MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA

ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

LARISSA FERREIRA CAZARIM

FALHAS ESTRUTURAIS EM EMBARCAÇÕES MERCANTES

RIO DE JANEIRO

2015

LARISSA FERREIRA CAZARIM

FALHAS ESTRUTURAIS EM EMBARCAÇÕES MERCANTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador PROF.: HERMANN REGAZZI GERK

Engenheiro Químico e Especialista em Mecânica dos Fluidos.

RIO DE JANEIRO

2015

LARISSA FERREIRA CAZARIM

FALHAS ESTRUTURAIS EM EMBARCAÇÕES MERCANTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da aprovação: ____/____/____

Orientador PROF.: HERMANN REGAZZI GERK

_____

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Juarez Cazarim e Marta Maria Ferreira, que dedicaram suas vidas para que eu encontrasse realização na minha. Sem seu esforço, carinho e apoio incondicional, eu não teria chegado longe o bastante para que essas palavras fossem escritas. Sem sua motivação e exemplo, eu jamais colheria os frutos da persistência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que Se fez presente mesmo quando me fiz distante e tornou possível essa e todas as conquistas de minha vida. A minha família, em especial minha madrinha, Maria Betania Ferreira Abreu Santos, por ter confiado em meu sucesso e fornecido tantas vezes o suporte para que eu subisse degraus que me fizeram enxergar mais à frente, melhor. Ao meu orientador, professor Hermann Regazzi Gerk, pela paciência e conhecimento tão vasto quanto sua gentileza em compartilhá-lo.

Seja você quem for ou o que faça, quando quer com vontade alguma coisa, é porque este desejo nasceu na alma do Universo. É sua missão na Terra.

(PAULO COELHO)

RESUMO

As falhas estruturais são fatores determinantes para o afundamento de embarcações, sendo esse tipo de sinistro, o naufrágio, a causa de quase três quartos das perdas totais de unidades marítimas. Falhas estruturais podem ser desencadeadas por fatores previsíveis, cujas solicitações mecânicas produzidas o projeto e a construção devem estar aptos a responder. Nesse sentido, considera-se os tipos de danos naturalmente suscetíveis às embarcações, ligados às condições físicas e químicas do meio de trabalho da estrutura. Porém, as falhas também podem estar relacionadas a fatores imprevisíveis, que constituem condições de fragilidade ou esforços excessivos dificilmente preditos durante a operação normal da embarcação, gerados pela condução inadequada da embarcação pelos operadores ou por erros de projeto e modificações estruturais que colocam em risco a segurança da unidade. Avanços no conhecimento das diversas áreas que compõem a engenharia naval possibilitaram recursos que auxiliam na minimização de danos previsíveis. Já o estudo de casos tornou-se o principal artifício de análise que permite a detecção de procedimentos ou arranjos estruturais indevidos, para que sejam feitos aperfeiçoamentos a fim de responder à imprevisibilidade de certos tipos de dano.

Palavras-chave: Falhas. Estrutura. Esforços. Projeto. Dano.

ABSTRACT

Structural faults are decisive factors for the sinking of boats, and this type of accident, the wreck, is the cause of almost three quarters of total losses of maritime units. Structural failures can be triggered by predictable factors, whose mechanical stresses produced the project and the construction must be able to respond. Accordingly, it is considered naturally susceptible types of damage to vessels, linked to the physical and chemical conditions of the structure of the working environment. However, failures can also be related to unpredictable factors, which are fragile or excessive strain unlikely predicted conditions during normal operation of the vessel, generated by inadequate maneuvering of the vessel by operators or by design errors and structural changes that jeopardize the security of the hole unit. Advances in knowledge of the different areas that make up the naval engineering enabled features that aid in minimizing foreseeable damage. The study of cases has become the main artifice of analysis that allows the detection of procedures or undue structural arrangements so that improvements are made in order to respond to the unpredictability of certain types of damage.

Key words: Failures. Structure. Efforts. Design. Damage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Aspecto da formação de fraturas frágeis	14
Figura 2	Coalescência de grãos na formação de fratura dúctil	15
Figura 3	Curva S-N esquemática	16
Figura 4	Variação de tensões residuais transversais e superposição de efeitos	18
Figura 5	Variação de tensões de solda em aço	19
Figura 6	A influência de tensões residuais na resistência à fadiga de uma liga de alumínio	20
Figura 7	A influência da esteira na operação do propulsor	24
Figura 8	Diagrama de fase de uma substância	25
Figura 9	Propulsor avariado devido à erosão por cavitação	26
Figura 10	A influência da temperatura na ductilidade e no limite de resistência à tração	31
Figura 11	A influência da temperatura no comportamento de aços e na ductilidade da fratura	32
Figura 12	RMS Titanic	33
Figura 13	Hipóteses de falha estrutural do costado do Titanic	34
Figura 14	Fratura do navio Charles S. Haigh	37
Figura 15	Trinca identificada em porão de carga	39
Figura 16	O afundamento do petroleiro Prestige	43
Figura 17	Experimento com as placas de papelão (1)	45
Figura 18	Experimento com as placas de papelão (2)	46
Figura 19	Construção do Independence of the Seas	47
Figura 20	Tipos de plataformas de petróleo e sua constituição estrutural	49
Figura 21	*Blowout* na Deepwater Horizon	51
Figura 22	Número de vazamentos por tipo de atividade e causa	52
Figura 23	Estrutura da Piper Alpha	54
Figura 24	Disposição de setores da Piper Alpha	55
Figura 25	Estrutura interna da coluna de popa boreste	57
Figura 26	Esquema da falha na operação de drenagem do tanque de bombordo	58
Figura 27	Afundamento da P-36	59
Figura 28	Plataforma do complexo BHN em chamas	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 DANOS ESTRUTURAIS SUSCETÍVEIS A EMBARCAÇÕES MERCANTES 12

2.1 Falhas mecânicas 13

2.1.1 fraturas frágeis e dúcteis **14**

2.1.2 fadiga **15**

2.1.2.1 a influência de tensões residuais **17**

2.2 Danos decorrentes de vibrações 20

2.2.1 o efeito esteira e a ocorrência de vibrações **22**

2.3 Desgaste 25

2.3.1 cavitação e ventilação **25**

2.3.2 corrosão **27**

2.4 Fragilização da estrutura 28

2.4.1 fragilização por efeito químico **28**

2.4.2 fragilização a frio **30**

2.4.2.1 RMS Titanic **32**

2.4.2.2 navios da classe Liberty **35**

3 A INFLUÊNCIA DA OPERAÇÃO NA OCORRÊNCIA DE FALHAS ESTRUTURAIS 38

3.1 Carregamentos inadequados 38

3.1.1 Trade Daring **40**

3.2 Imprudência 41

3.2.1 M/T Prestige **42**

4 MODIFICAÇÕES NA ESTRUTURA DE EMBARCAÇÕES 45

4.1 Aprimoramentos na resistência estrutural de navios 45

4.2 Falhas decorrentes de modificações estruturais em projeto 48

4.2.1 unidades de perfuração e unidades de produção **48**

4.2.2 adaptações em unidades marítimas para transição de propósitos **52**

4.2.2.1 Piper Alpha **53**

4.2.2.2 P-36 **56**

4.2.2.3 Bombay High North (BHN) **61**

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 63

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

1 INTRODUÇÃO

As solicitações estruturais às quais determinada construção está submetida são o principal objeto de análise em sua fase de projeto. Prever os esforços aplicados durante a operação e as condições enfrentadas pela estrutura ao longo de sua vida útil é fundamental para dimensionar e escolher, com segurança, a qualidade, proporção e a disposição dos materiais no conjunto que se pretende erguer. Essa metodologia aplica-se também às embarcações, estruturas que devem conservar resistência ao carregamento, além de suportar certas condições de funcionamento esperadas, que incluem vibrações, ruídos e propensão a falhas mecânicas, como fadiga, fragilização e desgaste.

Como equipamentos cujo controle requer a presença de tripulação, as embarcações devem possuir um projeto de tal confiabilidade que garanta a segurança dos profissionais a bordo e resguardo de vidas humanas mesmo em caso de avarias estruturais, sejam elas provocadas por condições previstas ou imprevistas no planejamento. Essa abordagem de características construtivas justifica-se na observação de eventos e acidentes ocorridos ao longo da história, cujas consequências motivaram avanços na Engenharia Naval e regulamentações mais rígidas sobre o setor.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se propõe a analisar desastres atribuídos a falhas estruturais em navios e plataformas, provocados por efeitos conhecidos e considerados nas simulações de projeto ou por situações inesperadas, relacionadas à própria operação das embarcações ou a um conjunto de fatores externos incontroláveis. Serão tratadas maneiras de atenuar falhas comuns e minimizar a possibilidade de acidentes ligados a esses defeitos, tendo em vista os danos materiais e perdas humanas por eles motivados.

2 DANOS ESTRUTURAIS SUSCETÍVEIS A EMBARCAÇÕES MERCANTES

A avaliação da resistência estrutural de uma embarcação se destaca como uma das fases mais fundamentais de seu projeto, objetivando, em suma, a garantia de solidez à estrutura. Essa característica indispensável, tanto quanto flutuabilidade e estanqueidade, diz respeito à resistência aos esforços produzidos por vagas nos balanços e na arfagem, bem como por pesos carregados e pela propulsão.

Desde os primórdios da construção naval até seu efetivo despontar como atividade economicamente promissora, especialmente a partir do século XVI com o advento das Grandes Navegações, o principal método de avaliação da resistência estrutural de embarcações foi a tentativa e erro, segundo o qual o modelo de estruturas bem-sucedidas era copiado e projetos comprovadamente fracassados, por meio da experiência, eram descartados.

> Cada navio ou embarcação é uma resposta particular a um determinado número de necessidades e de restrições, resultando por um lado dos conhecimentos, da prática, do gosto e do talento do construtor, e por outro da acessibilidade e custo dos materiais de construção em cada dado momento. [1]

Seguindo essa técnica primitiva, a conquista de uma estrutura relativamente confiável sucedeu-se após inúmeras perdas humanas e materiais. Revelou-se assim a necessidade de tecnologias que otimizassem o desenvolvimento dos projetos, a fim de poupar custos e vidas empenhados na indústria naval.

A eficiência na análise da resistência estrutural de embarcações teve seu crescimento associado à disseminação e aperfeiçoamento de ferramentas computacionais, que possibilitaram a aplicação de novas concepções de projetos através de sua confiabilidade. O método de análise por elementos finitos (MEF), desenvolvido na década de 60, é uma das técnicas computacionais mais utilizadas atualmente para obtenção de informações relativas ao comportamento estrutural de uma embarcação.

Na construção naval contemporânea, entende-se que para avaliação da solidez de um navio ou plataforma devem ser consideradas as principais condições às quais a embarcação estará submetida durante seu funcionamento, incluindo, dentre outros fatores, o carregamento sob análise estática e dinâmica, pressões dinâmicas provocadas pelo movimento relativo da embarcação no mar, vibrações e ruídos gerados pela operação das máquinas a bordo e os efeitos da cavitação em partes específicas da estrutura. Deve-se observar ainda determinadas características inerentes à própria construção, como peso, geometria, propriedades mecânicas

[1] CASTRO, Filipe Vieira de. **A Nau de Portugal: Os navios da conquista do Império do Oriente.** Lisboa: Prefácio, 2003.

dos materiais empregados e vibrações intrínsecas ao conjunto. Todos os aspectos citados, desde as situações normais de operação às características da embarcação, constituem condições previsíveis que provocam determinadas solicitações mecânicas esperadas na estrutura, às quais o projeto e a construção devem estar devidamente aptos a responder.

As condições imprevisíveis compreendem situações que dificilmente poderão ser preditas durante o funcionamento ou operação normais de uma embarcação. Como exemplo, é possível citar acidentes ou falhas de procedimento que provocam mudanças nas condições às quais a estrutura está exposta, como resfriamento brusco e reações químicas no meio, sinistros capazes de alterar a resposta esperada do conjunto para uma mesma solicitação estrutural ou carregamento externo. As consequências, nesses casos, podem ser desastrosas, já que o projeto e a construção não estarão necessariamente aptos a suportar o novo estado ao qual a estrutura ficará submetida.

Serão analisadas nas seções que se seguem as principais predileções para falhas estruturais, sejam elas observadas sob condições previstas ou imprevistas, bem como conceitos fundamentais ao entendimento de mecanismos que possam oferecer danos a componentes ou à estrutura completa de navios e plataformas. As falhas mecânicas certamente recebem maior destaque nesse sentido, por constituírem os danos geralmente mais severos e irreversíveis ao conjunto. Porém, cabe ressaltar que certas condições, como a cavitação e as vibrações, têm sua menção justificada por provocar ou influenciar a ocorrência de alguns tipos de falhas mecânicas, sendo igualmente maléficas à solidez de uma estrutura.

