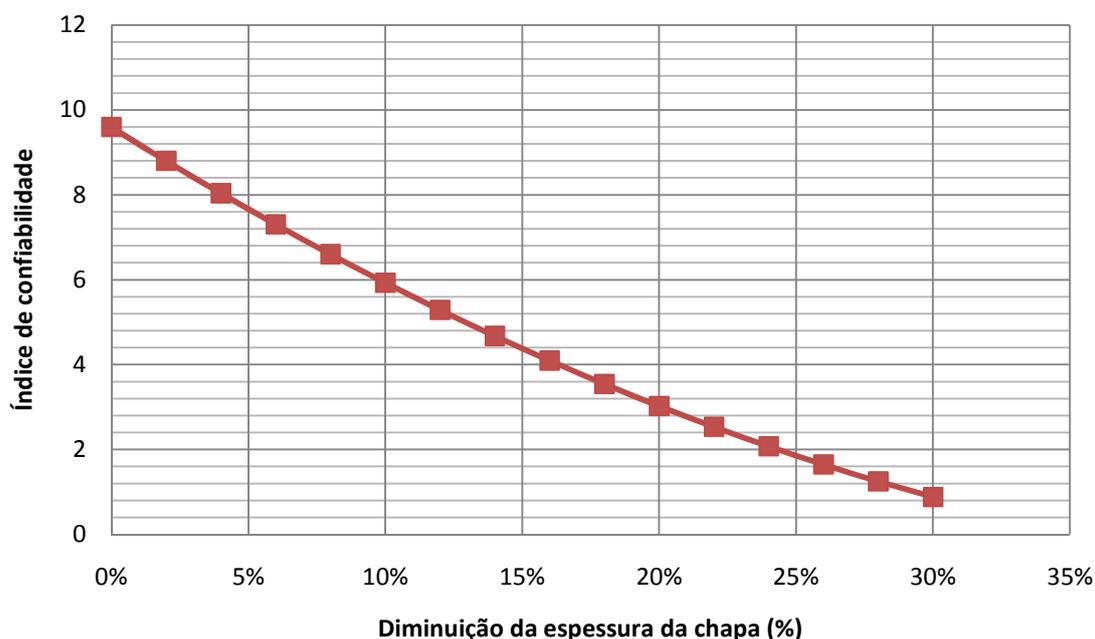


Figura 7-27 Índice de confiabilidade ao longo do tempo

O gráfico 7-27 apresenta elevados índices de confiabilidades no início da vida útil do navio, o que pode ser considerado como um sobredimensionamento estrutural. Como foi mencionado anteriormente, este estudo só avalia a perda de confiabilidade estrutural em função da corrosão uniforme do fundo do casco, ao longo da vida útil do navio, não considerando os efeitos da fadiga e outros possíveis estados limites.

A diminuição da espessura da chapa do fundo do navio de 30% de seu valor original acontece, segundo as taxas fixas de corrosão propostas para o presente estudo (0,01mm/ano), em 43 anos. O índice de confiabilidade, para o presente estudo foi menor do que os limites sugeridos por Soares, índice de confiabilidade igual a 3 para navios na condição de corroídos [34], quando a chapa do fundo atingiu uma diminuição na sua espessura de 18%, isto aconteceu aos 28 anos de vida útil do navio.

O presente estudo de caso avaliou a utilização da metodologia apresentada no capítulo 6. Os resultados foram baseados em um navio projetado em aulas[25] e com carregamentos menores ao máximo de sua capacidade total, porém, os

resultados não podem ser interpretados como válidos para referências de índices de confiabilidades iniciais ou queda da confiabilidade ao longo do tempo para navios reais, mas fornecem uma ferramenta para futuras análises de confiabilidade.

7.9 Dimensionamento do navio

O caso de estudo apresentou a análise estrutural e a obtenção dos índices de confiabilidade num navio petroleiro com um carregamento que é gerado numa onda crítica, e uma tensão longitudinal total inferior ao limite elástico do aço estrutural naval comum.

Num segundo caso de estudo, que analisa o mesmo navio estudado na seção 7.2, os tanques de lastre foram esvaziados e os tanques de carga foram cheios, apresentando uma altura do fluido de 20m, com o objetivo de avaliar se a estrutura do navio foi dimensionada corretamente.

Os resultados obtidos com 0% de desgaste apresentaram uma confiabilidade baixa, com um índice de confiabilidade de 0,8. Por isso, foi estudado o navio, modificando a espessura da chapa do fundo, aumentando-a, com o objetivo de possuir índices de confiabilidade aceitáveis.

A figura 7-30 apresenta a variação da confiabilidade em função da espessura da chapa. A figura apresentada mostra uma variação da espessura desde a condição de chapa corroída um 30%, ate chapa com um incremento de espessura de um 30%.

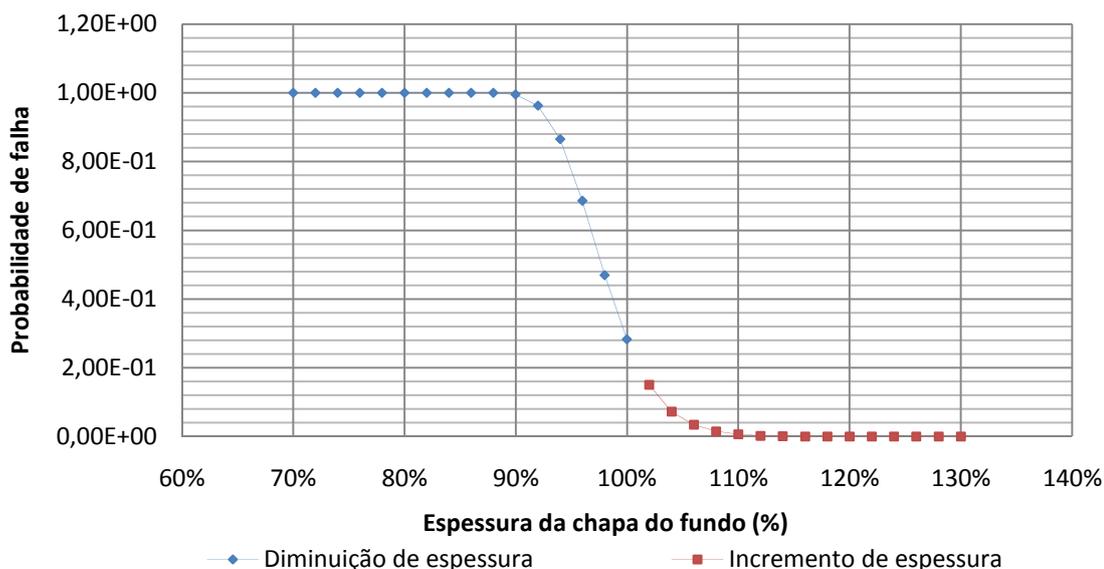


Figura 7-28 Probabilidade de falha (P_f) para o caso de estudo 2

A figura 7-30 evidencia as modificações que poderiam ser feitas à estrutura do navio estudado com o objetivo de obter aceitáveis níveis de segurança durante sua vida útil, tendo em consideração que neste caso foi estudada a condição de carregamento crítico. A figura 7-31 apresenta a variação do índice de confiabilidade com o incremento da espessura da chapa.

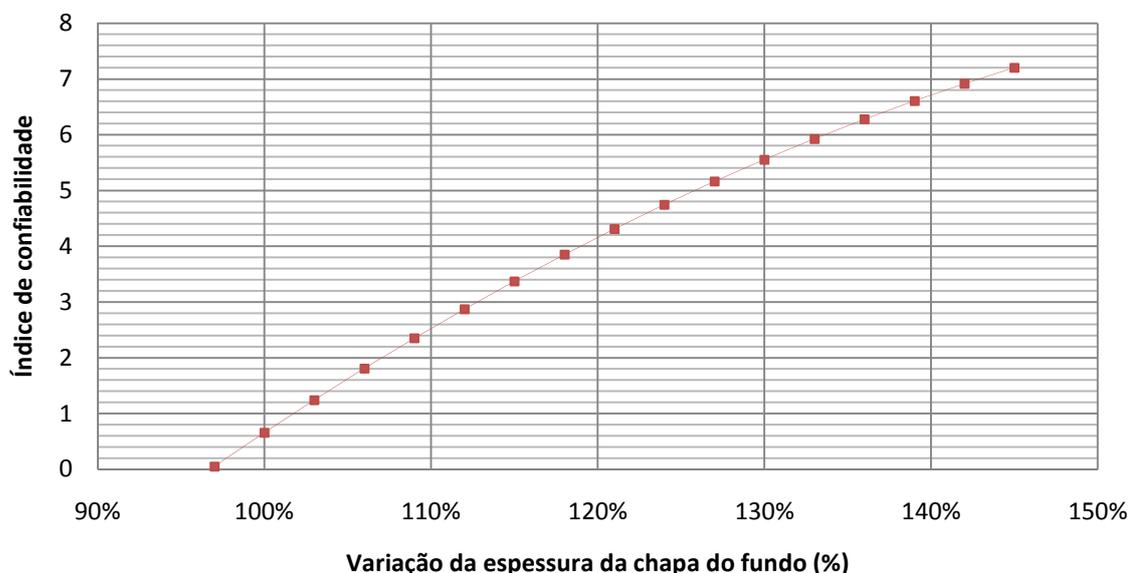


Figura 7-29 Índice de confiabilidade para o caso de estudo 2

Como é apresentado na figura 7-31, o índice de confiabilidade inicial do navio, na condição de navio com carga máxima, tende a se aproximar de 0,8, valor que está abaixo do índice recomendado por Soares [33]. Segundo o estudo realizado, a

solução seria um incremento da espessura da chapa do fundo em 18%, espessura com a qual se tem um índice de confiabilidade de 3.7.

7.10 Variação do módulo da seção mestra

Como terceiro caso de estudo, foi considerado a análise da seção mestra do navio, com o objetivo de variar o módulo da seção para observar a variação do índice de confiabilidade.

O módulo da seção é representado pela equação 7.7 e é obtido pela relação entre o momento de inércia da seção, em relação à linha neutra, e a distância desde a linha neutra até o ponto da seção estudado, neste caso, a chapa do fundo do navio.

$$\frac{I_{LN}}{(Y_{i,quilha})} \quad (7.7)$$

A condição de carga do navio foi a mesma estudada no caso de estudo dois, carga crítica, mas foi estudada só o efeito da tensão longitudinal primária.

A figura 7-32 apresenta a variação do índice de confiabilidade com a variação do módulo da seção, desde o módulo inicial de projeto até um módulo com o qual se obtenha um correto índice de confiabilidade, segundo o proposto por Soares [33].