2.1 Falhas mecânicas

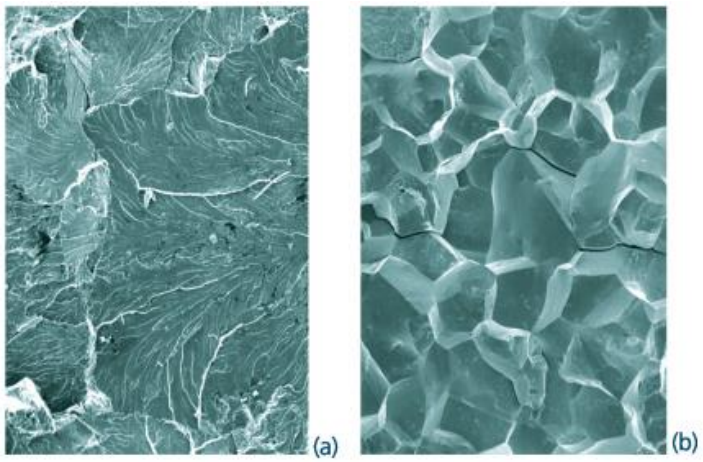
A falha de um material pode ser compreendida como a perda da capacidade desse componente suportar cargas em sua unidade, ocorrendo quando esse elemento, por algum motivo, não consegue mais executar com segurança a função para o qual foi projetado. Suas principais causas são o projeto, a seleção de materiais, imperfeições no material, deficiências de fabricação, erros de montagem ou instalação e condições de operação ou manutenção inadequadas. Os principais tipos de falha mecânica serão analisados nas seções que se seguem, bem como os mecanismos pelos quais as falhas se sucedem.

2.1.1 fraturas frágeis e dúcteis

As falhas por fraturas num material podem ocorrer basicamente por fratura frágil, comum em cerâmicas, gelo e metais frios, ou por fratura dúctil, sofrida pela maioria dos metais quando não tão frios. O tipo de fratura e a maneira como se manifesta pode dizer muito sobre a natureza de um material empregado numa estrutura e as causas que levaram à manifestação da falha.

A fratura frágil se distingue por uma ruptura que ocorre através da propagação instável de uma trinca de por toda a seção da peça, sem aumento da tensão, com velocidade próxima à de propagação do som no metal. Há baixa absorção de energia antes da fratura. Sua principal característica é a inexistência de deformações plásticas significativas em escala macroscópica. A fratura frágil se forma por clivagem (separação dos planos cristalinos em dois) e por fratura intergranular (separação dos grãos cristalinos). O aspecto de ambos os fenômenos formadores está exemplificado na Figura 1.

Figura 1: Aspecto da formação de fraturas frágeis: (a) clivagem; (b) fratura intergranular.



Fonte: ZOLIN, 2010.

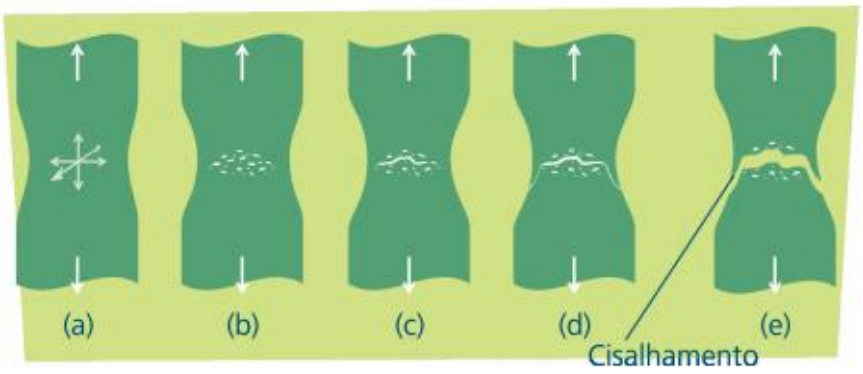
Em contrapartida, a fratura dúctil ocorre com uma deformação plástica significativa e uma estricção da seção transversal da peça. A trinca formada é estável, pois resiste à tensão adicional. Há elevada absorção de energia antes da fratura. Affonso afirma que, de maneira geral, essas falhas em componentes ocorrem por sobrecarga, e não isoladamente:

> Falhas de componentes de máquinas em serviço raramente ocorrem por fratura dúctil, sendo ela, em geral consequência de uma falha múltipla onde a sobrecarga que causou a dita fratura dúctil foi originada na falha de outro componente.[2]

[2] AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. Qualitymark Editora Ltda, 2002. p. 32.

O mecanismo de ruptura por fratura dúctil é baseado na formação de vazios na estrutura cristalina. A união desses espaços por coalescência origina as trincas que se propagam sob um ângulo de aproximadamente 45º em relação ao esforço, até que a peça se rompa completamente. O processo de nucleação e crescimento dos vazios, com posterior coalescência de cavidades, é representado na Figura 2.

Figura 2: Coalescência de grãos na formação de fratura dúctil.



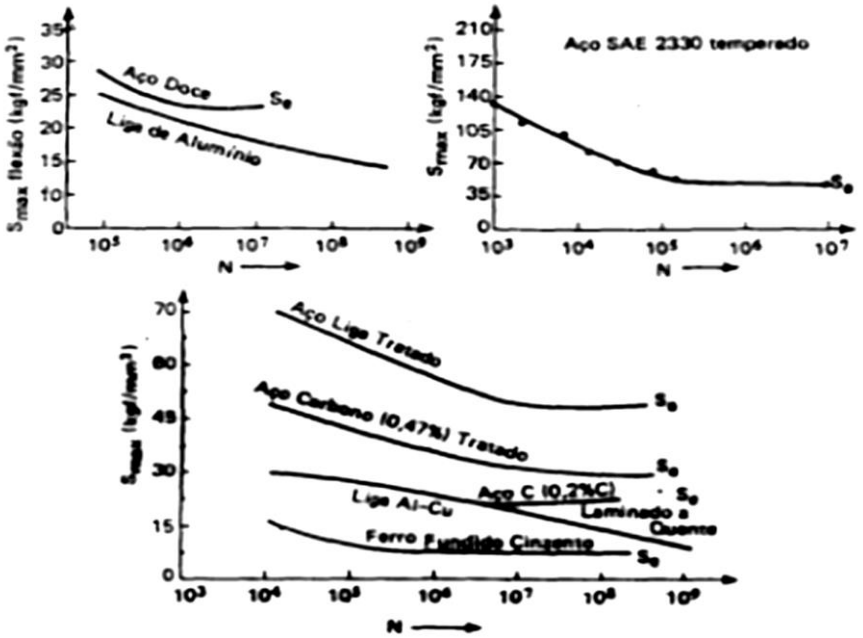
Fonte: ZOLIN, 2010.

2.1.2 fadiga

Cerca de 80% a 90% das falhas em conjuntos mecânicos são causadas por fadiga, um dos tipos de falha mecânica mais comuns em componentes metálicos. O fenômeno pode ser compreendido como a ruptura progressiva de um material submetido a ciclos repetitivos de tensão ou deformação de valores variáveis, de modo que a peça pode romper-se mesmo sob a aplicação tensões inferiores à tensão de falha sob carregamento estático. Por se tratar de um evento complexo, a fadiga depende de fatores diversos como carregamento, geometria, microestrutura do material, fatores ambientais (temperatura e umidade, por exemplo) e processos de fabricação (tensões residuais, acabamento superficial, defeitos e outros).

O mecanismo de falha por fadiga de um componente baseia-se na nucleação e propagação de defeitos nos materiais devido a ciclos alternados de tensão/deformação. O início dessa propagação de fendas ocorre a partir de pontos de concentração de tensão e defeitos. O processo pode ser compreendido através de um conceito introduzido por August Wöhler, que desenvolveu a chamada curva de Wöhler, também chamada de curva S-N, para estudo da fadiga. S é a amplitude de tensão aplicada e N o número de ciclos até a sua ruptura. Observa-se que, à medida que se aumenta o número de ciclos aplicados à peça, são necessários valores menores de tensão para levá-la à ruptura.

Figura 3: Curvas S-N esquemáticas.



Fonte: GERK, Hermann Regazzi.

Além do próprio conceito de fadiga, é interessante apontar ainda a concepção de dano acumulado. Ao longo da vida útil de um material, normalmente o componente mecânico não sofre carregamentos idênticos; ao contrário, sofre cargas variáveis de amplitude não necessariamente constante, o que dificulta a análise de fadiga da peça. A chamada regra de Palmgren-Miner, processo simples desenvolvido pelos pesquisadores que lhe dão nome, institui o conceito de acúmulo de dano, segundo o qual o dano que a peça sofreu sob a ação de uma dada amplitude da tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos atuantes em que aquela tensão foi aplicada. Dessa abordagem, resulta a seguinte fórmula matemática para avaliação do dano num material:

$$\mathbf{D_i = n_i/N_i}$$

D_i representa o dano sofrido, sendo D = 1 o dano máximo, caso de um único nível de carregamento em que a falha ocorre quando $n_i = N_i$. O número de ciclos atuantes é descrito por n_i, e a vida que o material teria quando submetido ao carregamento de uma certa amplitude isoladamente é dado por N_i. Embora a expressão tenha caráter simplificador para a análise do dano em materiais, na prática verifica-se que, em muitos casos, a soma dos danos parciais ultrapassa ou fica muito inferior ao valor máximo de 1 no instante da falha. Além disso, dano por fadiga não é necessariamente linear, como pode sugerir a equação.

A análise da durabilidade de um componente mecânico está intimamente ligada à análise de acúmulo de dano por fadiga, sendo esse fenômeno fundamental para a determinação da vida útil de uma estrutura ou de sua confiabilidade e segurança em operação.

As tensões residuais constituem um dos principais e mais sensíveis efeitos modificadores do comportamento de componentes metálicos sob condições de fadiga, dentre os fatores listados anteriormente. Seu aparecimento é inerente à construção das embarcações, portanto suas consequências podem ser minimizadas, porém não eliminadas, o que lhes confere destaque no estudo em questão.

2.1.2.1 a influência de tensões residuais

Tensão residual pode ser compreendida como qualquer tensão existente no volume de um material sem a aplicação de carga externa. Essas tensões têm influência direta nas características de resistência mecânica e no funcionamento dos elementos de uma estrutura. Como explica Gurova, as tensões residuais têm sua importância justificada pelas falhas mecânicas que podem ocasionar no conjunto de uma estrutura:

> Como resultado das operações tecnológicas, para produção de estruturas e, posteriormente, na sua montagem e funcionamento, frequentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. Para a prevenção da segurança e da capacidade de trabalho dos diversos elementos das estruturas, o conhecimento da magnitude e das direções da atuação dessas tensões é de grande importância.[3]

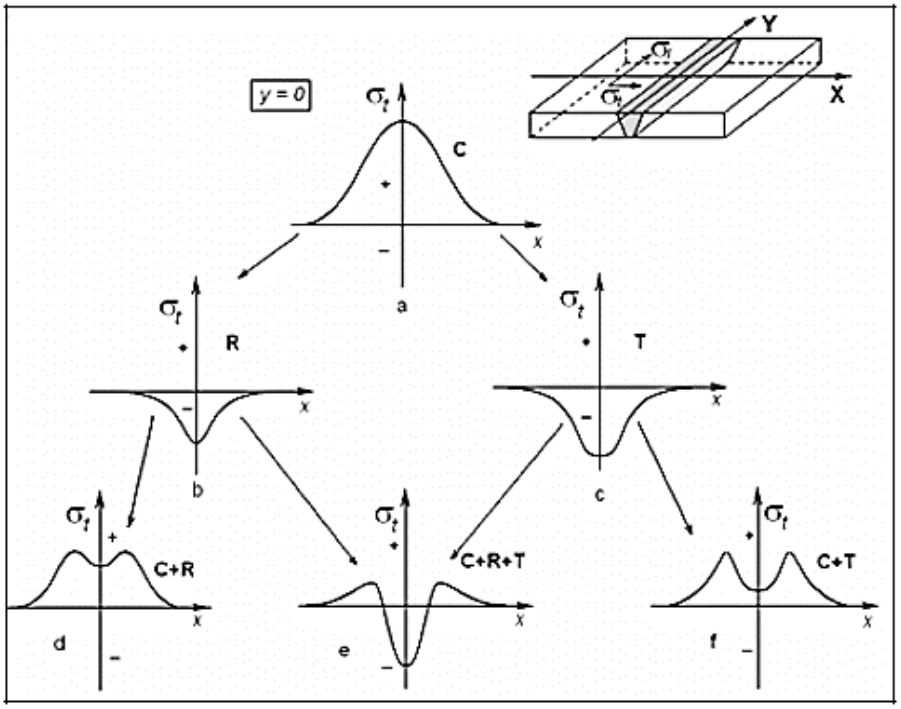
Esse tipo de tensão pode ser causada por deformações plásticas heterogêneas, tensões de origem térmica, transformações de fase, soldagem, tratamento mecânico superficial e tratamentos termoquímicos. De todas as causas supracitadas, a soldagem é a que tem maior influência no caso de navios e plataformas, devido ao modelo usual de fabricação de painéis e blocos e posterior fase de edificação. Dessa forma, pode-se dizer que as tensões residuais aparecem ainda durante a fase de construção de uma embarcação, e seu monitoramento deve ser feito por processos não destrutivos.

Quando a peça soldada não possui rigidez suficiente, ela se deforma, tendendo a aliviar as tensões residuais existentes; as tensões residuais provenientes do processo de soldagem permanecem na estrutura após essa operação, em equilíbrio, quando em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo. Durante o ciclo térmico da soldagem, ocorrem escoamentos parciais localizados que podem levar a fragilização. As principais fontes de tensão desse processo provêm de concentração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a soldagem (principal fonte), resfriamento superficial mais intenso e transformação de fase. Na Figura 4 estão representadas as principais

[3] GUROVA, Tetyana; QUARANTA, Francisco; ESTEFEN, Segen. Monitoramento do Estado de Tensões Residuais Durante a Fabricação de Navios. **Laboratório de Tecnologia Submarina–COPPE, UFRJ**, 2008.

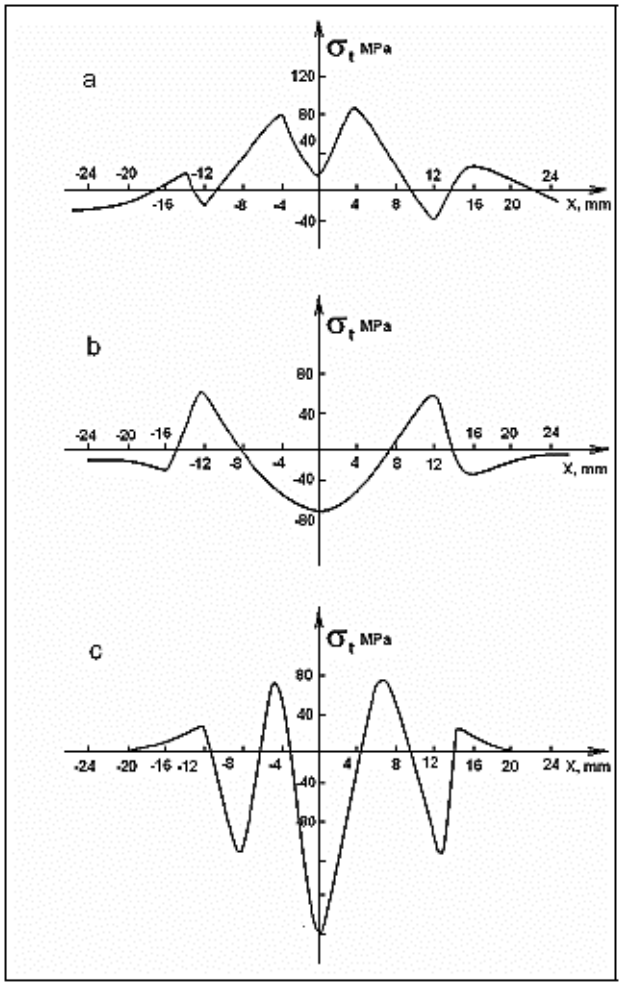
fontes de tensão residual citadas atuando em uma peça e a superposição desses efeitos, que resulta em tensões residuais transversais (indicadas por σ_t) de valores diferentes na extensão do componente em questão. Já a Figura 5 mostra que a espessura das chapas soldadas, bem como as condições de resfriamento das mesmas, também têm influência na variação de tensões ao longo do cordão de solda.

Figura 4: Variação de tensões residuais transversais e superposição de efeitos. (a) Concentração (C); (b) resfriamento superficial mais intenso (R); (c) transformação de fase (T); (d) C+R; (e) C+R+T; (f) C+T.



Fonte: GUROVA, QUARANTA e ESTEFEN, 2008.

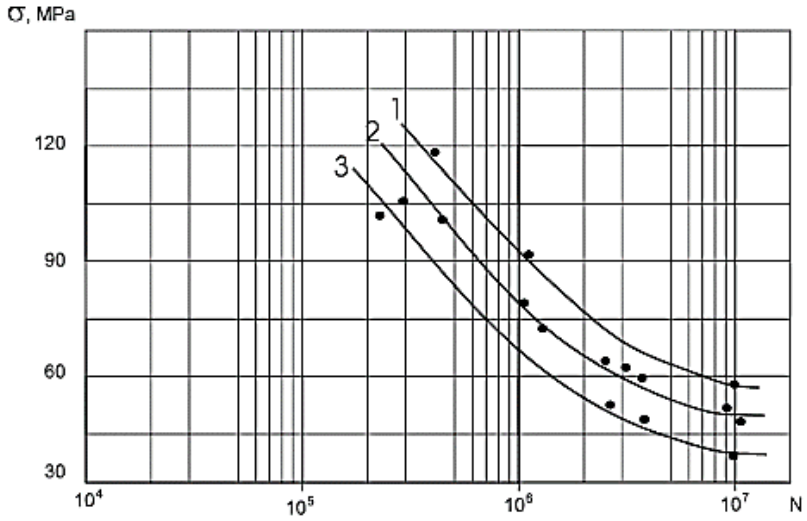
Figura 5: Variação de tensões de solda em aço. Espessura das placas/tipo de resfriamento: (a) 2.5 mm/resfriamento no ar; (b) 10 mm/resfriamento no ar; (c) 2.5 mm/resfriamento na água.



Fonte: GUROVA, QUARANTA e ESTEFEN, 2008.

Experimentos demonstram que as tensões residuais, de acordo com suas características, podem promover alterações distintas no limite de resistência à fadiga de uma peça metálica. Tensões residuais trativas apresentam-se como um fator de diminuição da resistência à fadiga, enquanto as tensões compressivas provaram aumentar essa resistência, além de inibir a nucleação e a propagação de trincas. Na Figura 6, observa-se que a elevação da curva em (1) representa um aumento na resistência à fadiga, e a curva (3) uma redução na resistência a esse tipo de falha mecânica.

Figura 6: A influência de tensões residuais na resistência à fadiga de uma liga de alumínio. (1) com tensões residuais compressivas; (2) sem tensões residuais; (3) com tensões residuais trativas.



Fonte: GUROVA, QUARANTA e ESTEFEN, 2008.

A influência de tensões residuais trativas na resistência de componentes metálicos pode acarretar falhas mecânicas no conjunto, representando assim um risco à segurança da estrutura. Por essa razão, são utilizados tratamentos de alívio de tensões para reduzir esse efeito. Os mais comuns são métodos mecânicos (sobrecarga, por vibração, martelamento e *shot peening*, por exemplo), métodos térmicos (no forno ou localizados) e métodos químico-térmicos.

Como condição prevista, o estado das tensões residuais de uma estrutura é determinado durante sua fase de fabricação, o que possibilita correções de falhas na execução do projeto, facilitando o controle da integridade e auxiliando no planejamento de programas de manutenção. Os métodos utilizados para verificação e monitoramento dessas tensões são geralmente não destrutivos, dentre os quais os mais usuais são magnéticos, acústicos, elétricos e por meio de raio-X.

2.2 Danos decorrentes de vibrações

A vibração é compreendida como um movimento oscilatório de um ponto em torno de um centro de referência. É um fenômeno característico dos corpos dotados de massa e elasticidade, sendo que a vibração natural de um sistema pode ser amplificada quando sua frequência de operação coincide com sua frequência natural. Esse efeito, conhecido como ressonância, pode ter consequências devastadoras para a estrutura. É importante conhecer as

frequências naturais de vibração de um navio ou plataforma a fim de evitar condições de ressonância durante sua operação.

Em uma embarcação, as principais forças de excitação aplicadas aos elementos estruturais que amplificam sua vibração natural são provenientes da propulsão, através do hélice e do eixo, do funcionamento do motor principal e dos diversos maquinários existentes a bordo, entre eles bombas, compressores, geradores e outros.

"Os fenômenos de vibração ocorrem quando forças dinâmicas, ou seja, forças que variam com o tempo, agem no casco ou em elementos estruturais locais do navio. A resposta à vibração de um sistema é função do módulo das forças e da resposta dinâmica do sistema"[4], como afirma Pereira. Para fins de projeto e avaliação, considera-se a teoria da viga-navio no estudo das vibrações do casco, segundo a qual um navio pode ser analisado como um sistema contínuo, o que simplifica os cálculos e a abordagem do problema. Diz-se que um sistema é contínuo quando sua massa e rigidez são distribuídas continuamente, sendo esses corpos considerados homogêneos (conservam mesmas propriedades físicas e mecânicas em todo o seu volume) e isotrópicos (conservam as mesmas propriedades físicas e mecânicas em todas as direções), sujeitos à Lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \delta$$

A equação descrita relaciona a tensão aplicada a um corpo com a deformação proporcional e reversível por ele sofrida, onde σ representa a tensão exercida no corpo, δ é seu alongamento e E é o módulo de elasticidade do material. A partir de uma certa tensão máxima (limite de proporcionalidade), a Lei de Hooke deixa de ser válida e as tensões aplicadas produzem deformações desproporcionais. Quando um material ultrapassa seu limite de elasticidade, após a fase de escoamento, passa a se deformar permanentemente até a ruptura. É imprescindível considerar conceitos descritos na análise do efeito vibratório em embarcações, tendo em vista que o fenômeno pode somar-se aos esforços de carga já existentes no conjunto e evoluir para danos irreversíveis, como fissuras ou rompimentos na estrutura.

Os danos decorrentes das vibrações numa dada estrutura advém especialmente da ressonância, que ocorre quando um sistema físico recebe energia de tal forma que a frequência de fornecimento de energia se iguala a uma das frequências preferenciais de vibração do sistema. Um exemplo da aplicação dessa condição foi o que se sucedeu com a

[4] PEREIRA, Henrique Dias. **Influência da flexibilidade do casco de FPSO no comportamento estrutural de planta de processo**. 2009. 37 p. (Graduação em Engenharia Naval) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ponte de Tacoma, nos Estados Unidos, inaugurada em 1º de julho de 1940. A estrutura normalmente vibrava com os ventos da região. Porém, em novembro do mesmo ano, os ventos atingiram setenta quilômetros por hora durante a madrugada, fazendo com que a estrutura vibrasse até entrar em ressonância. Com o passar do tempo, as amplitudes crescentes de vibração provocaram o rompimento do cabo de sustentação e afrouxamento de ligações. A frequência de oscilação da ponte chegou a quatorze ciclos por minuto e, a partir desse ponto, a estrutura já estava condenada. Após sofrer o efeito da ressonância por aproximadamente uma hora, a ponte entrou em colapso e se partiu.

Assim como aconteceu com a ponte de Tacoma, a estrutura de uma embarcação pode vibrar, por influência da operação do maquinário ou de condições características do ambiente de trabalho, como o efeito esteira, a ponto de provocar avarias severas, as quais podem levar à condenação da unidade. As vibrações em uma embarcação devem, portanto, ser minimizadas, não apenas por motivos de segurança e preservação do conjunto estrutural, como também para a saúde e conforto dos trabalhadores a bordo, já que o fenômeno vibratório pode causar danos ao organismo humano. Porém, jamais será possível eliminar o efeito indesejado de forma completa.

2.2.1 o efeito esteira e a ocorrência de vibrações

Em embarcações, além da própria operação das máquinas, outros efeitos são responsáveis pela produção de vibrações na estrutura. O mais significativo deles é o chamado efeito esteira, inerente à propulsão da unidade. Quando um propulsor opera em águas abertas, seu avanço será em águas não perturbadas; porém, quando o propulsor atua próximo ao casco, sofre influência da passagem da estrutura, atuando em águas perturbadas. A água em torno da popa adquire um movimento no sentido do deslocamento do navio (para vante), de modo a preencher o vazio deixado pelo avanço da embarcação. Esse comportamento da água denomina-se esteira. Como consequência desse efeito, o propulsor não avança em relação à água com a mesma velocidade do navio, mas com uma velocidade menor, designada velocidade de avanço.

Além do conhecimento acerca da influência da esteira, sabe-se ainda que o propulsor acelera a água a sua frente, diminuindo a pressão em torno da popa e, portanto, aumentando a velocidade na região. Ambos os efeitos descritos fazem crescer o arrasto do navio para valores acima daqueles calculados através de modelos testados em tanques de provas, pois nesses testes não existe esforço de propulsão, de modo que o casco é simplesmente levado

através da água. Assim, pode-se dizer que o desempenho de um propulsor atuando em águas abertas é diferente do observado em águas perturbadas, já que a admissão de água no hélice não é uniforme. Isso pode ser analisado pela quantificação de certos parâmetros, como *thrust*, torque e velocidade angular do propulsor nas duas condições distintas.