Note-se que o índice de confiabilidade inicial varia do caso de estudo dois por não ter a influência das tensões secundárias e terciárias. Com um módulo de seção inicial de $0,62 \text{ m}^3$ se obtém um índice de confiabilidade de 2,08, já com um módulo de seção de $0,665 \text{ m}^3$ se obtém um índice de confiabilidade, satisfatório, de 3,7.

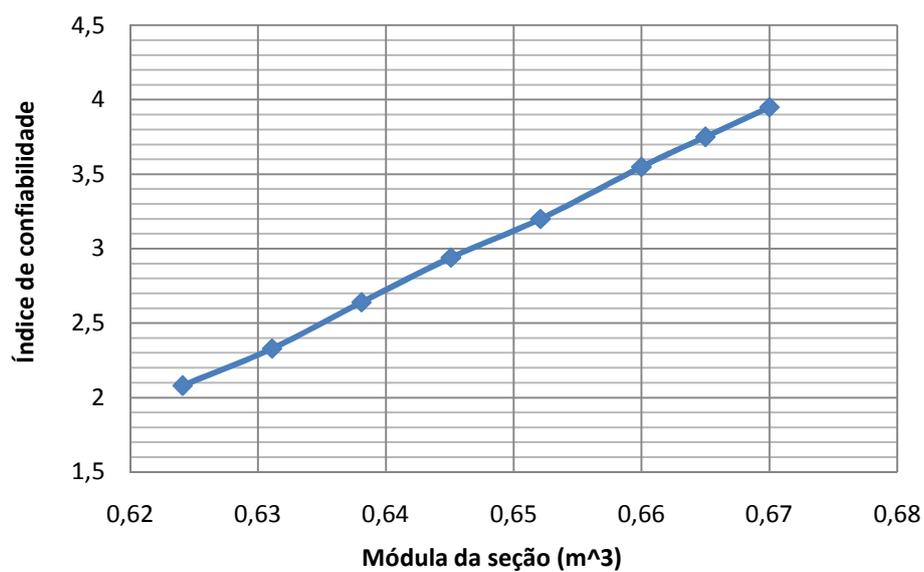


Figura 7-30 Variação do índice de confiabilidade em função do módulo da seção mestra

Mais uma vez a metodologia apresentada no capítulo 6 pode ser utilizada como uma ferramenta de análise estrutural, não só para prever o limite de carregamento, mas também para determinar o correto dimensionamento do navio, como foi apresentado nos casos de estudo dois e três, onde foram modificadas as espessuras da chapa de fundo, caso de estudo dois, e o módulo de seção mestra, caso de estudo três.

8 CONCLUSÕES

A análise de confiabilidade estrutural vem sendo desenvolvida na área naval desde a década de 80 e se mostra como uma ferramenta moderna e adequada para a avaliação de riscos de falha de estruturas, em projeto estrutural e em planejamento de inspeções de manutenção.

As regras de projeto determinísticas convencionais, adotadas pelas sociedades classificadoras, devem ser progressivamente desenvolvidas, levando-se em consideração as análises probabilísticas de solicitação e resistência.

O estabelecimento do índice de confiabilidade deve ser criteriosamente analisado e deve-se sempre procurar um valor reconhecido, atualizado e amplamente utilizado na área de projeto.

Os resultados do caso de estudo apresentam queda de confiabilidade lenta ao longo dos anos. Esta queda lenta faz com que a corrosão não seja alvo de preocupação dos donos das embarcações. Deve-se ter presente que a análise considerou uma taxa de corrosão baseada numa corrosão geral e uniforme do fundo do casco, apenas pela interação entre o casco e o meio ambiente. Na realidade, águas de esgoto corroem internamente o casco do fundo do navio, os escapes dos sistemas de refrigeração do navio geram corrosão localizada e a corrosão microbiológica nas descarregas dos esgotos fazem com que a queda da confiabilidade seja maior. O presente estudo desenvolveu uma metodologia para a análise, a longo tempo, da influência da corrosão geral e uniforme em função das ondas.

Os estudos de confiabilidade estrutural baseados em corrosão e fadiga deveriam considerar a probabilidade de gerar solicitações maiores que as resistências aleatórias em função das solicitações geradas pelas ondas de mar. O presente estudo tenta aumentar a exatidão na obtenção dos índices de confiabilidade, com a introdução de outro critério de análise estrutural.

A partir da análise desenvolvida, pode-se estudar as áreas do navio, afetadas com maiores solicitações, e variar a geometria estrutural, com o objetivo de elevar a confiabilidade apenas nas áreas necessárias, propiciando a otimização de custos.

A planilha desenvolvida para os cálculos do momento fletor demonstrou aproximar bem os resultados, sendo comparada com programas de uso comercial. Sendo prática para desenvolvimento de aprendizagem do aluno, devido a seu fácil desenvolvimento no programa de cálculo Microsoft Excel 2007, tal planilha permite ter uma visão global e profunda dos passos a seguir para a obtenção dos dados requeridos, como as tensões primárias, secundárias e terciárias.

A utilização de programas comerciais para a análise de cálculo estrutural é recomendada para ter maior exatidão, bem como otimizar o tempo de trabalho. O método desenvolvido no presente estudo admite qualquer tipo de “input” nos dados das solicitações e resistências, tendo em vista a sua simplicidade.

A utilização da Simulação Monte Carlo, oferece uma alternativa simples e precisa para a obtenção dos resultados entre funções de densidades não conhecidas. A utilização deste método e seu desenvolvimento no programa Excel permitem a compatível troca de dados entre a planilha e o método, sem dificuldade.

Os objetivos propostos para o presente trabalho foram desenvolvidos com sucesso, podendo-se desenvolver um método por meio do qual a confiabilidade estrutural de um navio, foi obtida em função das alturas de ondas e o tempo, apresentadas num gráfico de probabilidade de falha e índice de confiabilidade em função do tempo.

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

A definição da confiabilidade-alvo é bastante complexa e tem sido objeto de estudos na área de confiabilidade. Quanto maiores as variáveis aleatórias analisadas nos estudos de confiabilidade maior será a exatidão gerada nos resultados, o que permite a tomada de melhores decisões quanto ao investimento

inicial de construção, bem como quanto ao custo de manutenção, durante a vida de serviço da embarcação.

Uma pesquisa de índice de confiabilidade baseada na união dos métodos apresentados no estudo, junto com a análise de fadiga e a utilização de programas comerciais, para um navio real, seria o próximo passo a ser seguido para se fazer uma comparação entre as normativas existentes na construção naval.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, A. F. Projeto ótimo baseado em confiabilidade de pórticos planos de concreto armado. RJ: Tese de D. Sc. 2008.
- [2] American Bureau of Shipping (ABS). Regras para construção e classificação de navios de aço. U.S. 1979.
- [3] ANG, A.H.S. e TANG, W.H. Probability Concepts in Engineering Planning and Desing: Decision, Risk and Reliability. Vol. 2. [S.I.] John Wiley & Sons Inc. 1984. 574 p.
- [4] BATES, J.L. e WANLESS, I.J. Aspects of large passenger liner desing. Vol. 64. [S.I.] Transactions of the society of naval architecs and marine engineers. 1956. 317 p.
- [5] BELYAEV YK. Onthe number of exits acroos the boundary of region by a vector stochastic process. [S.I.] Theory Probab Appl. 1968, 4:13-320 p.
- [6] COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4^a ed. Revista e atualizada. [São Paulo] Editora Blucher. 2008. 672 p.
- [7] CRAMER, H. e LEADBETTER, MR. The moments of the number of crossing of a level by stationary normal process. [Stockholm] Stockholm University and Research Triangle Institute. 1965. 8 p.
- [8] CRUZ, C.H.B. & FRAGNITO, H.L. Guia para Física Experimental: Caderno de Laboratório, Gráficos e Errors. Campinas: IFGW, Unicamp, 1997. 33p.
- [9] DAIDOLA, J.C. e BASAR, N.S. Probabilistic structural analysis of ship hull longitudinal strenght. [New York] Rosenblatt and Son INC New York. 1980. 88 p.
- [10] FREITAS, E.S. Análise estrutural do Navio. [São Paulo] Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval. 1979. Paginação irregular.
- [11] FREITAS, E.S. Índice e tabelas, notas e gráficos para projetos. [S.I.] DEN. 1997.
- [12] FUSCO, P.B. Estruturas de Concreto: Fundamentos do projeto estrutural. São Paulo: Edusp/McGraw-Hill do Brasil; 1976. 298 p.
- [13] GENTIL, Vicente. Corrosão. Rio de Janeiro. Livros técnicos e científicos. 2011. 360 p.