O efeito esteira pode ser matematicamente descrito por uma expressão proposta por Froude, que relaciona a velocidade do navio (Vs) e a velocidade do propulsor em relação à água (Va), também chamada velocidade de avanço, de modo que a resultante da diferença entre esses valores é denominada velocidade de esteira (*Wake Speed*). A fração de esteira (W) pode ser determinada por:

$$\mathbf{W = \frac{Vs - Va}{Vs}}$$

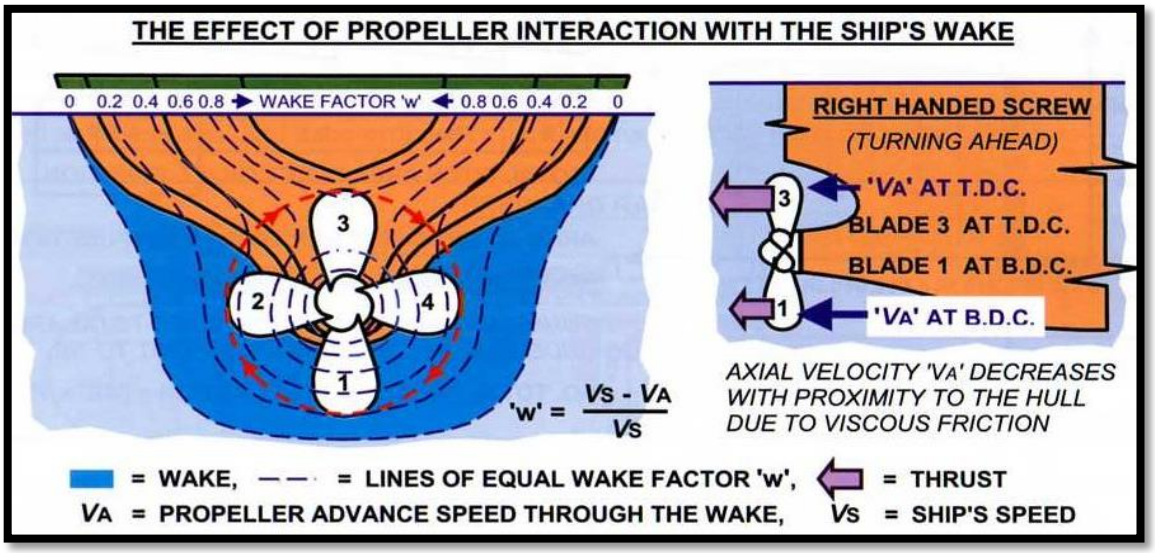
Posteriormente, Taylor introduziu uma definição diferente, usualmente conhecida como fator de esteira (*Wake Factor*), representado pelo termo 1-W. A expressão matemática simplificada traduz o fator de esteira como:

$$\mathbf{Va = Vs\ (1\text{-}W)}$$

Assim, se a fração de esteira (W) assume um valor típico de 0.1, por exemplo, a velocidade de avanço do propulsor representa apenas 90% da velocidade da embarcação. O propulsor está, portanto, operando em uma esteira.

Como o fator de esteira varia ao longo da popa e do hélice, o desempenho do propulsor é afetado pelas diferentes condições de operação de cada uma das pás. O movimento de rotação das pás do hélice faz com que uma dada seção, com um determinado raio, atravesse regiões com diferentes concentrações de esteira ou, em outras palavras, com fatores de esteira variados. Assim, a falta de uniformidade de escoamento provocada pela esteira está atrelada a consequências indesejáveis, pois, enquanto as pás giram, são observados esforços mecânicos desiguais em cada uma delas, os quais se repetem a intervalos cíclicos, induzindo um efeito vibratório que se propaga pelo casco e pelos rolamentos do eixo. A Figura 7 mostra os diferentes fatores de esteira na seção mais a ré do casco, sendo destacadas as condições para as pás do propulsor nas posições de ponto morto inferior (1) e ponto morto superior (3). Devido às vibrações provocadas pela influência do efeito esteira no propulsor, entre outras razões, os elementos estruturais podem entrar em ressonância, representando um risco para toda a embarcação.

Figura 7: A influência da esteira na operação do propulsor.



Fonte: GERK, 2014. Curso de Hidrodinâmica.

As vibrações que ocorrem na viga-navio podem ser torcionais, longitudinais e laterais. Para exemplificar os danos provocados pelo fenômeno vibratório em embarcações, será adotado o exemplo específico das vibrações torcionais. Um eixo comporta-se como mola sujeita a flexão e, quando lhe é transmitido torque, atua também como mola de torção. Quando o torque transmitido ao eixo é variável, força-se uma vibração torcional que, caso coincida com a frequência torcional natural do sistema, acarretará ressonância. O eixo pode ser torcido em amplitudes grandes o bastante para produzirem um colapso ou rompimento. Por essa razão, os sistemas de propulsão de embarcações não devem operar sob rotações que levem à condição de ressonância do casco, visando a garantia da integridade da estrutura.

Em se tratando de propulsão, as vibrações em uma embarcação também podem provir da própria operação da máquina motriz. Um exemplo emblemático é a propulsão a turbina. As turbinas à vapor e a gás possuem uma faixa de rotação característica e previsível denominada rotação crítica, na qual o conjunto sofre com vibrações excessivas, transmitidas a toda a estrutura da embarcação, bem como seus equipamentos. Essa vibração pode danificar diversos maquinários de bordo, devendo, portanto, ser evitada. Nenhuma turbina deve trabalhar continuamente na faixa de rotação crítica. Aconselha-se ainda que, nas variações de velocidades empreendidas em manobras, a transição por essa rotação específica seja feita o mais rapidamente possível, dentro das condições aceitáveis de segurança.

2.3 Desgaste

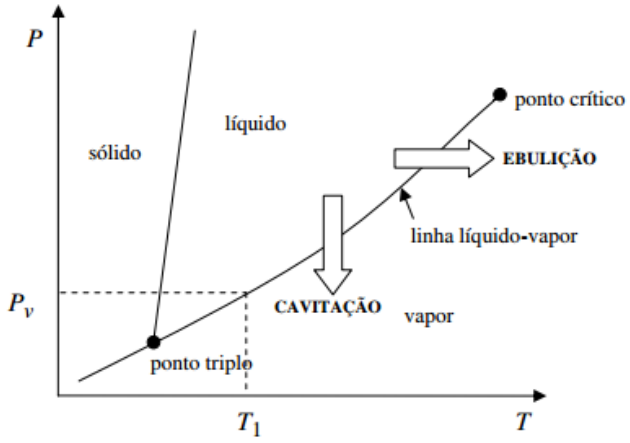
O desgaste é consequência de uma ação mecânica por contato com sólido, líquido ou gás, com a remoção de material do componente em questão. Analisa-se, nesse caso, o nível de desgaste aceitável para a peça, sem que com isso a segurança em seu funcionamento fique comprometida. Um material pode sofrer os efeitos do desgaste sem que com isso chegue à falha mecânica propriamente.

Os principais tipos de desgaste existentes são abrasivo, corrosivo, adesivo, erosivo, fadiga superficial, erosão-corrosão e cavitação-corrosão. Em termos de estruturas de navios e plataformas, a cavitação e a corrosão são as formas de desgaste que recebem maior atenção, devido à severidade de suas consequências e à suscetibilidade de embarcações a sua ocorrência.

2.3.1 cavitação e ventilação

A palavra cavitação, originária do termo em latim “cavus”, que significa buraco ou cavidade, representa um fenômeno de formação, crescimento e colapso de bolhas de vapor em um fluido, responsável pelo desgaste superficial de uma superfície sólida em contato com essa substância. Quando da existência de uma alta velocidade relativa entre uma superfície sólida e um fluido, há formação de bolhas de vapor em regiões onde a pressão estática absoluta do fluido é igual ou inferior à pressão de vapor da mesma substância. Pelo fluxo do sistema hidrodinâmico, as bolhas formadas são conduzidas a regiões de alta pressão onde entram em colapso, implodindo. O processo descrito pode ser observado na Figura 8, onde Pv representa a pressão de vapor da substância no diagrama de fase.

Figura 8: Diagrama de fase de uma substância.



Fonte: Google Imagens.

O fenômeno observado em diversos sistemas hidrodinâmicos, dentre eles os hélices de navios, provoca perda da eficiência do equipamento. A formação das bolhas de vapor pode tornar o escoamento transiente, ocasionando vibrações na máquina que afetarão o rendimento do sistema.

O colapso das bolhas provoca ainda um micro-jato de líquido sobre a superfície sólida e a formação de ondas de choque, as quais são responsáveis pela remoção de material da superfície, caracterizando o desgaste por erosão. De acordo com Gadag e Srinivasan, "As ondas de choque (colapso simétrico), são consequência do colapso violento de milhares de bolhas de vapor que podem gerar ondas de choque de até 1000 MPa".[5] Esse valor é superior à tensão limite de escoamento de diversos materiais metálicos; assim, quando as ondas de choque são direcionadas a uma superfície metálica, ocorre a erosão por cavitação. A acentuação desse efeito pode levar a falhas mecânicas no componente metálico. No caso das embarcações, os efeitos da cavitação no propulsor podem ser estendidos a vibrações pelo casco e ruídos excessivos, salientando esforços danosos em toda a estrutura.

Figura 9: Propulsor avariado devido à erosão por cavitação.

Fonte: GERK, Hermann Regazzi.

A ventilação, por sua vez, é o fenômeno segundo o qual o ar é sugado para o disco propulsor, devido às zonas de baixa pressão ao redor das pás, quando o mesmo opera muito próximo à superfície da água. Essa situação é normalmente associada a navios operando em condição de carga leve, com pequeno calado, ou em severas condições de mar, quando o hélice não permanece dinamicamente submerso. A mistura de água e ar nas pás provoca efeitos que induzem a cavitação, pois a massa específica do meio diminui, perde-se tração e, consequentemente, a rotação do propulsor aumenta, levando o hélice a cavitar.

[5] GADAG, S. P.; SRINIVASAN, M. N. Cavitation erosion of laser-melted ductile iron. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 51, n. 1, p. 150-163, 1995.

A cavitação e a ventilação, como condições previstas e observáveis durante a operação de uma embarcação, podem ser minimizadas no projeto. Os hélices podem ser construídos com artifícios que suavizam a passagem de fluido pelas pás ou evitam a ocorrência dos fenômenos descritos. Dentre esses artifícios, destacam-se o *cupping* e o *rake.*

O *cup* é o encurvamento que se dá ao bordo de fuga de uma pá a fim de evitar a passagem de fluxo de zonas de alta pressão para zonas de baixa, impedindo assim a formação de bolhas de vapor no fluido. A estratégia de *cupping* reduz a probabilidade de ocorrência da cavitação e aumenta a eficiência do propulsor em rotações mais altas. Já o *rake* é um ângulo de inclinação para vante ou para ré imputado à pá, de modo que ângulos maiores implicam em melhor habilidade do propulsor para trabalhar próximo à superfície, pois o surgimento de ventilação e cavitação é evitado. As modificações descritas ajudam a preservar não apenas a estrutura e operacionalidade do hélice, mas também reduzem os efeitos vibratórios e esforços deles decorrentes em toda a estrutura da embarcação.

2.3.2 corrosão

A corrosão é um dano de origem química ou eletroquímica no material. Geralmente, a corrosão se realiza na presença de água, por um processo de oxirredução. Porém, pode ocorrer também pelo ataque de um agente químico diretamente no material, sem transferência de elétrons entre as áreas, a chamada corrosão seca. Alguns fatores que influenciam a corrosão de um componente são composição química dos materiais, a temperatura, os gradientes de temperatura e os constituintes do meio. O processo corrosivo pode ser determinante para a ocorrência de falhas, como explica Zolin:

> A corrosão pode causar a falha diretamente ou facilitar para que ocorra outra. Affonso (2002) afirma que uma aplicação específica determina a quantidade de material (metal) que pode ser perdida na corrosão para que possa ser considerada falha. Existem situações em que uma grande perda de material não influencia de forma considerável a execução das atividades, como é o caso de caçambas de guindaste. No entanto, ataques relativamente pequenos, alveolares, podem atravessar o corpo de uma válvula e provocar grandes vazamentos.[6]

O ataque corrosivo por si só, sem tensões superpostas, comumente provoca o aparecimento de pites na superfície do material, que causam redução na resistência à fadiga da peça. Porém, quando a corrosão é combinada com um carregamento em fadiga, há uma redução muito superior nas propriedades do material, maior que a produzida pela corrosão

[6] ZOLIN, Ivan. **Curso técnico em automação industrial**: ensaios mecânicos e análises de falhas. 3. Ed. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Santa Maria, 2010. p. 91.

prévia da superfície. O ataque corrosivo, associado à condição de fadiga, acelera a taxa propagação de trincas por esse tipo de falha. O mecanismo de formação das trincas por corrosão está relacionado à presença dos pites; o fundo desses entalhes na superfície do material é mais anódico que o resto do metal, de modo que a corrosão se propaga para o interior da peça. A destruição do filme de óxido, decorrente da deformação cíclica provocada pela fadiga, também ajuda no crescimento da profundidade dos pites. Quando o pite se torna suficientemente pontiagudo para produzir uma grande concentração de tensões, a trinca é nucleada.

Para evitar falhas provenientes do desgaste corrosivo, a escolha de material para o serviço sujeito a esse processo deve ser baseada mais nas propriedades de resistência à corrosão que nas propriedades de fadiga convencionais. É possível ainda proteger um metal escolhido através de coberturas (metálicas ou não metálicas), desde que essa cobertura também possa resistir às deformações cíclicas sem se romper. Coberturas de zinco e cádmio se mostram bem sucedidas no aço, assim como a nitretação e o jateamento de areia. A corrosão é uma das principais preocupações na preservação da estrutura de embarcações, pois a água salgada e a própria salinidade do ar têm a capacidade de danificar componentes estruturais externos e internos.

2.4 Fragilização da estrutura

A fragilização de uma estrutura metálica ocorre quando esse componente perde sua resistência, ou, em outras palavras, tem o valor de seu limite de resistência à tração diminuído, por efeito de elementos fragilizantes ou quando submetido a temperaturas extremas (a maioria dos metais se fragiliza a frio). Esses dois tipos de fragilização se manifestam de maneira distinta, portanto, embora suas consequências sejam semelhantes, serão analisados separadamente nas seções que se seguem.

2.4.1 fragilização por efeito químico

Determinados elementos têm a capacidade de diminuir a resistência de materiais metálicos. O hidrogênio é o principal desses elementos, capaz de enfraquecer metais, diminuir sua ductilidade e provocar a ocorrência de trincas, mesmo sob a aplicação de tensões bem abaixo da tensão de escoamento do material, levando-o até mesmo à ruptura. A fragilização causada por ele está relacionada a aços carbono de alta resistência e baixa liga.

O hidrogênio é um elemento de diâmetro atômico muito pequeno, que possui ainda grande mobilidade no estado sólido. Essas duas características lhe conferem a capacidade de difundir-se em materiais metálicos, dissolvendo-se no estado atômico. Os átomos de hidrogênio tendem a se concentrar em pontos de imperfeições do metal, sejam elas cristalinas (como discordâncias e vacâncias) ou na microestrutura metálica (como os contornos de grãos), além de imperfeições criadas pela própria ação do hidrogênio absorvido. Alguns fatores que influenciam nessa difusão de hidrogênio são a temperatura, o gradiente de concentração do elemento, o gradiente de força aplicada ao material, a espessura ou sentido dos grãos no material, a composição e estrutura do material, o tipo de tensão aplicada e inclusões não metálicas.

O processo de formação ou expansão de trincas de trincas provocado pelo hidrogênio está associado à absorção, difusão e concentração do H^+, que expande o retículo cristalino e outros defeitos. Quando os átomos se combinam, a formação da molécula de H_2 produz um aumento de volume nas imperfeições, dando origem às fissuras e trincas. A dilatação provocada pelo hidrogênio tem efeito semelhante a um estado de intensas tensões traxiais submetidas ao material. O elemento se difunde no contorno dos grãos e passa a migrar para regiões de concentração de tensões, gerando um ação em cadeia em todo o metal, até que a pressão em seu interior aumente a ponto de exceder a resistência do metal base e criar rupturas na superfície. Surge assim um ciclo pressão → ruptura → difusão que leva o componente a romper-se totalmente, o que acontece normalmente horas após a primeira aplicação de tensão.

A principal fonte de hidrogênio, em se tratando de embarcações, é o próprio processo corrosivo, descrito anteriormente. A semi-reação que descreve a formação de H^+ é indicada por:

$$\mathbf{Fe + H_2O \rightarrow FeO + 2H^+ + 2e^-}$$

Durante a reação de deposição eletrolítica sobre o aço, os íons H^+ são formados e o hidrogênio também pode ser absorvido. A fragilização do metal em si é provocada pelo íon de hidrogênio, pois o hidrogênio molecular não consegue se difundir devido ao seu diâmetro e à estrutura cristalina do aço; porém, em defeitos ou vazios do metal base, o hidrogênio iônico se combinará e sua forma molecular (H_2) será produzida, dobrando o tamanho do conjunto. Essa expansão provocará o rompimento no arranjo cristalino do metal, com consequente propagação da trinca até que o dano no material represente um prejuízo total e irreversível a

sua estrutura. Com relação a esse processo, Chaves explica a questão do efeito químico sobre a fragilização do material através da formação de fraturas:

> É sugerido que, guiado pela Física de Superfícies e pela convicção de que qualquer discussão sobre a atomística das fraturas deve-se enfocar o que realmente será rompido, isto é, ligação química, pode existir um modelo que explique que a segregação de impurezas poderia resultar em uma redução da intensidade das ligações químicas ao longo dos contornos de grãos. Se um caminho de fratura segue a interface do contorno de grão, sua causa é uma modificação das ligações nesta área.[7]

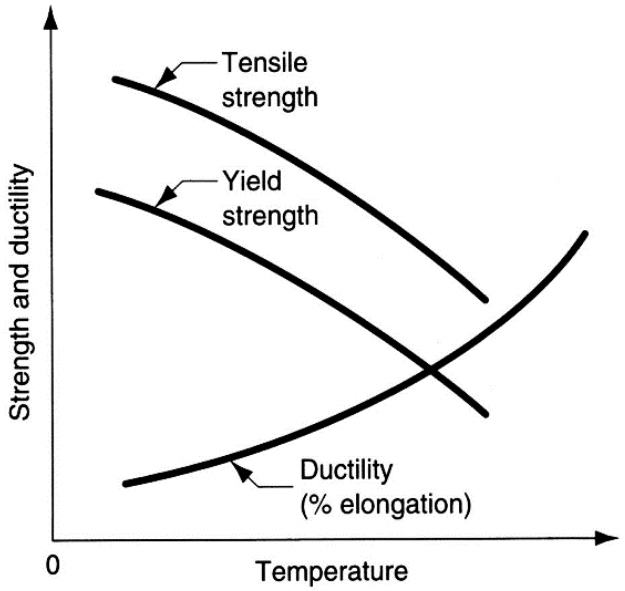
Para evitar a absorção de hidrogênio, ajudando assim a preservar o material metálico, são utilizadas algumas técnicas e tratamentos aplicáveis ao próprio metal. Dentre elas, destacam-se o refino dos grãos (controle do tamanho e da estrutura dos grãos de carbonetos, impurezas segregadas e textura do material, de modo geral), já que a fratura é induzida ao longo de seus contornos; o tratamento térmico de austêmpera, que consiste num tratamento de aços com alto teor de carbono para aumentar sua tenacidade e resistência à fadiga; e a desidrogenação, método que atua na remoção do hidrogênio envolvido em operações de eletrodeposição, conversão química, limpeza ácida ou limpeza alcalina.

2.4.2 fragilização a frio

Aços ferríticos têm a característica de se fragilizarem quando submetidos a temperaturas muito baixas. A diminuição da temperatura leva a um aumento no valor do limite de escoamento do material, tornando-o mais rígido e, consequentemente, mais frágil. A Figura 10 mostra a influência da temperatura na ductilidade dos metais ferríticos. Quanto maior a temperatura, maior a ductilidade e maior a absorção de energia pelo metal antes de sofrer uma fratura. Quanto menor a ductilidade, menos energia será absorvida após o escoamento do material, de modo que o metal tenderá a sofrer fratura frágil.

[7] CHAVES, Rafael Sottili. **Fragilização por hidrogênio em aços carbono**. 2008. 34 p. (Graduação em Engenharia de Materiais) – Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Figura 10: A influência da temperatura na ductilidade (*Ductility*) e no limite de resistência à tração (*Tensile strength*).

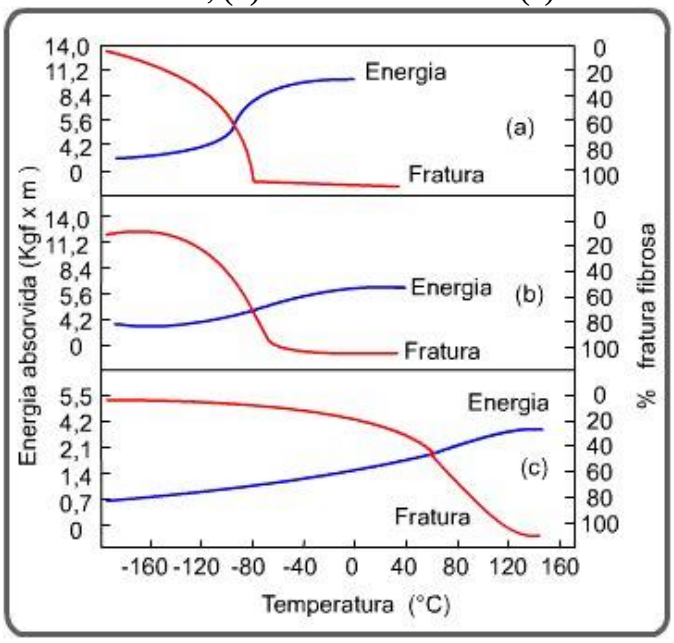


Fonte: D'OLIVEIRA, 2009.

Para cada metal específico está associada uma temperatura crítica, abaixo da qual a fratura sofrida é frágil. Há ainda um campo de transição entre fraturas frágeis e dúcteis, que define temperaturas de passagem de um comportamento para o outro. Para muitos metais, o campo crítico parece ocorrer entre 0º C e a temperatura ambiente (25° C), para outros esse campo se estende bem abaixo de 0º C. O comportamento de um metal relacionado à temperatura ao qual é submetido pode ser melhor analisado através de ensaios de impacto (ensaios Charpy), nos quais é possível dimensionar a energia absorvida por um corpo de prova ao ser impactado por um mecanismo padrão, podendo-se prever assim o tipo de fratura sofrida pelo metal em estudo.

Observa-se que os efeitos da temperatura são mais distintos para metais de baixa resistência. A sensibilidade aos efeitos da temperatura diminui conforme o aumento da resistência do material, podendo não existir uma temperatura de transição. A Figura 11 mostra essa diferença comportamental em aços de baixa, média e alta resistência.

Figura 11: A influência da temperatura no comportamento e na ductilidade da fratura de aços de (a) baixa resistência, (b) média resistência e (c) alta resistência.



Fonte: Blog Inspeção de Equipamentos.

Em termos práticos, é fundamental conhecer a temperatura de transição de um material na elaboração de um projeto, para que se possa prever as condições de serviço e atendê-las sem que ocorra fratura frágil do componente em regime de trabalho.

O efeito da temperatura foi observado em grandes acidentes navais do século XX, como o caso do Titanic e dos navios de guerra americanos da classe *Liberty*. Para compreendê-lo, os fatores que levaram a cada um desses desastres serão analisados em particular nas seções que se seguem.

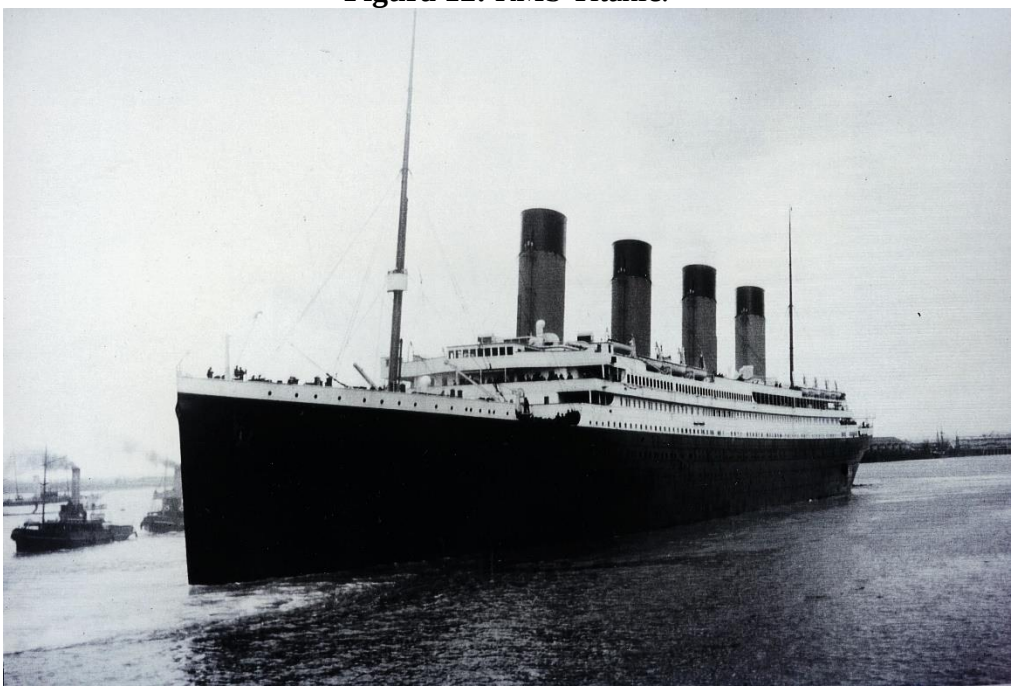
2.4.2.1 RMS Titanic

O RMS Titanic era considerado o símbolo da tecnologia do século XX, superior em luxo e estrutura a todos os outros navios de seu tempo. Em 1911, ano de seu lançamento, o Titanic já detinha o título de maior navio de passageiros do mundo, além de ser considerado inexpugnável pelos especialistas da época, dado o emprego dos mais avançados recursos disponíveis em sua robusta construção. Porém, o navio naufragou em sua viagem inaugural, partindo da Europa com destino aos Estados Unidos, ao se chocar com um iceberg na noite de 14 de abril de 1912. O dano causado pelo impacto em si e consequente água aberta feita pelo rombo no casco seriam tidos como a principal causa do naufrágio, por perda de estabilidade e flutuabilidade, mas investigações posteriores apontaram que fatores até então desconhecidos

pela engenharia da época tiveram uma influência considerável na catástrofe que se sucedeu ao navio.

Para compreensão do acidente, é importante conhecer algumas das características construtivas da embarcação. O Titanic contava 269.04 metros de comprimento, 28 metros de largura e 18 metros da linha d'água ao convés dos botes salva-vidas. Sua propulsão era feita por três máquinas a vapor – dois motores laterais, que giravam os hélices laterais, e uma turbina Parsons central, de baixa pressão, que movia o hélice central –, alimentadas por 29 caldeiras. De suas quatro chaminés de 19 metros de altura, apenas três eram funcionais, servindo a quarta para fins meramente estéticos, conferindo imponência à embarcação. A construção do casco, porém, foi um dos fatores mais determinantes para os eventos que levaram ao naufrágio. O navio possuía casco rebitado, sendo que cerca de três milhões de rebites, pesando 1.5 quilogramas cada, uniam as placas de três centímetros de espessura do chapeamento. A Figura 12 mostra, externamente, a estrutura do RMS Titanic.