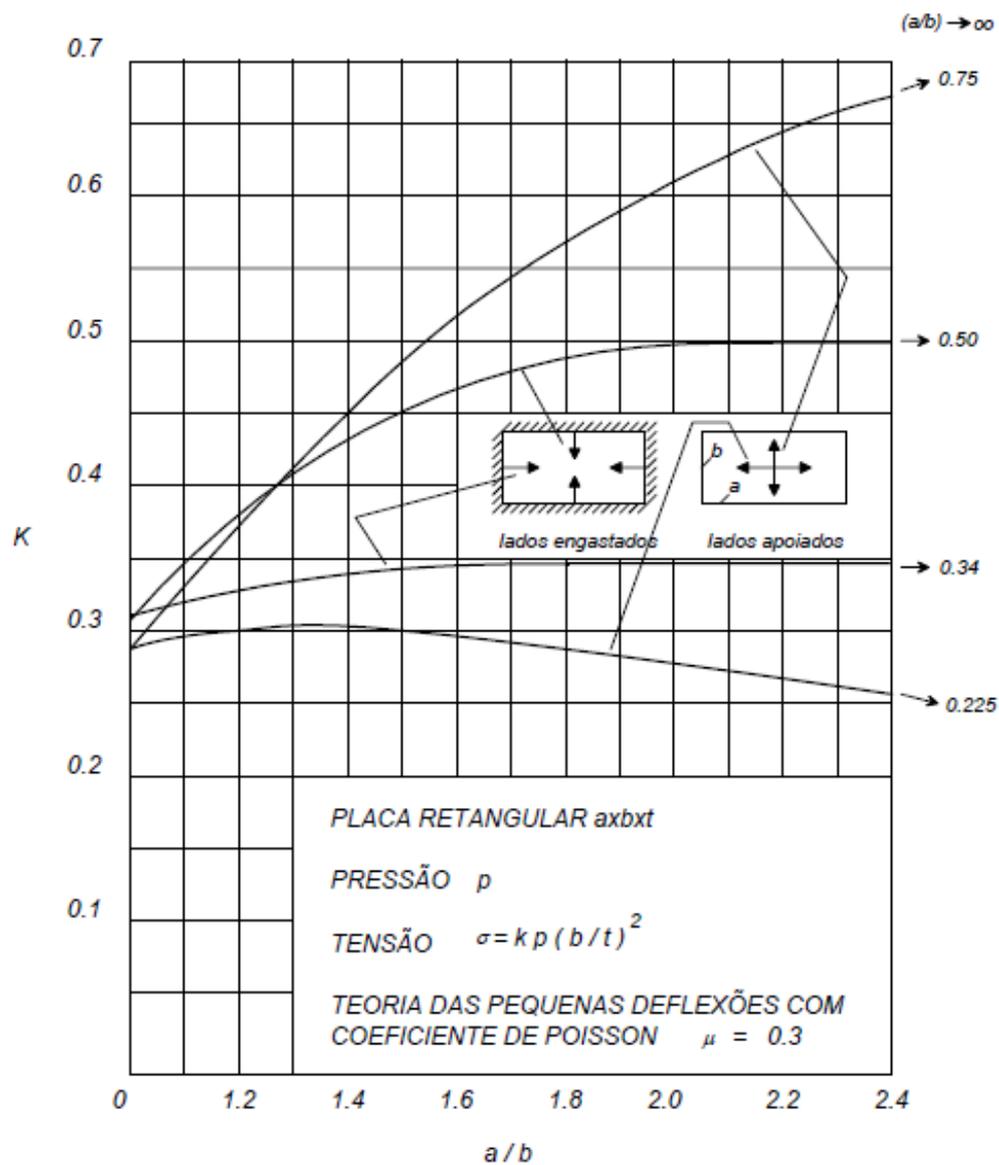
- [14] KARADENIZ, H. e VROUWENVELDER, T. Overview realibility methods. SAFERELNET, Task 5.1. TU-Delft, the Netherlands, Version April 2003. 81p.
- [15] LEE, J-C. e ANG, A. H-S. Finite Element Fracture Realiability of Stochastic Structures. [S.I.] Strutural Engineering and Mechanics. 1995. v. 3, n. 1, 1-10p.
- [16] LONGUET-HIGGINS, M.S. On the statistical distribution of the heights of sea wave. [S.I.] J. Marine Research. 1952. 11:245-2661 p.
- [17] MANSOUR, A. Assessment of reliability of ship structures. [S.I.] Ship Structure Committee. 1997. SSC-398 p.
- [18] MELCHERS, R. E. e CHICHESTER E.H. Structural reliability analysis and prediction.[S.I.] Distributed by John Wiley & Sons Ltd.1987. 398 p.
- [19] MIT. Course text desing of electromechanical robotic systems fall. [Massachusetts.] Mechanical engineering. 2009.
- [20] MODARRES, M.K.M. e KRIVTSOV V. Realiability engineering and risk analysis: A practical guide. 2nd ed. [U.S.] Taylor and Francis Group, LLC. 2013. 445 p.
- [21] MOTTA, L.A.C. & MALITE, M. Análise da segurança no projeto de estruturas: Métodos dos estados limites. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Caderno de Engenharia de Estruturas – Estruturas Metálicas, N 20, 2002, 32p.
- [22] MURRAY, J.M. Longitudinal strength of tankers. London: Lloyd's Register of Shipping.Trans. N.E.C. Inst.1958. 14 p.
- [23] Notas de aula Curso de Confiabilidade Estrutural. USP [São Carlos, SP] 2014.
- [24] Notas de aula PEF-5738. Ações e segurança das estruturas. [São Paulo] 2014.
- [25] Notas de aula PNV-5009. Fundamentos da mecânica de estrututras oceânicas. [São Paulo] 2014.
- [26] OCHI, M. K. Stochastic analisys and probabilistic prediction of random seas. New York. Advance in hydroscience, Academic Press. 1982. 13, 217-375 p.
- [27] PAIK, JK AND THAYAMBALLI AK, Reliability assesment of ships, In: Engineering desing reliability handbook, Chapter 39, CRC Press LLC, 2005.
- [28] RICE, S. O. Mathematical analysis of random noise. [U.S] Nell System Technical Journal. 1994. 46-156 p.

- [29] SAGRILLO, Luís Volnei Sudati. Análise de confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM. Rio de Janeiro. Tese – Universidade Federal de Rio de Janeiro. 1994. 142 p.
- [30] SARAIVA, J. M. F. A utilização de Redes Neurais em Conjunto com o Método de Monte Carlo na Análise da Confiabilidade de Estruturas. [R.J. Brasil] Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ. 1997. 159 p.
- [31] SCHNEIDER, J. Introduction to Safety and Reliability of Structures. Zurich: IABSE/AIPC/IVBH; 1997. 138p.
- [32] SHINOZUKA, M. Basic analysis of structural safety. New York. Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 3. 1983. 721-740 p.
- [33] SOARES, G. et al. Reliability based ship structural design. [S.I.] Trans. N.C.E. Inst. 1996. 89:104-375 p.
- [34] SOARES, G. et al. Reliability of ship hulls subjected to corrosion and maintenance. Lisboa. Centre for marine technology and engineering. 2013. 1-11 p.
- [35] STAMBAUGHT, K. e KRECHT, J.C. Corrosion experince requirements.. [S.I.] Ship Structure Committee. 1991.SSC-348 p.
- [36] SVERDRUP, H.U. e MUNK, W.H. Wind, sea and swell, theory of relations for forecasting. U.S. Navy Hydrographic Office. 1947.
- [37] TADA, Hiroshi *et al.* The stresses analysis of crack handbook. New York 3ra ediação. ASME Press. 2000. 677p.
- [38] TAYLOR, J.L. The theory of longitudinal bending of ships. [S.I.] Trans. N.E.C. Inst. 1964. 123 p.
- [39] TODT, Fritz. Corrosión y protección. Madrid. Aguilar. 1959. 1034 p.
- [40] WANG, G. Condition assesment of aged ships. Korea. 17th International Ship and Offshore Structure, ISSC Committee 6. 2009.
- [41] <http://www.ceerma.com/Arquivos/MateriaisDeAula/analise%20da%20confiabilidade%20de%20sistemas.pdf>
- [42] <http://www.epidemiologia.ufc.br/files/04DISTRIBUICAOONORMAL.pdf>

ANEXO A – FATOR DE FORMA K PARA TENSÃO LONGITUDINAL TERCIÁRIA

O presente anexo mostra a tabela para a obtenção do fator de forma k na equação da tensão longitudinal terciária, em função da geometria da chapa estudada.

Tabela A-1 – Tabela do fator de forma k



ANEXO B – TABELA DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Tabela B-1 – Tabela de índice de confiabilidade