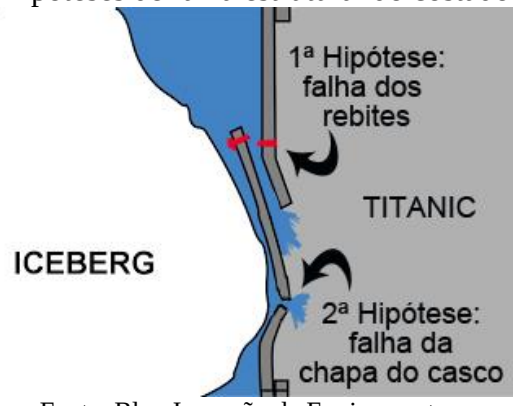
Figura 12: RMS Titanic.



Fonte: Google Imagens.

Durante a análise dos motivos que culminaram no desastre, foram criadas duas vertentes a respeito dos danos causados pelo choque do iceberg com o costado. A primeira considerava falha nos rebites que seguravam as placas e a segunda acreditava em falha da própria chapa do casco. A Figura 13 ilustra essas hipóteses.

Figura 13: Hipóteses de falha estrutural do costado do Titanic.



Fonte: Blog Inspeção de Equipamentos.

A primeira hipótese foi analisada através de estudos que se iniciaram nos anos 2000 com Tim Foecke e, em seguida, Jennifer Hooper McCarty, ambos metalúrgicos americanos, que se concentraram na análise sobre a composição dos rebites do navio. Com base em registros históricos dos estaleiros da Harland and Wolff, em Belfast, na Irlanda do Norte, onde o Titanic foi construído, e em novos conhecimentos adquiridos na metalurgia, chegou-se à conclusão de que os rebites utilizados não possuíam constituição uniforme, além de não terem sido inseridos de maneira igualmente espaçada pelo costado. Foecke e McCarty descobriram que os rebites da parte da frente e da parte traseira, feitos de ferro, equivalentes a dois quintos do comprimento total do casco, eram de menor qualidade que os empregados no meio da estrutura, feitos de aço. Além disso, devido à complexidade das curvas do chapeamento, os rebites do costado exigiram que o trabalho de colocação fosse manual, especialmente nos extremos da embarcação, onde a curvatura não permitia a utilização das prensas hidráulicas que inseriram os rebites no meio da estrutura.

Os rebites de ferro, que possuíam qualidade inferior, eram mais baratos em relação aos de aço, mas tinham em sua composição uma maior concentração de escória. Essa impureza é um rejeito do processo de fabricação dos aços, que, por apresentar propriedades diferentes das do ferro, conferiu vulnerabilidade aos rebites diante das tensões de cisalhamento aplicadas, especialmente por ocasião do impacto contra o iceberg. Testes laboratoriais apontaram que nas cabeças dos rebites podem ter surgido pressões extremas, que teriam permitido a quebra dos componentes e o descolamento das placas de aço do casco – consequentemente, a inundação de diversos compartimentos.

A segunda hipótese, a respeito de falhas nas próprias chapas de aço do costado, sugere o efeito da fragilização a frio na estrutura do Titanic. A temperatura das águas do Atlântico na região do naufrágio, na noite do acidente, era de cerca de 2º C negativos. Testes feitos por metalúrgicos no Canadá, em investigações que se sucederam durante anos após o evento,

sugeriram que o aço empregado nas placas do casco do Titanic tinha sua temperatura crítica, ou seja, temperatura abaixo da qual tornava-se suscetível a fraturas frágeis, em torno de 32º C, valor muito acima da temperatura do meio em que o material encontrava-se imerso. Fica evidente o contraste entre a resistência do material usado na construção do chapeamento do navio e dos aços empregados atualmente, cuja temperatura de transição do comportamento dúctil-frágil é de cerca de 27º C negativos.

A fragilidade do aço empregado no casco do Titanic pode ser explicada por sua composição química, que apresentava um alto teor de enxofre, oxigênio e fósforo, elementos fragilizantes, além de um baixo teor de manganês, que em quantidades maiores aumentaria a ductilidade do metal e o tornaria menos propenso a sofrer fratura frágil. Ensaios de impacto demonstram que o aço do Titanic era dez vezes mais frágil que os de fabricação moderna, ao serem testados à temperatura estimada da água quando o navio colidiu-se com o iceberg.

Um acidente, como resultado de um conjunto de falhas secundárias e circunstâncias que se superpõem, não pode ter suas causas atribuídas a eventos isolados, mas sim a um somatório de efeitos que culmina em danos irreversíveis, cujas consequências muitas vezes não podem ser contidas a tempo de evitar perdas humanas e materiais. No caso do Titanic, a fragilização a frio sofrida pelas chapas do costado, bem como a baixa qualidade e má disposição dos rebites através das mesmas, foram problemas estruturais, decorrentes do projeto deficiente da embarcação, que contribuíram para seu naufrágio. A associação das falhas descritas permitiu uma amplificação do dano produzido unicamente pelo choque do casco contra o iceberg, que abriu um rasgo de mais de 90 metros através do comprimento da estrutura. O navio tinha a capacidade de manter sua flutuabilidade com até quatro de seus 16 compartimentos estanques inundados, mas a extensão da avaria fez com que pelo menos cinco compartimentos ficassem em situação de água aberta. Dessa forma, o dano impingido à embarcação foi suficiente para fazê-la perder estanqueidade e flutuabilidade, culminado inevitavelmente no naufrágio.

2.4.2.2 navios da classe Liberty

Apesar de se dedicar ao estudo de falhas estruturais ocorridas em embarcações mercantes, o presente trabalho analisará também o caso de uma frota de embarcações da Marinha de Guerra americana, à qual sucedeu-se um dano característico de fragilização a frio, com significativo prejuízo material, cujo contexto é aplicável na abordagem que se deseja conferir ao tema deste TCC.

A classe Liberty constituiu uma série de navios militares cargueiros, empregados a serviço dos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial. Esses navios foram um símbolo da produção em massa desenvolvida pelos americanos durante o período do conflito, pois suas plantas adaptadas proporcionaram o surgimento de embarcações de baixo custo e rápida construção. Os navios da classe Liberty possuíam 135 metros, deslocavam 14245 toneladas e eram movidos por duas caldeiras a óleo, que alimentavam o motor a vapor, de 1864 KW de potência.

No contexto da guerra, a grande demanda de suprimentos para as tropas que lutavam do outro lado do Oceano Atlântico exigia que a produção de navios para transportar esses bens economizasse tempo. Por essa razão, os navios da classe Liberty, como tantos outros da época, tiveram sua estrutura soldada, a fim de garantir uma rápida montagem durante a construção. Como foi analisado anteriormente, ao processo de soldagem está associado à criação de tensões residuais, cuja natureza determina efeitos muitas vezes prejudiciais à resistência da estrutura. Porém, esse fenômeno, tal como a fragilização a frio, não era bem compreendido nem considerado durante os cálculos de projeto.

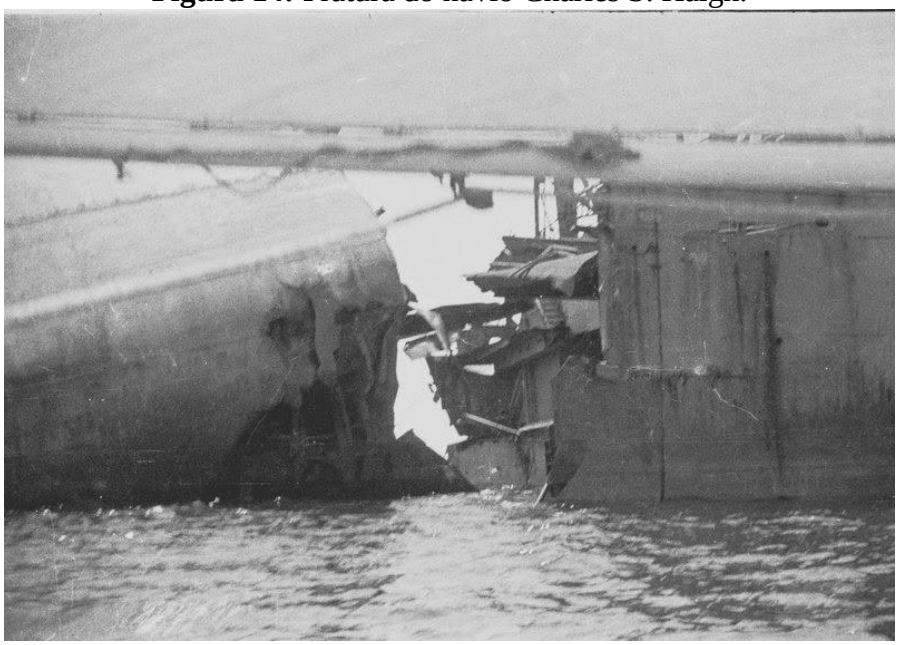
A ductilidade dos materiais está relacionada, entre outros fatores, à presença de impurezas, que podem modificar suas propriedades, e à temperatura a qual são submetidos. O metal que compunha a estrutura dos cargueiros foi submetido a temperaturas de trabalho muito baixas, tornando-o excessivamente rígido e, consequentemente, frágil. Essa foi a predisposição para a ocorrência de fraturas caracterizadas pela baixa absorção de energia – fraturas frágeis –, as quais se propagam muito rapidamente e, portanto, têm consequências catastróficas.

As fraturas frágeis observadas nos navios da classe Liberty manifestaram-se sob diferentes regimes operacionais. Alguns navios fraturaram-se atracados, antes mesmo de iniciar a viagem até o continente europeu, outros fraturaram-se em alto mar, cumprindo sua travessia. O SS Schenectady fraturou-se atracado no píer de acabamento do estaleiro, com o mar calmo. A fratura frágil sofrida foi súbita, e conta-se que o rompimento da estrutura pôde ser ouvido a mais de 1500 metros de distância. Observou-se mais tarde, porém, que todos os casos compartilhavam a mesma condição – perda de ductilidade devido ao abaixamento da temperatura e transição de comportamento dúctil para comportamento frágil.

Dos 4694 navios da classe Liberty construídos, 1289 sofreram fratura frágil, número que representa aproximadamente um terço da frota. Dentre essas falhas, 233 foram catastróficas, gerando perdas totais, e em 19 casos os navios partiram-se ao meio. A Figura 14

mostra o detalhe da fratura do navio Charles S. Haigh, que teve sua estrutura rompida aproximadamente a meia nau.

Figura 14: Fratura do navio Charles S. Haigh.



Fonte: Blog Inspeção de Equipamentos.

É possível observar que a fratura processou-se retilineamente, o que aponta que o metal desfigurou-se muito pouco antes de se romper por completo. Esse comportamento é característico de metais que se deformam pouco (ou não se deformam) plasticamente; porém, o efeito da temperatura pode induzir o mesmo fenômeno em metais que não possuem tal característica, através do aumento da rigidez do material. O metal torna-se excessivamente resiliente e incapaz de absorver grandes quantidades de energia quando impactado, tendo sua faixa de comportamento plástico reduzida ou eliminada.

O desconhecimento de parâmetros fundamentais da metalurgia, como a temperatura crítica e as tensões residuais, foi determinante para o fracasso que se sucedeu às embarcações. Porém, cabe ressaltar que nem todos os navios da classe tiveram o mesmo destino. Muitas embarcações permaneceram em operação mesmo após as falhas estruturais terem levado a pique grande parte da frota.

3 A INFLUÊNCIA DA OPERAÇÃO NA OCORRÊNCIA DE FALHAS ESTRUTURAIS

A ocorrência de falhas estruturais em embarcações, ainda que justificadas por processos naturais conhecidos, como abordado anteriormente neste TCC, também pode estar associada, indiretamente, aos procedimentos adotados pelos operadores que atuam no controle de tais estruturas. Compreende-se então que as tomadas de decisão acerca de manobras ou carregamentos, bem como respostas oferecidas a uma dada emergência, são de responsabilidade do comando da tripulação, além da administração do navio, compreendendo empresas e armadores, e podem corroborar para a ocorrência de falhas estruturais ou para o agravamento de danos preexistentes.

Serão analisados, nas seções que se seguem, acidentes em que a postura decisória dos responsáveis corroborou para que a estrutura da embarcação apresentasse falhas. O tipo mais comum de dano promovido pelo mau planejamento humano certamente é o cisalhamento, que decorre dos esforços excessivos de carregamento. Além disso, a imprudência em arriscar a segurança da embarcação em manobras sob condições desfavoráveis de tempo e mar pode levar à ocorrência de avarias severas na estrutura.

3.1 Carregamentos inadequados

O projeto de um navio deve considerar, além das especificações desejadas de velocidade, autonomia, capacidade e potência, o tipo de produto a ser transportado, a disposição dessa carga e os esforços decorrentes de sua estivagem ao longo da embarcação. Dentre os produtos que oferecem maior risco e, portanto, exigem maior cuidado em seu transporte, estão os granéis, pela influência que esse tipo de carga têm na estabilidade da embarcação e pelos esforços que as operações de carga e descarga podem produzir.