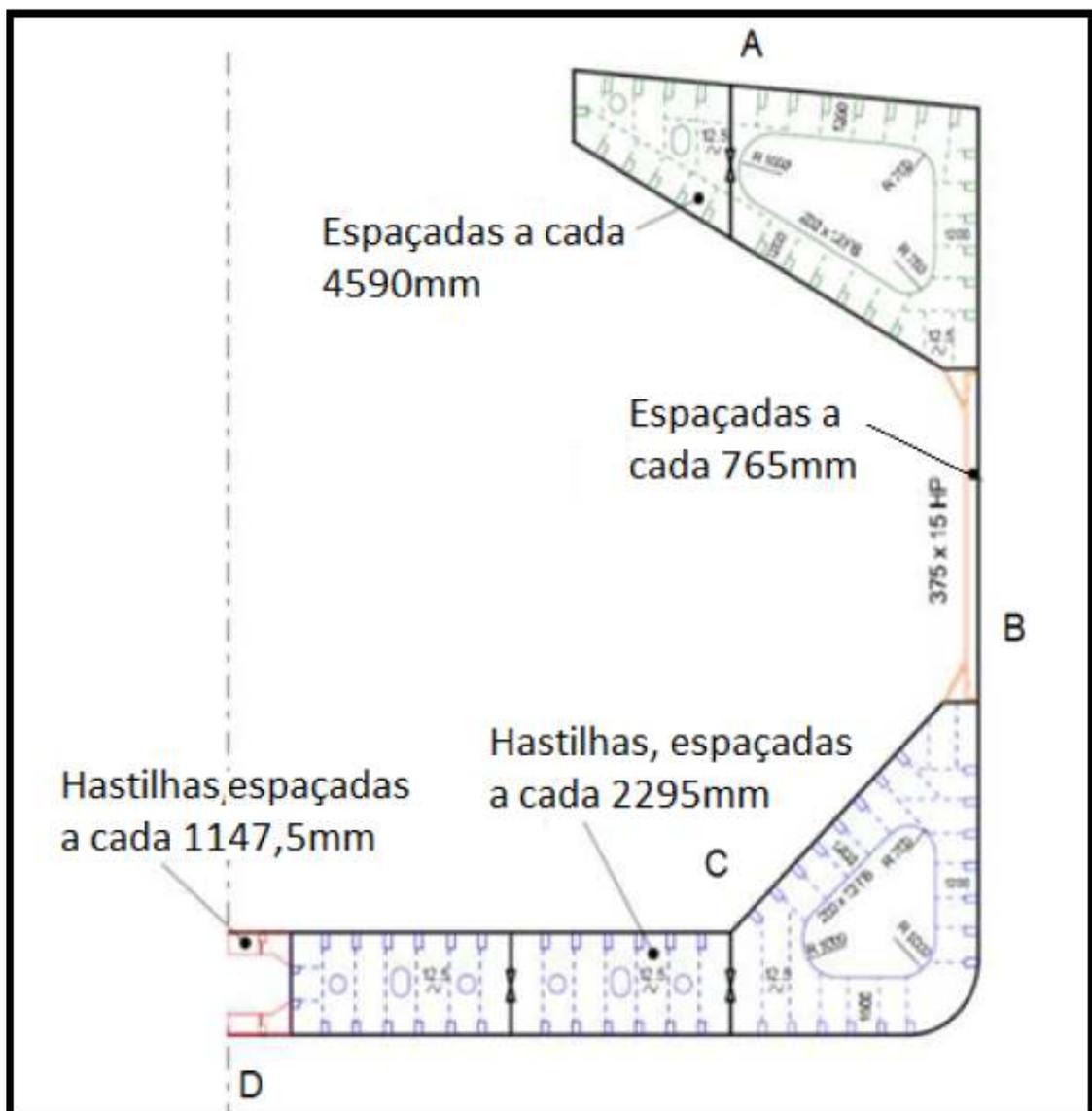
β	$\Phi(-\beta)$								
0.	5×10^{-1}	0.75	2.26627×10^{-1}	1.5	6.68072×10^{-2}	2.25	1.22245×10^{-2}	3.	1.3499×10^{-3}
0.01	4.96011×10^{-2}	0.76	2.23627×10^{-1}	1.51	6.55217×10^{-2}	2.26	1.19106×10^{-2}	3.01	1.30624×10^{-3}
0.02	4.82022×10^{-2}	0.77	2.20625×10^{-1}	1.52	6.42355×10^{-2}	2.27	1.16038×10^{-2}	3.02	1.26387×10^{-3}
0.03	4.68034×10^{-2}	0.78	2.17625×10^{-1}	1.53	6.30084×10^{-2}	2.28	1.13038×10^{-2}	3.03	1.22277×10^{-3}
0.04	4.54047×10^{-2}	0.79	2.14784×10^{-1}	1.54	6.17802×10^{-2}	2.29	1.10107×10^{-2}	3.04	1.18289×10^{-3}
0.05	4.40061×10^{-2}	0.8	2.11955×10^{-1}	1.55	6.05708×10^{-2}	2.3	1.07241×10^{-2}	3.05	1.14421×10^{-3}
0.06	4.26076×10^{-2}	0.81	2.0927×10^{-1}	1.56	5.93799×10^{-2}	2.31	1.04441×10^{-2}	3.06	1.10668×10^{-3}
0.07	4.12097×10^{-2}	0.82	2.06638×10^{-1}	1.57	5.82076×10^{-2}	2.32	1.01704×10^{-2}	3.07	1.07029×10^{-3}
0.08	4.00119×10^{-2}	0.83	2.03969×10^{-1}	1.58	5.70534×10^{-2}	2.33	9.90308×10^{-3}	3.08	1.035×10^{-3}
0.09	4.04144×10^{-2}	0.84	2.00454×10^{-1}	1.59	5.59174×10^{-2}	2.34	9.64387×10^{-3}	3.09	1.00079×10^{-3}
0.1	4.00172×10^{-2}	0.85	1.97883×10^{-1}	1.6	5.47993×10^{-2}	2.35	9.38671×10^{-3}	3.1	9.67603×10^{-4}
0.11	4.56205×10^{-2}	0.86	1.94985×10^{-1}	1.61	5.36989×10^{-2}	2.36	9.13747×10^{-3}	3.11	9.35437×10^{-4}
0.12	4.52242×10^{-2}	0.87	1.9215×10^{-1}	1.62	5.26161×10^{-2}	2.37	8.89404×10^{-3}	3.12	9.04255×10^{-4}
0.13	4.48283×10^{-2}	0.88	1.8943×10^{-1}	1.63	5.15507×10^{-2}	2.38	8.65632×10^{-3}	3.13	8.74032×10^{-4}
0.14	4.4433×10^{-2}	0.88	1.86733×10^{-1}	1.64	5.05036×10^{-2}	2.39	8.42418×10^{-3}	3.14	8.44739×10^{-4}
0.15	4.40382×10^{-2}	0.9	1.8406×10^{-1}	1.65	4.94715×10^{-2}	2.4	8.19754×10^{-3}	3.15	8.16352×10^{-4}
0.16	4.36441×10^{-2}	0.91	1.81411×10^{-1}	1.66	4.84572×10^{-2}	2.41	7.97626×10^{-3}	3.16	7.88846×10^{-4}
0.17	4.32505×10^{-2}	0.92	1.78786×10^{-1}	1.67	4.74597×10^{-2}	2.42	7.76029×10^{-3}	3.17	7.62195×10^{-4}
0.18	4.28576×10^{-2}	0.93	1.76188×10^{-1}	1.68	4.64787×10^{-2}	2.43	7.54941×10^{-3}	3.18	7.36375×10^{-4}
0.19	4.24658×10^{-2}	0.94	1.73609×10^{-1}	1.69	4.5514×10^{-2}	2.44	7.34363×10^{-3}	3.19	7.11364×10^{-4}
0.2	4.2074×10^{-2}	0.95	1.71036×10^{-1}	1.7	4.45655×10^{-2}	2.45	7.14281×10^{-3}	3.2	6.87138×10^{-4}
0.21	4.16834×10^{-2}	0.96	1.68528×10^{-1}	1.71	4.36329×10^{-2}	2.46	6.94685×10^{-3}	3.21	6.63675×10^{-4}
0.22	4.12936×10^{-2}	0.97	1.66023×10^{-1}	1.72	4.27162×10^{-2}	2.47	6.75565×10^{-3}	3.22	6.40953×10^{-4}
0.23	4.09046×10^{-2}	0.98	1.63543×10^{-1}	1.73	4.18151×10^{-2}	2.48	6.56812×10^{-3}	3.23	6.18951×10^{-4}
0.24	4.05165×10^{-2}	0.99	1.61087×10^{-1}	1.74	4.09295×10^{-2}	2.49	6.38115×10^{-3}	3.24	5.97648×10^{-4}
0.25	4.01294×10^{-2}	1.	1.58655×10^{-1}	1.75	4.00592×10^{-2}	2.5	6.20067×10^{-3}	3.25	5.77025×10^{-4}
0.26	3.97432×10^{-2}	1.01	1.56248×10^{-1}	1.76	3.92039×10^{-2}	2.51	6.02626×10^{-3}	3.26	5.57053×10^{-4}
0.27	3.9358×10^{-2}	1.02	1.53864×10^{-1}	1.77	3.83636×10^{-2}	2.52	5.86774×10^{-3}	3.27	5.37737×10^{-4}
0.28	3.89739×10^{-2}	1.03	1.51505×10^{-1}	1.78	3.7538×10^{-2}	2.53	5.70313×10^{-3}	3.28	5.19035×10^{-4}
0.29	3.85908×10^{-2}	1.04	1.4917×10^{-1}	1.79	3.6727×10^{-2}	2.54	5.54262×10^{-3}	3.29	5.00937×10^{-4}
0.3	3.82089×10^{-2}	1.05	1.46859×10^{-1}	1.8	3.59303×10^{-2}	2.55	5.38615×10^{-3}	3.3	4.83424×10^{-4}
0.31	3.7828×10^{-2}	1.06	1.44572×10^{-1}	1.81	3.51479×10^{-2}	2.56	5.23361×10^{-3}	3.31	4.6648×10^{-4}
0.32	3.74484×10^{-2}	1.07	1.4231×10^{-1}	1.82	3.43793×10^{-2}	2.57	5.08493×10^{-3}	3.32	4.50087×10^{-4}
0.33	3.707×10^{-2}	1.08	1.40071×10^{-1}	1.83	3.3625×10^{-2}	2.58	4.94002×10^{-3}	3.33	4.3423×10^{-4}
0.34	3.66928×10^{-2}	1.09	1.37857×10^{-1}	1.84	3.28844×10^{-2}	2.59	4.7998×10^{-3}	3.34	4.18892×10^{-4}
0.35	3.63169×10^{-2}	1.1	1.35668×10^{-1}	1.85	3.21568×10^{-2}	2.6	4.66118×10^{-3}	3.35	4.04058×10^{-4}
0.36	3.59424×10^{-2}	1.11	1.335×10^{-1}	1.86	3.14428×10^{-2}	2.61	4.52711×10^{-3}	3.36	3.89712×10^{-4}
0.37	3.55691×10^{-2}	1.12	1.31357×10^{-1}	1.87	3.07419×10^{-2}	2.62	4.39649×10^{-3}	3.37	3.75842×10^{-4}
0.38	3.51973×10^{-2}	1.13	1.29238×10^{-1}	1.88	3.0054×10^{-2}	2.63	4.26824×10^{-3}	3.38	3.62423×10^{-4}
0.39	3.48268×10^{-2}	1.14	1.27143×10^{-1}	1.89	2.9379×10^{-2}	2.64	4.1433×10^{-3}	3.39	3.49468×10^{-4}
0.4	3.44578×10^{-2}	1.15	1.25072×10^{-1}	1.9	2.87166×10^{-2}	2.65	4.02149×10^{-3}	3.4	3.36929×10^{-4}
0.41	3.40903×10^{-2}	1.16	1.23024×10^{-1}	1.91	2.80666×10^{-2}	2.66	3.90303×10^{-3}	3.41	3.24814×10^{-4}
0.42	3.37243×10^{-2}	1.17	1.21×10^{-1}	1.92	2.74289×10^{-2}	2.67	3.78854×10^{-3}	3.42	3.13106×10^{-4}
0.43	3.33598×10^{-2}	1.18	1.19×10^{-1}	1.93	2.68034×10^{-2}	2.68	3.68111×10^{-3}	3.43	3.01791×10^{-4}
0.44	3.29969×10^{-2}	1.19	1.17023×10^{-1}	1.94	2.61898×10^{-2}	2.69	3.57826×10^{-3}	3.44	2.90857×10^{-4}
0.45	3.26355×10^{-2}	1.2	1.1507×10^{-1}	1.95	2.55881×10^{-2}	2.7	3.46697×10^{-3}	3.45	2.80293×10^{-4}
0.46	3.22756×10^{-2}	1.21	1.13139×10^{-1}	1.96	2.49979×10^{-2}	2.71	3.36416×10^{-3}	3.46	2.70088×10^{-4}
0.47	3.19178×10^{-2}	1.22	1.11232×10^{-1}	1.97	2.44192×10^{-2}	2.72	3.2641×10^{-3}	3.47	2.60239×10^{-4}
0.48	3.15614×10^{-2}	1.23	1.09349×10^{-1}	1.98	2.38518×10^{-2}	2.73	3.16673×10^{-3}	3.48	2.50707×10^{-4}
0.49	3.12067×10^{-2}	1.24	1.07488×10^{-1}	1.99	2.32955×10^{-2}	2.74	3.07196×10^{-3}	3.49	2.4151×10^{-4}
0.5	3.08538×10^{-2}	1.25	1.0565×10^{-1}	2.	2.27503×10^{-2}	2.75	2.97976×10^{-3}	3.5	2.32628×10^{-4}
0.51	3.05026×10^{-2}	1.26	1.03835×10^{-1}	2.01	2.22166×10^{-2}	2.76	2.89007×10^{-3}	3.51	2.24052×10^{-4}
0.52	3.01532×10^{-2}	1.27	1.02043×10^{-1}	2.02	2.16917×10^{-2}	2.77	2.80381×10^{-3}	3.52	2.15773×10^{-4}
0.53	2.98056×10^{-2}	1.28	1.00273×10^{-1}	2.03	2.11788×10^{-2}	2.78	2.72194×10^{-3}	3.53	2.0778×10^{-4}
0.54	2.94599×10^{-2}	1.29	9.85283×10^{-2}	2.04	2.06782×10^{-2}	2.79	2.6354×10^{-3}	3.54	2.00064×10^{-4}
0.55	2.9116×10^{-2}	1.3	9.68005×10^{-2}	2.05	2.01822×10^{-2}	2.8	2.55513×10^{-3}	3.55	1.92616×10^{-4}
0.56	2.8774×10^{-2}	1.31	9.50979×10^{-2}	2.06	1.96993×10^{-2}	2.81	2.47707×10^{-3}	3.56	1.85427×10^{-4}
0.57	2.84339×10^{-2}	1.32	9.34175×10^{-2}	2.07	1.92262×10^{-2}	2.82	2.40118×10^{-3}	3.57	1.78493×10^{-4}
0.58	2.80957×10^{-2}	1.33	9.17591×10^{-2}	2.08	1.87628×10^{-2}	2.83	2.3274×10^{-3}	3.58	1.71797×10^{-4}
0.59	2.77595×10^{-2}	1.34	9.01227×10^{-2}	2.09	1.83089×10^{-2}	2.84	2.25668×10^{-3}	3.59	1.65339×10^{-4}
0.6	2.74251×10^{-2}	1.35	8.8508×10^{-2}	2.1	1.78644×10^{-2}	2.85	2.18896×10^{-3}	3.6	1.59109×10^{-4}
0.61	2.70931×10^{-2}	1.36	8.6915×10^{-2}	2.11	1.74292×10^{-2}	2.86	2.12821×10^{-3}	3.61	1.53099×10^{-4}
0.62	2.67629×10^{-2}	1.37	8.53435×10^{-2}	2.12	1.7003×10^{-2}	2.87	2.06336×10^{-3}	3.62	1.47302×10^{-4}
0.63	2.64347×10^{-2}	1.38	8.37933×10^{-2}	2.13	1.65859×10^{-2}	2.88	1.99838×10^{-3}	3.63	1.41713×10^{-4}
0.64	2.61086×10^{-2}	1.39	8.22644×10^{-2}	2.14	1.61774×10^{-2}	2.89	1.93621×10^{-3}	3.64	1.36319×10^{-4}
0.65	2.57846×10^{-2}	1.4	8.07567×10^{-2}	2.15	1.57776×10^{-2}	2.9	1.86681×10^{-3}	3.65	1.3112×10^{-4}
0.66	2.54627×10^{-2}	1.41	7.92688×10^{-2}	2.16	1.53863×10^{-2}	2.91	1.80714×10^{-3}	3.66	1.26108×10^{-4}
0.67	2.51429×10^{-2}	1.42	7.78038×10^{-2}	2.17	1.50034×10^{-2}	2.92	1.75016×10^{-3}	3.67	1.21275×10^{-4}
0.68	2.48252×10^{-2}	1.43	7.63585×10^{-2}	2.18	1.46287×10^{-2}	2.93	1.69481×10^{-3}	3.68	1.16617×10^{-4}
0.69	2.45097×10^{-2}	1.44	7.49337×10^{-2}	2.19	1.42623×10^{-2}	2.94	1.64106×10^{-3}	3.69	1.12127×10^{-4}
0.7	2.41964×10^{-2}	1.45	7.35293×10^{-2}	2.2	1.39034×10^{-2}	2.95	1.58887×10^{-3}	3.7	1.078×10^{-4}
0.71	2.38852×10^{-2}	1.46	7.2145×10^{-2}	2.21	1.35526×10^{-2}	2.96	1.5382×10^{-3}	3.71	1.0362×10^{-4}
0.72	2.35762×10^{-2}	1.47	7.07809×10^{-2}	2.22	1.32094×10^{-2}	2.97	1.489×10^{-3}	3.72	9.96114×10^{-5}
0.73	2.32695×10^{-2}	1.48	6.94366×10^{-2}	2.23	1.28737×10^{-2}	2.98			

β	$\Phi(-\beta)$								
3.75	8.64173 × 10 ⁻⁸	4.5	3.39767 × 10 ⁻⁷	5.25	1.40496 × 10 ⁻⁶	6.	8.86588 × 10 ⁻⁷	6.75	7.38225 × 10 ⁻⁷
3.76	8.49267 × 10 ⁻⁸	4.51	3.24138 × 10 ⁻⁷	5.26	1.20277 × 10 ⁻⁶	6.01	8.27617 × 10 ⁻⁷	6.76	6.89959 × 10 ⁻⁷
3.77	8.34338 × 10 ⁻⁸	4.52	3.09198 × 10 ⁻⁷	5.27	6.82119 × 10 ⁻⁷	6.02	8.12085 × 10 ⁻⁷	6.77	6.43913 × 10 ⁻⁷
3.78	7.84142 × 10 ⁻⁸	4.53	2.94818 × 10 ⁻⁷	5.28	6.45919 × 10 ⁻⁷	6.03	8.19798 × 10 ⁻⁷	6.78	6.0088 × 10 ⁻⁷
3.79	7.53236 × 10 ⁻⁸	4.54	2.81271 × 10 ⁻⁷	5.29	6.11582 × 10 ⁻⁷	6.04	7.79571 × 10 ⁻⁷	6.79	5.60648 × 10 ⁻⁷
3.8	7.2348 × 10 ⁻⁸	4.55	2.6833 × 10 ⁻⁷	5.3	5.79013 × 10 ⁻⁷	6.05	7.24229 × 10 ⁻⁷	6.8	5.23098 × 10 ⁻⁷
3.81	6.94834 × 10 ⁻⁸	4.56	2.55788 × 10 ⁻⁷	5.31	5.48126 × 10 ⁻⁷	6.06	6.80608 × 10 ⁻⁷	6.81	4.87993 × 10 ⁻⁷
3.82	6.67258 × 10 ⁻⁸	4.57	2.43862 × 10 ⁻⁷	5.32	5.19836 × 10 ⁻⁷	6.07	6.39551 × 10 ⁻⁷	6.82	4.55203 × 10 ⁻⁷
3.83	6.40716 × 10 ⁻⁸	4.58	2.32488 × 10 ⁻⁷	5.33	4.93164 × 10 ⁻⁷	6.08	6.00813 × 10 ⁻⁷	6.83	4.24571 × 10 ⁻⁷
3.84	6.15172 × 10 ⁻⁸	4.59	2.21623 × 10 ⁻⁷	5.34	4.67473 × 10 ⁻⁷	6.09	5.64553 × 10 ⁻⁷	6.84	3.95947 × 10 ⁻⁷
3.85	5.90589 × 10 ⁻⁸	4.6	2.11245 × 10 ⁻⁷	5.35	4.39771 × 10 ⁻⁷	6.1	5.30342 × 10 ⁻⁷	6.85	3.69249 × 10 ⁻⁷
3.86	5.66935 × 10 ⁻⁸	4.61	2.01334 × 10 ⁻⁷	5.36	4.1411 × 10 ⁻⁷	6.11	4.98156 × 10 ⁻⁷	6.86	3.44302 × 10 ⁻⁷
3.87	5.44177 × 10 ⁻⁸	4.62	1.9187 × 10 ⁻⁷	5.37	3.93683 × 10 ⁻⁷	6.12	4.67877 × 10 ⁻⁷	6.87	3.2101 × 10 ⁻⁷
3.88	5.22282 × 10 ⁻⁸	4.63	1.82833 × 10 ⁻⁷	5.38	3.72429 × 10 ⁻⁷	6.13	4.39385 × 10 ⁻⁷	6.88	2.99261 × 10 ⁻⁷
3.89	5.01221 × 10 ⁻⁸	4.64	1.74205 × 10 ⁻⁷	5.39	3.52288 × 10 ⁻⁷	6.14	4.12607 × 10 ⁻⁷	6.89	2.7894 × 10 ⁻⁷
3.9	4.80963 × 10 ⁻⁸	4.65	1.65868 × 10 ⁻⁷	5.4	3.33204 × 10 ⁻⁷	6.15	3.87415 × 10 ⁻⁷	6.9	2.60014 × 10 ⁻⁷
3.91	4.61481 × 10 ⁻⁸	4.66	1.58105 × 10 ⁻⁷	5.41	3.15124 × 10 ⁻⁷	6.16	3.63725 × 10 ⁻⁷	6.91	2.42328 × 10 ⁻⁷
3.92	4.42745 × 10 ⁻⁸	4.67	1.508 × 10 ⁻⁷	5.42	2.97988 × 10 ⁻⁷	6.17	3.4145 × 10 ⁻⁷	6.92	2.25819 × 10 ⁻⁷
3.93	4.24729 × 10 ⁻⁸	4.68	1.43437 × 10 ⁻⁷	5.43	2.8177 × 10 ⁻⁷	6.18	3.20508 × 10 ⁻⁷	6.93	2.10421 × 10 ⁻⁷
3.94	4.07408 × 10 ⁻⁸	4.69	1.36603 × 10 ⁻⁷	5.44	2.66403 × 10 ⁻⁷	6.19	3.00621 × 10 ⁻⁷	6.94	1.96049 × 10 ⁻⁷
3.95	3.90756 × 10 ⁻⁸	4.7	1.30081 × 10 ⁻⁷	5.45	2.51849 × 10 ⁻⁷	6.2	2.82316 × 10 ⁻⁷	6.95	1.82843 × 10 ⁻⁷
3.96	3.74749 × 10 ⁻⁸	4.71	1.23858 × 10 ⁻⁷	5.46	2.38067 × 10 ⁻⁷	6.21	2.64923 × 10 ⁻⁷	6.96	1.70136 × 10 ⁻⁷
3.97	3.59363 × 10 ⁻⁸	4.72	1.17822 × 10 ⁻⁷	5.47	2.25018 × 10 ⁻⁷	6.22	2.48277 × 10 ⁻⁷	6.97	1.58473 × 10 ⁻⁷
3.98	3.44276 × 10 ⁻⁸	4.73	1.1206 × 10 ⁻⁷	5.48	2.1266 × 10 ⁻⁷	6.23	2.33218 × 10 ⁻⁷	6.98	1.47387 × 10 ⁻⁷
3.99	3.30366 × 10 ⁻⁸	4.74	1.06529 × 10 ⁻⁷	5.49	2.00967 × 10 ⁻⁷	6.24	2.18785 × 10 ⁻⁷	6.99	1.37446 × 10 ⁻⁷
4.	3.16712 × 10 ⁻⁸	4.75	1.01308 × 10 ⁻⁷	5.5	1.89896 × 10 ⁻⁷	6.25	2.05226 × 10 ⁻⁷	7.	1.27981 × 10 ⁻⁷
4.01	3.03594 × 10 ⁻⁸	4.76	9.67965 × 10 ⁻⁸	5.51	1.79417 × 10 ⁻⁷	6.26	1.92488 × 10 ⁻⁷	7.01	1.1914 × 10 ⁻⁷
4.02	2.90991 × 10 ⁻⁸	4.77	9.2113 × 10 ⁻⁸	5.52	1.695 × 10 ⁻⁷	6.27	1.80324 × 10 ⁻⁷	7.02	1.10933 × 10 ⁻⁷
4.03	2.78884 × 10 ⁻⁸	4.78	8.76476 × 10 ⁻⁸	5.53	1.60115 × 10 ⁻⁷	6.28	1.68287 × 10 ⁻⁷	7.03	1.03267 × 10 ⁻⁷
4.04	2.67256 × 10 ⁻⁸	4.79	8.33967 × 10 ⁻⁸	5.54	1.51236 × 10 ⁻⁷	6.29	1.56733 × 10 ⁻⁷	7.04	9.61176 × 10 ⁻⁸
4.05	2.56088 × 10 ⁻⁸	4.8	7.93328 × 10 ⁻⁸	5.55	1.42838 × 10 ⁻⁷	6.3	1.45823 × 10 ⁻⁷	7.05	8.94562 × 10 ⁻⁸
4.06	2.45364 × 10 ⁻⁸	4.81	7.54621 × 10 ⁻⁸	5.56	1.34887 × 10 ⁻⁷	6.31	1.35518 × 10 ⁻⁷	7.06	8.32501 × 10 ⁻⁸
4.07	2.35066 × 10 ⁻⁸	4.82	7.17791 × 10 ⁻⁸	5.57	1.2737 × 10 ⁻⁷	6.32	1.25782 × 10 ⁻⁷	7.07	7.74658 × 10 ⁻⁸
4.08	2.25179 × 10 ⁻⁸	4.83	6.82665 × 10 ⁻⁸	5.58	1.20259 × 10 ⁻⁷	6.33	1.22581 × 10 ⁻⁷	7.08	7.20757 × 10 ⁻⁸
4.09	2.15687 × 10 ⁻⁸	4.84	6.49196 × 10 ⁻⁸	5.59	1.13535 × 10 ⁻⁷	6.34	1.14883 × 10 ⁻⁷	7.09	6.70875 × 10 ⁻⁸
4.1	2.06575 × 10 ⁻⁸	4.85	6.17307 × 10 ⁻⁸	5.6	1.07176 × 10 ⁻⁷	6.35	1.07627 × 10 ⁻⁷	7.1	6.23779 × 10 ⁻⁸
4.11	1.9783 × 10 ⁻⁸	4.86	5.86929 × 10 ⁻⁸	5.61	1.01163 × 10 ⁻⁷	6.36	1.00977 × 10 ⁻⁷	7.11	5.80003 × 10 ⁻⁸