A questão da segurança em graneleiros foi levantada a partir dos anos de 1990 e 1991, quando um pico de acidentes levou a um número inaceitável de perdas de vidas, navios e cargas. Em estudos da International Association of Classification Societies (IACS), percebeu-se que 70% das perdas totais conservavam fatores comuns, como a idade dos navios, superior a 18 anos, e a carga transportada, de minério pesado.

Em um parecer do Comitê Econômico e Social da União Europeia sobre uma proposta de procedimentos harmonizados para a segurança das operações de carga e descarga de navios

graneleiros, fica clara a importância da segurança operacional desses navios, como demonstra o texto introdutório da reunião plenária.

> 1.1. [...] Os graneleiros devem ser movimentados com cuidado tanto nos portos como no mar. Tensões ou avarias acidentais produzidas durante a carga e descarga podem provocar falhas estruturais catastróficas com inaceitáveis perdas de vidas.
> 1.2. Nos últimos anos, é cada vez maior a preocupação com o número de graneleiros perdidos no mar e a correspondente perda de vidas. De acordo com estatísticas recentes, no período de 1990-1998 perderam-se 131 graneleiros e 731 vidas (1). A investigação indicou que a tensão excessiva devida a carga e descarga incorretas e os elevados índices de carregamento efetuado sem controle tinham contribuído para a ruína estrutural no casco que conduzira ao naufrágio dos navios.[8]

A quebra dos navios graneleiros normalmente está diretamente ligada a falhas estruturais no interior dos porões de carga, as quais são provocadas por uma combinação de trincas e corrosões localizadas. A Figura 15 mostra uma trinca identificada durante uma inspeção em um graneleiro. Ela pode ser observada pelo vazamento de água de lastro de um tanque adjacente para o interior do tanque de carga.

Figura 15: Trinca identificada em porão de carga.

Fonte: CANELLA, 2009.

Porém, a causa das falhas estruturais, que geralmente têm efeito catastrófico e súbito, também está intimamente ligada a planejamentos inadequados de carregamento, que

[8] FRERICHS, Göke. **Parecer do Comité Económico e Social sobre a "Proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece normas e procedimentos harmonizados para a segurança das operações de carga e descarga de navios graneleiros"**. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52000AC1181>. Acesso em: 29 jun. 2015.

produzem tensões concentradas em setores específicos da embarcação, as quais levarão à ruptura a partir das trincas ou de pontos fragilizados, nem sempre identificados com facilidade. Para garantir que o carregamento seja feito com segurança e controle sobre os efeitos que o embarque ou desembarque de cargas produz, todo navio conta com um plano de cargas, documento que especifica os porões e seus momentos de estabilidade associados, para cálculo das variações de parâmetros da estabilidade decorrentes da movimentação de pesos a bordo. Um carregamento feito à revelia do plano de cargas pode provocar um desequilíbrio de forças crítico, partindo a embarcação, independentemente do tempo de uso da estrutura.

3.1.1 Trade Daring

O navio graneleiro Trade Daring recebia um carregamento de minério de ferro e manganês no terminal de Ponta da Madeira, em São Luís, no dia 11 de novembro de 1994, quando subitamente sua estrutura entrou em colapso e se partiu.

O cargueiro de 258 metros de comprimento possuía nove porões e tinha capacidade para transportar 145 mil toneladas de carga. O carregamento previsto no terminal em que se deu o acidente era de 139 mil toneladas, das quais 55 mil de manganês e as mais de 75 mil restantes de ferro. Porém, durante o procedimento de carga, já com 83 mil toneladas de granel embarcadas, o navio sofreu uma ruptura completa entre os porões de números 3 e 4.

Durante os inquéritos realizados posteriormente, levantou-se a questão de um plano de carga deficiente. A empresa Vale do Rio Doce afirmou na época que a responsabilidade do plano de carga era exclusiva do comandante do navio. Porém, questionou-se se, através dos encarregados pelo carregamento dos navios em seus terminais, não seria possível reconhecer deficiências e, com isso, alterar o plano elaborado pelo comandante. A declaração dada pelo comandante transfere a responsabilidade pelo acidente à empresa, destacando como principais motivos o fato de que, para a idade do navio, tanto a velocidade do carregamento quanto a altura do equipamento de carga foram fatais para a estrutura da embarcação. Segundo explicações fornecidas para as investigações, o plano de carga foi elaborado pelo pessoal do navio e passou pela avaliação de diversos setores e profissionais, até chegar à inspetoria.

O intercalamento de porões em operações de carregamento é um procedimento básico para garantir a distribuição de esforços ao longo da estrutura. Não é recomendável carregar porões adjacentes ou concentrar a maior parte dos pesos em seções muito próximas, provocando com isso uma desigualdade considerável na distribuição das solicitações atuantes na viga navio. A operação de resgate da carga perdida, realizada nos porões 3, 4 e 5 após o

acidente, parece apontar que tal medida de segurança não foi seguida, já que o minério derramado encontrava-se em seções contíguas.

Convém ressaltar que o Trade Daring já havia recebido um carregamento semelhante, no mesmo terminal, um ano antes do acidente. Na ocasião, foram embarcadas mais de 143 mil toneladas de minério de ferro e, durante as operações, o intercalamento de porões foi plenamente respeitado. Dos 9 compartimentos de carga, os de número 1 (23900), 3 (29950), 5 (28600), 7 (30350) e 9 (30000) receberam minério, ficando os porões 2, 4, 6 e 8 sem peso ou apenas com equivalente em água para efeito de lastro. Observou-se, dessa forma, que o sinistro ocorrido ao navio conservava uma relação profunda com maneira como se escolheu distribuir os pesos a bordo, decisão cabível ao comandante e atestada por autoridades competentes. Pode-se dizer que a ação humana teve um papel significativo no desenrolar dos acontecimentos que levaram o Trade Daring a se partir, ainda no porto.

Como consequência desse acidente e de outros ocorridos com graneleiros na costa nacional, a Autoridade Marítima brasileira, através da Diretoria de Portos e Costas, implementou a Norma da Autoridade Marítima (NORMAM) 04, determinando pela Portaria 007 de 9 de abril de 1995 que fosse feita uma completa vistoria de condições "por Sociedade Classificadoras reconhecidas pelo governo brasileiro" em todos os navios que operassem no país cuja data de fabricação fosse igual ou superior a 18 anos.

3.2 Imprudência

A imprudência dos operadores, a bordo e em terra, pode ser considerada a ação mais recorrente quanto à influência humana em danos estruturais sofridos por embarcações. Prudência pode ser definida como: "1. Qualidade de quem age com comedimento, buscando evitar tudo que julga fonte de erro ou de dano; 2. Cautela, precaução" [9]. Portanto, a falta desse tipo de ponderação fundamental deve ser compreendida, no contexto desse trabalho, por tomadas de decisão equivocadas, precipitadas ou inseguras que colocam a estrutura em situações propícias para a ocorrência de falhas ou agravamento de avarias preexistentes.

A análise de estatísticas e casos em que foi constatada imprudência nos leva a crer que o fator operacional, o qual envolve procedimentos, condução de manobras, apoio portuário, comunicação e toda uma organização logística, está intrínseco em grande parte dos acidentes em que se constata avaria estrutural. Como exemplo desse tipo de situação, segue um trecho

[9] FERREIRA, A. B. H. **Miniaurélio Eletrônico versão 5.12**. 7 ed. rev. Editora Positivo, 2004. 1 CD-ROM.

de um processo encerrado pelo Tribunal Marítimo, em 2006, através do qual se constatou que uma operação mal empreendida foi a principal causa de um acidente que avariou parte do casco do N/M São Luiz, quando a embarcação se chocou contra a estrutura do cais, em processo de instalação, trazendo apenas danos materiais. Concluiu-se que houve imprudência dos representados, sendo eles o Comandante do navio e o prático que acompanhava a manobra.

> Considerou que os fatores, humano e material, não contribuíram, que o fator operacional contribuiu, por não terem sido utilizados os rebocadores com os cabos de reboque passados para o navio, para dar maior segurança na manobra de desatracação, e por não recolher a amarra do ferro de boreste, quando o navio havia se afastado do píer. Concluiu que as causas determinantes do acidente foram às falhas de procedimentos na manobra de desatracação. [...]
> Na Ficha de Registro de Colisão, fls. 49 a 54, preenchida pelo comandante do navio, no item 10, causa provável do acidente, consta: "falha do prático na manobra, não usando adequadamente os meios disponíveis. Idade avançada, comprometendo a sensibilidade e o reflexo para a manobra. Dificuldade na dicção, ao transmitir as ordens, e no uso do VHF, em contato com os rebocadores. Não ter virado o ferro (colhido a amarra no momento em que o rebocador Vitória empurrava a popa para fora do cais)".[10]

Decisões e julgamentos imprudentes podem partir não apenas da tripulação, mas das diversas autoridades e profissionais que zelam pela segurança na operação de uma embarcação, estando ela em regime de manobra ou de viagem. A seguir, será analisado um caso emblemático, em que uma avaria provocada teve suas dimensões amplificadas pelos procedimentos adotados após a identificação do problema, causando grandes danos ao meio ambiente e prejuízos econômicos às regiões afetadas.

3.2.1 M/T Prestige

O petroleiro Prestige teve sua história marcada pelo desastre ambiental que uma falha estrutural no navio provocou em águas sob jurisdição da Espanha. O afundamento da embarcação e consequente derrame da carga provocou uma imensa maré negra, que afetou uma extensa faixa da costa compreendida entre o norte de Portugal e a França, tendo especial incidência na região da Galícia.

---

[10] BRASIL. Processo nº 20.999/04 Acórdão. N/M "SÃO LUIZ". Colisão com estrutura do cais, em processo de instalação, em porto Trombetas, da Mineração Rio do Norte, com danos materiais, sem vítima e sem registro de poluição ao meio ambiente. Imprudência dos representados. Condenação. **Tribunal Marítimo,** Rio de Janeiro, 16 fev. 2006. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/20999.PDF>. Acesso em: 30 jun. 2015.

O Prestige, navio de casco simples, foi construído em 1976, deslocava 42 mil toneladas e transportava 77 mil toneladas de dois tipos de *fuel oil* por ocasião do acidente. A embarcação, então com 26 anos, havia carregado em São Petersburgo, na Rússia, e partira em direção ao Canal da Mancha, quando, na região do Golfo de Biscaia, enfrentou uma tempestade que lhe rendeu uma severa avaria em um de seus 12 tanques de carga. O Comandante do navio, Apostolos Mangouras, tomou as providências cabíveis, enviando um pedido de socorro e alterando o rumo para um porto seguro a fim de evitar maiores danos.

A terra mais próxima seria região de Finisterra, mas o Prestige, já avistando a costa, foi obrigado a retroceder e se afastar, por ordens das autoridades espanholas. As condições climáticas pioravam e, consequentemente, aumentava o risco de que a avaria se estendesse. O navio, por fim, apagou completamente e ficou à deriva. Equipes de resgate foram acionadas e, dos 27 tripulantes, apenas o Comandante, o Imediato e o Chefe de Máquinas permaneceram a bordo para tentar conter o sinistro. Durante várias horas, foram feitas tentativas de rebocar a embarcação, mas, em mar aberto, a fenda no casco abriu-se ainda mais. A 250 quilômetros da costa da Galícia, o desastre tornou-se inevitável. As condições do casco se deterioraram rapidamente até a ruptura completa da embarcação.

O Prestige havia passado por sua última grande inspeção em 1998, quatro anos antes do acidente. A classificadora do navio, American Bureau of Shipping (ABS), havia liberado a embarcação, mesmo que alguns navios da mesma classe, como Alexandros, Centaur e Apanemo, tivessem ido para corte entre os anos de 1999 e 2002 por apresentarem falhas estruturais a meia nau, na altura das cavernas 61 e 71, justamente o ponto onde se partiu a estrutura do Prestige. A Figura 16 mostra a emblemática foto do afundamento do navio, onde é possível observar a ocorrência da falha aproximadamente à metade do comprimento da embarcação.

Figura 16: O afundamento do petroleiro Prestige.

Fonte: Google Imagens.

Durante as investigações, foram colhidos depoimentos fundamentais, como do Capitão Mangouras, que declarou que “autoridades espanholas mandaram o navio para o mar aberto”, ao invés de conduzi-lo a um local abrigado onde a retirada da carga pudesse ser feita. Em seu interrogatório, o Comandante também reconheceu que teve momentos de pânico, admitindo não saber se o seu navio respondeu a todos os apelos da Torre de Controle de trafego marítimo de Corunha. As investigações não chegaram a resultados conclusivos sobre os responsáveis por um dos maiores desastres ambientais ocorridos na costa europeia.

O caso do Prestige foi um dos marcos para a reformulação de exigências legais quanto à estrutura de petroleiros que navegavam pela costa europeia. Além disso, ficou registrado como um exemplo de imprudência, a qual não apenas corroborou para o agravamento de uma falha estrutural, mas foi determinante para ampliar a extensão dos danos ambientais por ela provocados. O operador em questão, que influenciou no avanço da falha, trata-se, mais do que dos próprios tripulantes, das autoridades em terra que deveriam prestar apoio à contingência da avaria sofrida pelo navio.