4.12	1.89436 × 10 ⁻⁸	4.87	5.57991 × 10 ⁻⁸	5.62	9.54957 × 10 ⁻⁸	6.37	9.45241 × 10 ⁻⁸	7.12	5.38624 × 10 ⁻⁸
4.13	1.81382 × 10 ⁻⁸	4.88	5.30429 × 10 ⁻⁸	5.63	9.01048 × 10 ⁻⁸	6.38	8.8544 × 10 ⁻⁸	7.13	5.01821 × 10 ⁻⁸
4.14	1.73563 × 10 ⁻⁸	4.89	5.0428 × 10 ⁻⁸	5.64	8.50251 × 10 ⁻⁸	6.39	8.29429 × 10 ⁻⁸	7.14	4.68682 × 10 ⁻⁸
4.15	1.66238 × 10 ⁻⁸	4.9	4.79283 × 10 ⁻⁸	5.65	8.02239 × 10 ⁻⁸	6.4	7.76885 × 10 ⁻⁸	7.15	4.38775 × 10 ⁻⁸
4.16	1.59124 × 10 ⁻⁸	4.91	4.55382 × 10 ⁻⁸	5.66	7.56865 × 10 ⁻⁸	6.41	7.27588 × 10 ⁻⁸	7.16	4.1034 × 10 ⁻⁸
4.17	1.522 × 10 ⁻⁸	4.92	4.32721 × 10 ⁻⁸	5.67	7.13888 × 10 ⁻⁸	6.42	6.81372 × 10 ⁻⁸	7.17	3.74978 × 10 ⁻⁸
4.18	1.45755 × 10 ⁻⁸	4.93	4.11148 × 10 ⁻⁸	5.68	6.73474 × 10 ⁻⁸	6.43	6.3802 × 10 ⁻⁸	7.18	3.46555 × 10 ⁻⁸
4.19	1.39477 × 10 ⁻⁸	4.94	3.90613 × 10 ⁻⁸	5.69	6.35197 × 10 ⁻⁸	6.44	5.97388 × 10 ⁻⁸	7.19	3.23943 × 10 ⁻⁸
4.2	1.33457 × 10 ⁻⁸	4.95	3.71067 × 10 ⁻⁸	5.7	5.99027 × 10 ⁻⁸	6.45	5.59251 × 10 ⁻⁸	7.2	3.05037 × 10 ⁻⁸
4.21	1.27688 × 10 ⁻⁸	4.96	3.52466 × 10 ⁻⁸	5.71	5.64881 × 10 ⁻⁸	6.46	5.23515 × 10 ⁻⁸	7.21	2.79776 × 10 ⁻⁸
4.22	1.22151 × 10 ⁻⁸	4.97	3.34785 × 10 ⁻⁸	5.72	5.3262 × 10 ⁻⁸	6.47	4.90015 × 10 ⁻⁸	7.22	2.58959 × 10 ⁻⁸
4.23	1.16846 × 10 ⁻⁸	4.98	3.17921 × 10 ⁻⁸	5.73	5.02153 × 10 ⁻⁸	6.48	4.58613 × 10 ⁻⁸	7.23	2.41474 × 10 ⁻⁸
4.24	1.11716 × 10 ⁻⁸	4.99	3.01896 × 10 ⁻⁸	5.74	4.73383 × 10 ⁻⁸	6.49	4.29182 × 10 ⁻⁸	7.24	2.24321 × 10 ⁻⁸
4.25	1.06885 × 10 ⁻⁸	5.	2.86652 × 10 ⁻⁸	5.75	4.46217 × 10 ⁻⁸	6.5	4.016 × 10 ⁻⁸	7.25	2.08389 × 10 ⁻⁸
4.26	1.02213 × 10 ⁻⁸	5.01	2.7215 × 10 ⁻⁸	5.76	4.2057 × 10 ⁻⁸	6.51	3.75754 × 10 ⁻⁸	7.26	1.93567 × 10 ⁻⁸
4.27	9.77365 × 10 ⁻⁹	5.02	2.58357 × 10 ⁻⁸	5.77	3.96358 × 10 ⁻⁸	6.52	3.51537 × 10 ⁻⁸	7.27	1.79745 × 10 ⁻⁸
4.28	9.34467 × 10 ⁻⁹	5.03	2.4524 × 10 ⁻⁸	5.78	3.73503 × 10 ⁻⁸	6.53	3.28849 × 10 ⁻⁸	7.28	1.66922 × 10 ⁻⁸
4.29	8.93366 × 10 ⁻⁹	5.04	2.32766 × 10 ⁻⁸	5.79	3.51932 × 10 ⁻⁸	6.54	3.07584 × 10 ⁻⁸	7.29	1.54987 × 10 ⁻⁸
4.3	8.53991 × 10 ⁻⁹	5.05	2.20905 × 10 ⁻⁸	5.8	3.31578 × 10 ⁻⁸	6.55	2.87685 × 10 ⁻⁸	7.3	1.43885 × 10 ⁻⁸
4.31	8.16273 × 10 ⁻⁹	5.06	2.09628 × 10 ⁻⁸	5.81	3.12364 × 10 ⁻⁸	6.56	2.69008 × 10 ⁻⁸	7.31	1.3358 × 10 ⁻⁸
4.32	7.80146 × 10 ⁻⁹	5.07	1.98928 × 10 ⁻⁸	5.82	2.94238 × 10 ⁻⁸	6.57	2.51577 × 10 ⁻⁸	7.32	1.24012 × 10 ⁻⁸
4.33	7.45547 × 10 ⁻⁹	5.08	1.88717 × 10 ⁻⁸	5.83	2.77137 × 10 ⁻⁸	6.58	2.35224 × 10 ⁻⁸	7.33	1.15075 × 10 ⁻⁸
4.34	7.12414 × 10 ⁻⁹	5.09	1.79032 × 10 ⁻⁸	5.84	2.61004 × 10 ⁻⁸	6.59	2.19914 × 10 ⁻⁸	7.34	1.06803 × 10 ⁻⁸
4.35	6.80688 × 10 ⁻⁹	5.1	1.69827 × 10 ⁻⁸	5.85	2.45787 × 10 ⁻⁸	6.6	2.05579 × 10 ⁻⁸	7.35	9.90074 × 10 ⁻⁹
4.36	6.50312 × 10 ⁻⁹	5.11	1.61079 × 10 ⁻⁸	5.86	2.31434 × 10 ⁻⁸	6.61	1.9216 × 10 ⁻⁸	7.36	9.1882 × 10 ⁻⁹
4.37	6.21223 × 10 ⁻⁹	5.12	1.52768 × 10 ⁻⁸	5.87	2.17898 × 10 ⁻⁸	6.62	1.796 × 10 ⁻⁸	7.37	8.53206 × 10 ⁻⁹
4.38	5.93397 × 10 ⁻⁹	5.13	1.44871 × 10 ⁻⁸	5.88	2.05133 × 10 ⁻⁸	6.63	1.67844 × 10 ⁻⁸	7.38	7.91589 × 10 ⁻⁹
4.39	5.66753 × 10 ⁻⁹	5.14	1.37368 × 10 ⁻⁸	5.89	1.93098 × 10 ⁻⁸	6.64	1.56842 × 10 ⁻⁸	7.39	7.34413 × 10 ⁻⁹
4.4	5.41254 × 10 ⁻⁹	5.15	1.30243 × 10 ⁻⁸	5.9	1.81751 × 10 ⁻⁸	6.65	1.46547 × 10 ⁻⁸	7.4	6.81122 × 10 ⁻⁹
4.41	5.16853 × 10 ⁻⁹	5.16	1.23475 × 10 ⁻⁸	5.91	1.71054 × 10 ⁻⁸	6.66	1.36914 × 10 ⁻⁸	7.41	6.3717 × 10 ⁻⁹
4.42	4.93505 × 10 ⁻⁹	5.17	1.17047 × 10 ⁻⁸	5.92	1.60971 × 10 ⁻⁸	6.67	1.27902 × 10 ⁻⁸	7.42	5.9843 × 10 ⁻⁹
4.43	4.71165 × 10 ⁻⁹	5.18	1.10943 × 10 ⁻⁸	5.93	1.51467 × 10 ⁻⁸	6.68	1.19471 × 10 ⁻⁸	7.43	5.62899 × 10 ⁻⁹
4.44	4.49794 × 10 ⁻⁹	5.19	1.05347 × 10 ⁻⁸	5.94	1.42511 × 10 ⁻⁸	6.69	1.11583 × 10 ⁻⁸	7.44	5.29486 × 10 ⁻⁹
4.45	4.29351 × 10 ⁻⁹	5.2	9.96443 × 10 ⁻⁹	5.95	1.34071 × 10 ⁻⁸	6.7	1.0421 × 10 ⁻⁸	7.45	4.96849 × 10 ⁻⁹
4.46	4.09798 × 10 ⁻⁹	5.21	9.44203 × 10 ⁻⁹	5.96	1.26119 × 10 ⁻⁸	6.71	9.7322 × 10 ⁻⁹	7.46	4.65432 × 10 ⁻⁹
4.47	3.91098 × 10 ⁻⁹	5.22	8.94616 × 10 ⁻⁹	5.97	1.18627 × 10 ⁻⁸	6.72	9.08623 × 10 ⁻⁹	7.47	4.35071 × 10 ⁻⁹
4.48	3.73215 × 10 ⁻⁹	5.23	8.4755 × 10 ⁻⁹	5.98	1.11569 × 10 ⁻⁸	6.73	8.48316 × 10 ⁻⁹	7.48	3.7137 × 10 ⁻⁹
4.49	3.56116 × 10 ⁻⁹	5.24	8.03893 × 10 ⁻⁹	5.99	1.04821 × 10 ⁻⁸	6.74	7.91933 × 10 ⁻⁹	7.49	3.44169 × 10 ⁻⁹

ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO NAVIO ESTUDADO

O presente anexo mostra a distribuição dos elementos estruturais, tais como, cavernas, hastilhas, quilhas, entre outros, ao longo do comprimento do navio, foco do estudo. Para o presente estudo, foi utilizada uma geometria uniforme de elementos estruturais, com o objetivo de facilitar a análise de dados[25].

Figura C-1 – Distribuição de elementos estruturais ao longo do navio



ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO DOS CARREGAMENTOS NO NAVIO ESTUDADO

O presente anexo mostra um detalhe do carregamento interno do navio estudado. Com o objetivo de facilitar o estudo, os tanques do navio petroleiro contêm derivados do petróleo com uma densidade igual à de água (1 Ton/m³)

Observa-se na tabela D-1 do presente anexo que se tem dois tipos de tanques, quais sejam: tanques de lastre e tanques de carregamento. Os tanques de lastre foram cheios totalmente, os tanques de carregamento foram cheios até uma altura determinada (6,35m), com o objetivo de obter uma tensão longitudinal total máxima na condição de tosameto, menor que a resistência do aço estrutural naval.

Tabela D-1 – Distribuição dos carregamentos

Tanques	Tanque de Lastre					Tanque de combustível					Total (Ton)
	comprimento (m)	boca (m)	H água (m)	volumen (m ³)	peso (Ton)	comprimento (m)	boca (m)	puntal (m)	volumen (m ³)	peso (Ton)	
1	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977
2	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977
3	25,245	43	2,64	2865,8124	2865,8124	25,245	21,5	6,354224	3448,866275	3448,866275	6314,678675
4	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977
5	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977
6	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977
7	25,245	43	2,64	2865,8124	2865,8124	25,245	21,5	6,354224	3448,866275	3448,866275	6314,678675
8	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977
9	22,95	43	2,64	2605,284	2605,284	22,95	21,5	6,354224	3135,332977	3135,332977	5740,616977

ANEXO E – CARREGAMENTOS , FORÇAS CORTANTES E MOMENTOS FLETORES

O presente anexo mostra os gráficos de carregamentos, forças cortantes e momentos fletores nas condições de mar calmo, alquebramento e tosamento, segundo a teoria de viga-navio, a fim de obter a tensão longitudinal primária.

Figura E-1 –Carregamentos

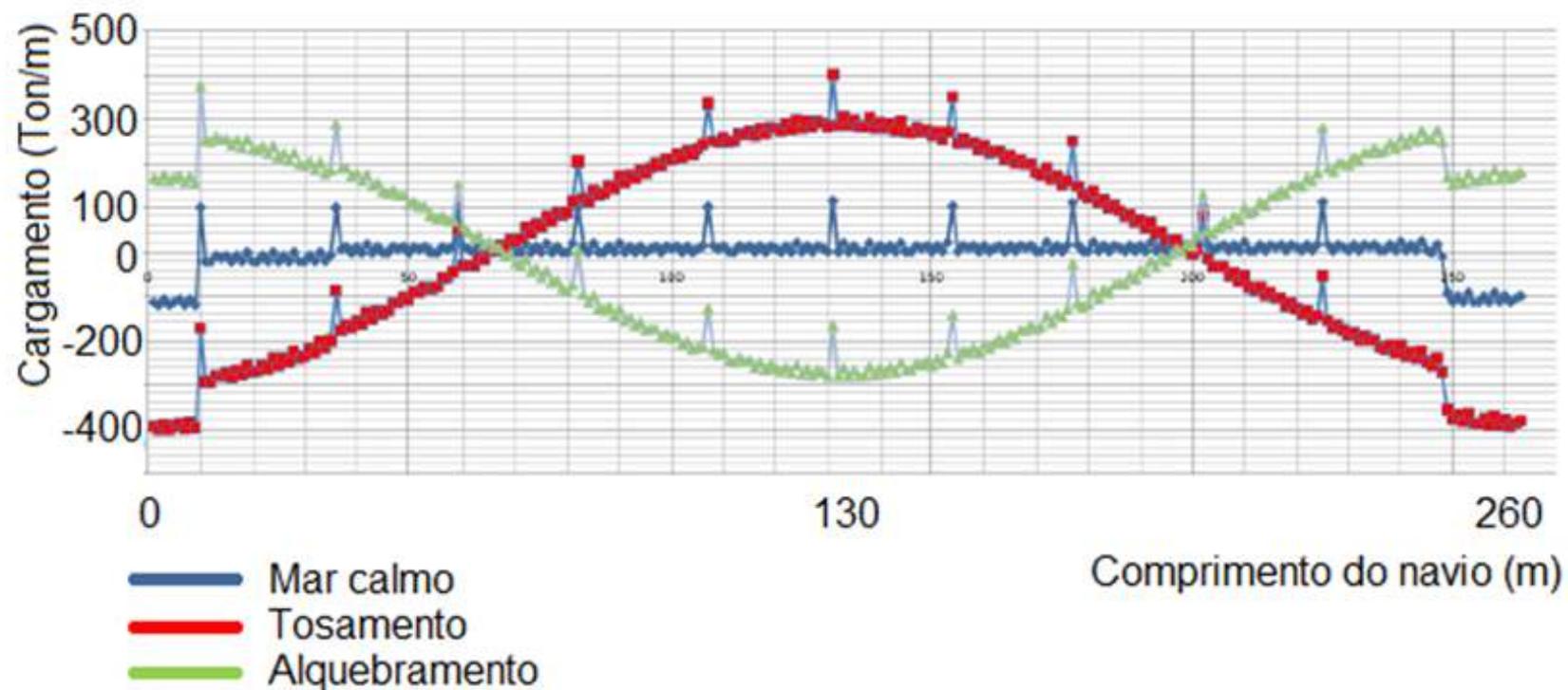


Figura E-2 – Força cortante

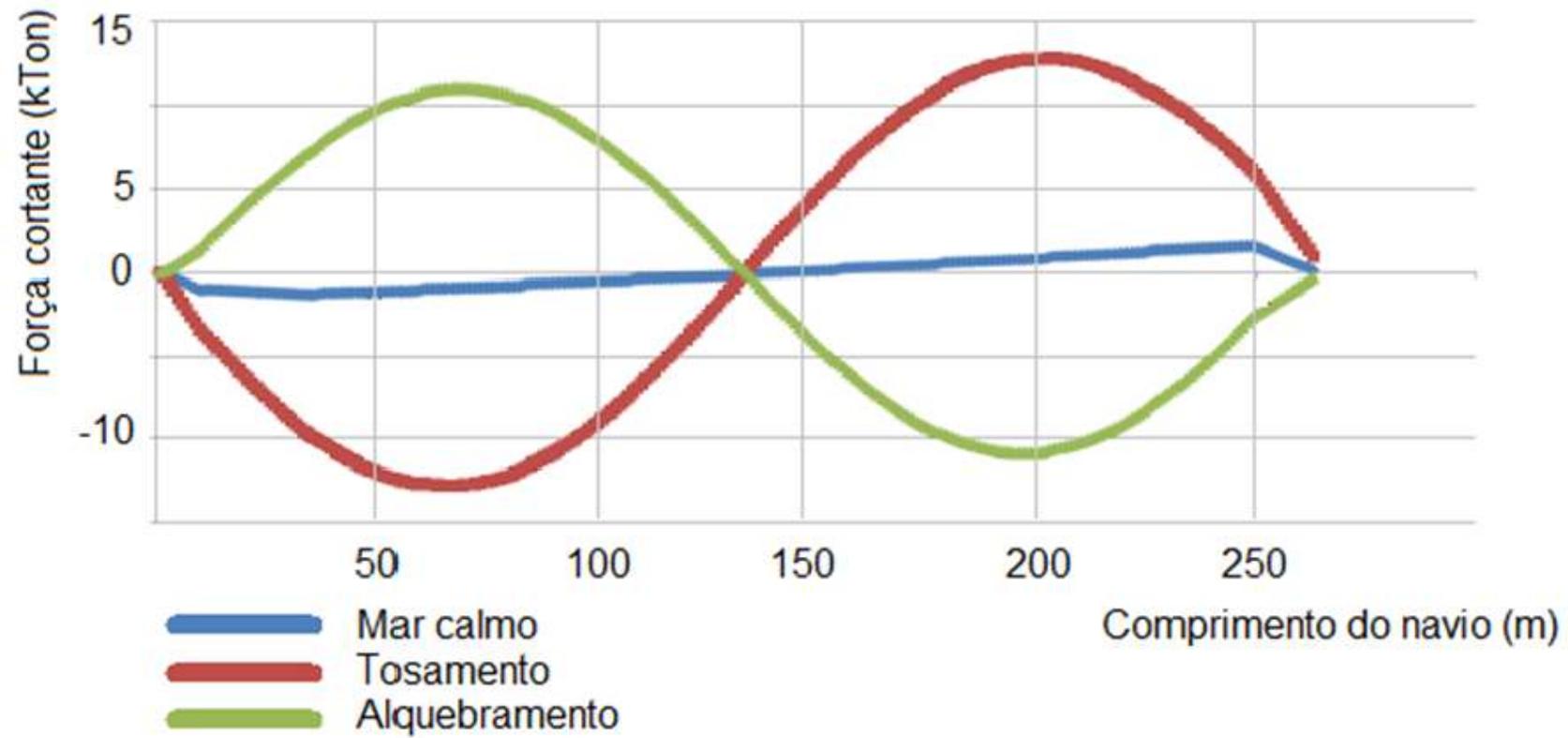
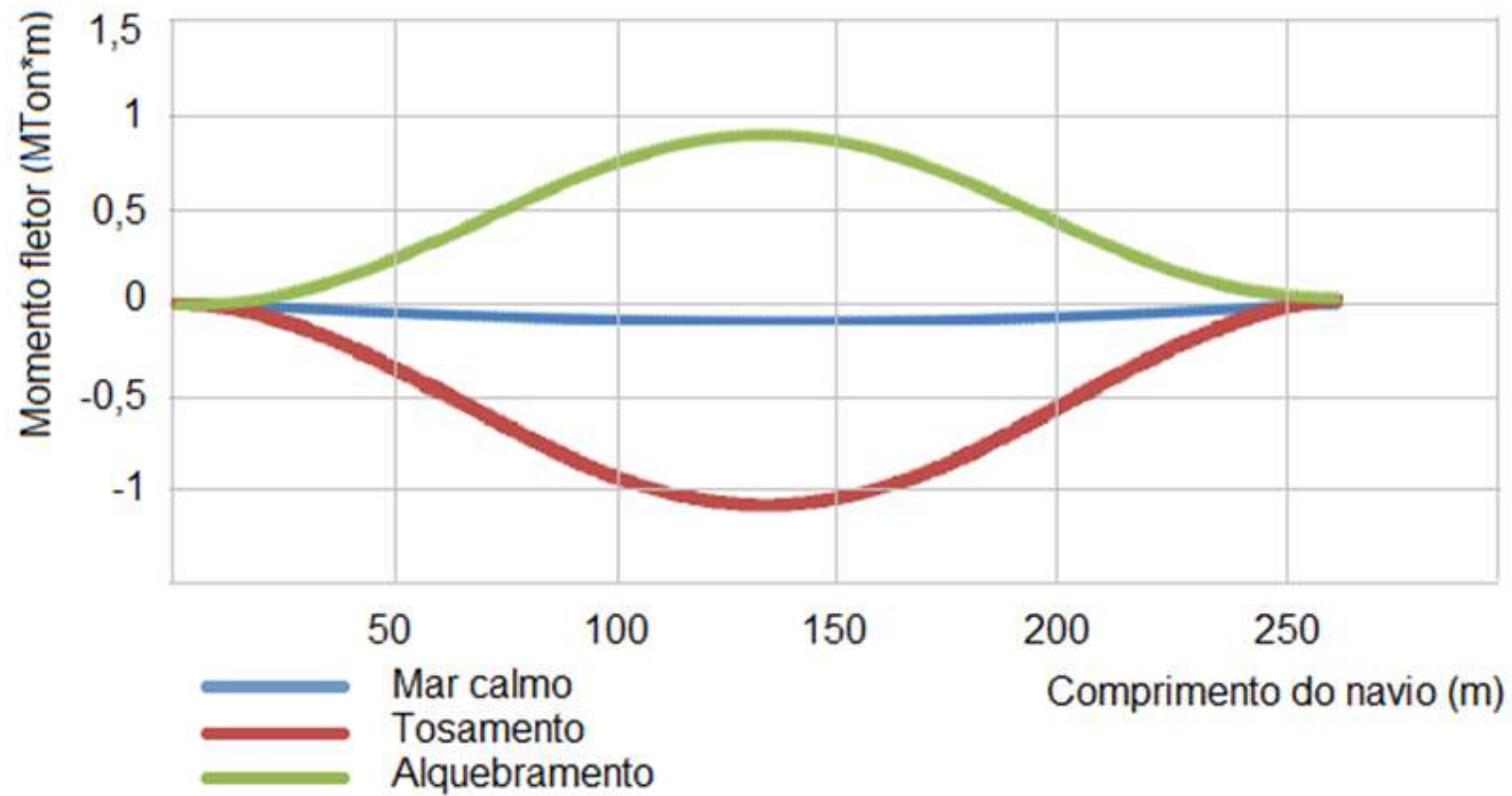


Figura E-3 – Momento fletor



ANEXO F – DETALHE DO MÉTODO MONTE CARLO

A tabela F-1 apresenta três colunas: a primeira representa as máximas tensões longitudinais primárias, a segunda representa a probabilidade de ocorrência da onda que gerou aquela tensão longitudinal primária e a terceira representa a frequência acumulada da probabilidade de ocorrência da onda.

Tabela F-1 – Geração de números aleatórios para S

Geração de números aleatórios para S		
Tensões	Freq. Relativas	Freq. Acumulada
134,249611	1E-04	1E-04
136,1418392	1E-04	0,0002
138,0786243	0,0002	0,0004
139,9792066	0,0006	0,001
141,9232035	0,0013	0,0023
143,7391077	0,0025	0,0048
145,433903	0,0048	0,0096
147,6823609	0,0087	0,0183
149,3067438	0,0146	0,0329
151,1488661	0,023	0,0559
153,0240072	0,0359	0,0918
155,1204395	0,0483	0,1401
157,1003329	0,0632	0,2033
159,0166674	0,0777	0,281
160,9080127	0,0897	0,3707
162,8561161	0,0974	0,4681
164,7118001	0,1033	0,5714
166,7778552	0,095	0,6664
168,7813886	0,0853	0,7517
170,2577379	0,0721	0,8238
172,0389922	0,0572	0,881
174,5923815	0,0426	0,9236
175,9383695	0,0309	0,9545
177,6352273	0,0193	0,9738
179,683945	0,0119	0,9857
181,9835373	0,007	0,9927
183,1925864	0,0037	0,9964
185,6870897	0,002	0,9984
186,3260729	0,0009	0,9993
188,3625563	0,0004	0,9997
189,6294333	0,0002	0,9999
191,6429248	1E-04	1

A tabela F-2 apresenta o método Monte Carlo. O método foi implementado para 20 000 números aleatórios, porém, apenas são apresentados os primeiros números aleatórios gerados para as distribuições de S e R. A distribuição S segue os valores e freqüências apresentadas na tabela F-1, enquanto a distribuição R segue uma distribuição normal com média e desvio padrão estabelecidos no capítulo 6.

Tabela F-2 - Desenvolvimento do método Monte Carlo

R	N. Aleatórios	S	G(U)
233,4237812	0,447920164	162,8561161	70,56766505
228,2921634	0,847987304	172,0389922	56,25317113
236,2823509	0,412030396	162,8561161	73,42623475
241,7014861	0,602404859	166,7778552	74,92363085
241,2913387	0,357768487	160,9080127	80,3833259
244,0989488	0,689931944	168,7813886	75,31756017
223,5361649	0,66585284	166,7778552	56,75830966
233,7705485	0,019592883	149,3067438	84,46380467
240,7488683	0,017578661	147,6823609	93,06650738
229,2948216	0,634540849	166,7778552	62,51696635
231,3764282	0,08517716	153,0240072	78,35242096
226,1252303	0,925901059	175,9383695	50,18686083
225,3037178	0,034485916	151,1488661	74,15485176
229,8674451	0,69103061	168,7813886	61,08605651
230,939088	0,650776696	166,7778552	64,16123273
223,8808611	0,854152043	172,0389922	51,84186887
232,0183944	0,884578997	174,5923815	57,42601292
232,8787503	0,706991791	168,7813886	64,09736164
235,7079785	0,492141484	164,7118001	70,99617847
233,081162	0,898617512	174,5923815	58,4887805
233,2832992	0,336375011	160,9080127	72,37528644
233,0562373	0,723044527	168,7813886	64,27484868
242,0488682	0,948881497	175,9383695	66,11049871
234,5522566	0,156407361	157,1003329	77,45192368
234,0226723	0,25122837	159,0166674	75,00600494
232,3056612	0,196600238	157,1003329	75,20532824
245,3541129	0,024109622	149,3067438	96,04736907
239,5447831	0,991515854	181,9835373	57,56124583
247,4721873	0,916959136	174,5923815	72,87980583

A tabela F-3 apresenta os resultados do método Monte Carlo, para, posteriormente, gerar o histograma da curva G. As duas primeiras colunas apresentam intervalos de tensões longitudinais totais; a terceira coluna apresenta a frequência dos valores gerados na simulação de Monte Carlo apresentada na tabela F-2, e a quarta, apresenta a frequência em relação toda à amostra estudada.

Tabela F-3 – Resultados do método Monte Carlo

Dados da Amostra			
Lim. Inferior (MPa)	Lim. Superior (MPa)	Freq. parcial	Frequência.
41,34403532	43,47696637	24	0,0012
43,47696637	45,60989742	37	0,00185
45,60989742	47,74282847	67	0,00335
47,74282847	49,87575951	97	0,00485
49,87575951	52,00869056	171	0,00855
52,00869056	54,14162161	301	0,01505
54,14162161	56,27455266	464	0,0232
56,27455266	58,40748371	637	0,03185
58,40748371	60,54041475	875	0,04375
60,54041475	62,6733458	1236	0,0618
62,6733458	64,80627685	1415	0,07075
64,80627685	66,9392079	1685	0,08425
66,9392079	69,07213895	1692	0,0846
69,07213895	71,20507	1869	0,09345
71,20507	73,33800104	1814	0,0907
73,33800104	75,47093209	1668	0,0834
75,47093209	77,60386314	1458	0,0729
77,60386314	79,73679419	1221	0,06105
79,73679419	81,86972524	1017	0,05085
81,86972524	84,00265629	781	0,03905
84,00265629	86,13558733	546	0,0273
86,13558733	88,26851838	369	0,01845
88,26851838	90,40144943	241	0,01205
90,40144943	92,53438048	148	0,0074
92,53438048	94,66731153	88	0,0044
94,66731153	96,80024258	49	0,00245
96,80024258	98,93317362	11	0,00055
98,93317362	101,0661047	12	0,0006
101,0661047	103,1990357	4	0,0002
103,1990357	105,3319668	1	0,00005
105,3319668	107,4648978	0	0
107,4648978	109,5978289	1	0,00005