4 MODIFICAÇÕES NA ESTRUTURA DE EMBARCAÇÕES

4.1 Aprimoramentos na resistência estrutural de navios

Ao longo da história, os conceitos fundamentais nos quais a construção de embarcações se baseou sofreram inúmeras mudanças. Uma das transformações mais significativas que se pode citar foi material empregado na estrutura dos navios; a madeira, utilizada nas grandes embarcações dos séculos XV e XVI, foi substituída por elementos mais resistentes – primeiro o ferro, no século XIX, e posteriormente o aço, que passou a ser largamente empregado a partir de 1870. A propulsão das embarcações, acompanhando o salto tecnológico da solidez estrutural, também sofreu alterações, quando os recursos passaram das velas às rodas propulsoras movidas por máquinas a vapor, substituídas por hélices propulsores após 1845.

Porém, além dessas marcantes modificações, os avanços em conhecimentos da construção naval permitiram sobretudo utilizar os materiais e recursos disponíveis de maneira mais eficiente sob o aspecto da resistência das estruturas. Percebeu-se que o fator mais relevante para determinar a capacidade da embarcação suportar cargas ao longo da estrutura não era apenas a quantidade de material utilizado, mas sim a maneira como esse material era disposto espacialmente no conjunto. Uma demonstração simples do conceito descrito pode ser feita observando-se a resistência de um arranjo de placas de papelão, como mostram as figuras a seguir. Na Figura 17, a placa de papelão, disposta na forma de uma chapa, suporta apenas dois blocos de um peso conhecido antes de ceder.

Figura 17: Experimento com as placas de papelão (1).

Fonte: Filme Gigantes da Engenharia – Navios Cruzeiros [National Geographic].

Contudo, se a mesma placa de papelão tiver seu formato reajustado para ser moldada como uma caixa, a estrutura é capaz de suportar o dobro do peso sustentado pelo primeiro conjunto, como mostra a Figura 18. Com a colocação dos blocos, já é possível notar que a flexão da estrutura devido à carga é consideravelmente menor no conjunto em formato de caixa que no conjunto constituído pela placa achatada.

Figura 18: Experimento com as placas de papelão (2).

Fonte: Filme Gigantes da Engenharia – Navios Cruzeiros [National Geographic].

O primeiro grande passo sob a luz de uma concepção construtiva semelhante foi dado com o projeto do navio de propulsão a vapor SS Great Western, em 1838, que incorporou na parte interna do casco de madeira uma armação de vigas de ferro, formando uma espécie de esqueleto para que a viga navio suportasse melhor os esforços longitudinais de tração e compressão. A mesma lógica observada no experimento tornou-se um conceito fundamental na construção de navios maiores e mais longos, pois o aumento no tamanho da embarcação exige uma estrutura capaz de aguentar maiores esforços de flexão. O navio cruzeiro

Independence of the Seas, construído em 2008, com mais de 338 metros de comprimento (120 vezes maior que o Great Western), utilizou mais de 170 blocos estruturais de aço em formato de caixas rígidas para compor a estrutura da embarcação, os quais foram posteriormente posicionados por guindastes e devidamente ajustados e unidos por macacos hidráulicos. A Figura 19 mostra a colocação de um dos blocos durante a construção do Independence of the Seas.

Figura 19: Construção do Independence of the Seas.

Fonte: Filme Gigantes da Engenharia – Navios Cruzeiro [National Geographic].

A evolução dos procedimentos em construção naval fez com que construção por sistemas cedesse espaço à construção por blocos. O modelo de construção por sistemas, ou modelo tradicional, realiza-se pela montagem dos elementos estruturais na carreira de construção, um a um; o aprestamento é feito parcialmente na carreira, mas sobretudo após o lançamento da embarcação na água. Já no modelo de construção por blocos, os blocos do casco são erguidos em oficina, sendo posteriormente levados à carreira de construção. Esta evolução foi fundamentalmente baseada nos avanços tecnológicos dos processos de soldadura, estando associada ainda a uma maior capacidade dos meios de elevação e movimentação do estaleiro. O aprestamento realiza-se quando o casco estiver completo. As vantagens desse tipo de técnica modular são a rapidez de construção e seu custo comparativamente menor, embora a desvantagem do processo seja a exigência de um nível de coordenação e precisão maior na construção dos blocos.

4.2 Falhas decorrentes de modificações estruturais em projeto

Atualmente, no ramo da construção naval, as modificações são aplicadas como forma de adaptar estruturas já construídas, para que passem a atender novos propósitos, ou mesmo para ampliar sua capacidade de carga, produção e alcance. Plataformas de petróleo e navios podem ser modificados através de transformações em seus projetos originais. Muitas vezes, essas transformações são responsáveis por revigorar uma estrutura já usada por um longo período de tempo, garantindo-lhe assim um novo período de vida útil, tornando-se uma maneira eficiente de reaproveitar a construção e economizar investimentos.

Neste TCC, será analisado um dos principais tipos de modificação estrutural em embarcações mercantes, a adaptação para transição de propósitos, tratando em especial de embarcações que sirvam à perfuração submarina e produção petrolífera. Associados a essas transformações de projeto, serão analisados casos em que alterações estruturais foram responsáveis por acarretar graves acidentes, em função dos riscos trazidos pelas adaptações durante as diversas operações desempenhadas pela embarcação. Modificações estruturais feitas sem a devida consideração dos perigos envolvidos podem aumentar a predisposição a determinadas avarias e falhas, comprometendo não apenas a segurança da construção, mas de toda a tripulação a bordo.

Após o acidente envolvendo a plataforma brasileira P-36, a preocupação com o controle de riscos, ainda na fase de projeto, tornou-se premente. Quando uma embarcação é construída, é necessário avaliar os projetos tanto sob o ponto de vista da operação quanto na visão de segurança e seus recursos de contingência. Tendo início as operações da unidade, toda e qualquer alteração de seu projeto original deve ser analisada criteriosamente quanto ao risco e à confiabilidade da modificação. Para compreender as consequências de modificações estruturais em unidades de perfuração e produção petrolífera, é necessário analisar os tipos de plataformas existentes e os propósitos a que se destinam, além dos riscos envolvidos nas diversas operações que realizam.

4.2.1 unidades de perfuração e unidades de produção

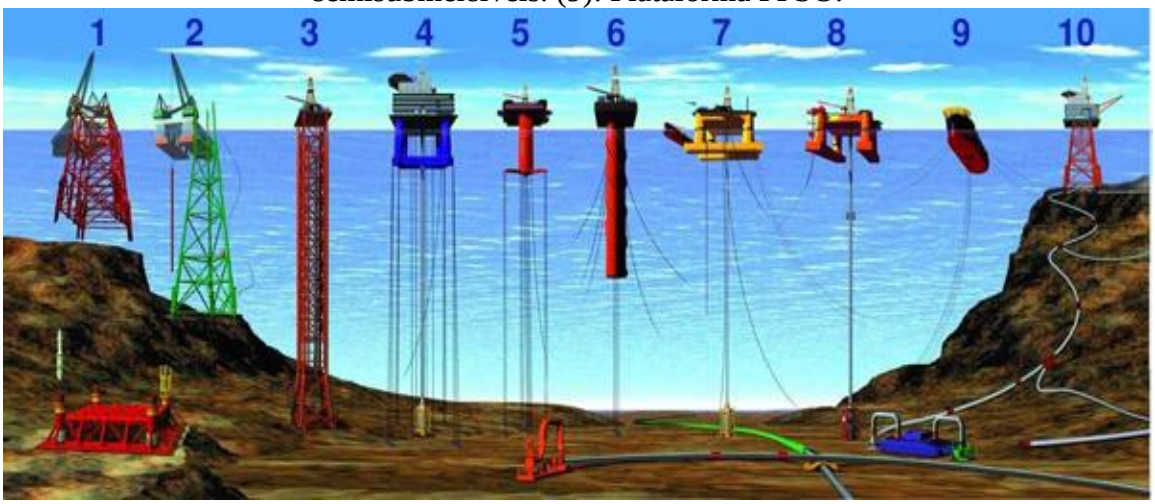
As plataformas de petróleo, segundo seus objetivos, podem ser divididas em dois grandes grupos – plataformas ou sondas de perfuração submarinas e plataformas de produção. A escolha de cada tipo de unidade, dentro de seus respectivos grupos, varia de acordo com as

características inerentes ao campo de exploração, como profundidade, presença de linha de escoamento da produção (oleoduto e gasoduto) e condições climáticas, entre outros.

As plataformas de perfuração são utilizadas para escavar o leito submarino e abrir poços em jazidas de petróleo, destinando-se apenas à viabilização dos reservatórios de petróleo para a produção. Atendem a esse propósito plataformas autoeleváveis, as semisubmersíveis e os navios-sonda. As unidades de produção de petróleo, além de promoverem a extração do mineral, têm a capacidade de beneficiá-lo de forma primária, possuindo para isso equipamentos e setores adequados a seu tratamento, separação de frações, entre outros processos. O grupo de unidades que atendem a esse propósito compreende plataformas fixas, semisubmersíveis, os *Floating Production Systems* (FPS), dentre eles as unidades de *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), e as *Tension Leg Platforms* (TLP).

A Figura 20 mostra um comparativo entre os tipos de plataformas citadas, sejam elas de perfuração ou produção, onde é possível observar diferenças construtivas significativas em cada uma delas.

Figura 20: Tipos de plataformas de petróleo e sua constituição estrutural. (1) e (2): Plataformas fixas convencionais. (3): Torre complacente (semelhante a uma plataforma fixa). (4) e (5): Plataformas TLP. (6) Spar (plataforma flutuante): (7) e (8): Plataformas semisubmersíveis. (9): Plataforma FPSO.



Fonte: Google Imagens.

As atividades de perfuração e produção de petróleo envolvem grandes riscos operacionais. O risco de acidente está atrelado a cada uma das três fases de produção dos hidrocarbonetos em alto mar: a extração, o processamento ainda na plataforma e o bombeamento para navios-tanques.

Para a perfuração de um poço de petróleo é necessário construir um caminho seguro e reforçado através do qual o óleo possa passar. A superfície rochosa em volta da abertura

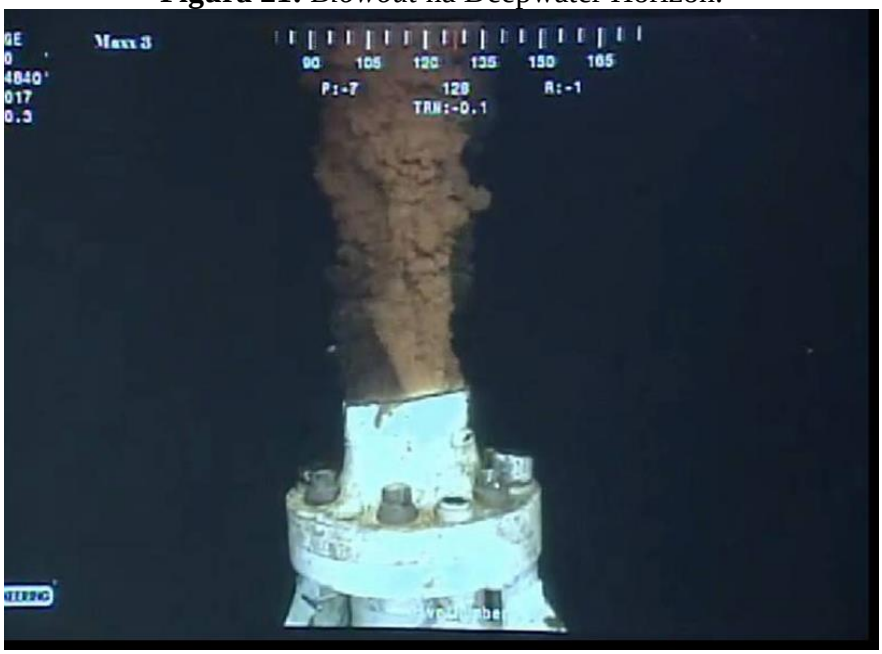
criada pode ser insegura, sendo necessário, após a perfuração de cada trecho, inserir um revestimento de aço para a sustentação das paredes do poço. Antes que o reforço esteja finalizado, qualquer fluido que entre nesse espaço, como gás, detritos e o próprio petróleo, é indesejado e representa risco para a exploração. O gás é o produto mais perigoso na etapa de perfuração, pois pode subir até a superfície, efeito conhecido como *blowout*, e provocar explosões na plataforma.

Para impedir esse problema, é utilizado um equipamento denominado *Blowout Preventer* (BOP), que constitui o principal elemento de ligação entre a cabeça do poço, no fundo do mar, e a sonda, trazendo o poço até a superfície e compondo o espaço anular. O aparelho de BOP tem a finalidade de isolar o ambiente do poço do ambiente do mar, possibilitar desconexão sob controle e com segurança da coluna de *risers* em caso de perda de posicionamento da sonda, bem como permitir o controle do poço quando ocorrer a perda da primeira barreira de segurança (*overbalance* do fluido de perfuração), fechando-o com ou sem coluna em seu interior, entre outras funções.

Dada a importância do equipamento para operações e testes no âmbito da engenharia de poços, pode-se esperar que falhas ou erros de procedimento no controle do BOP provoquem grandes acidentes, como o ocorrido na plataforma de perfuração Deepwater Horizon. A unidade, que sofreu uma explosão no dia 20 de abril de 2010, foi a responsável pelo maior derrame de petróleo da história dos Estados Unidos, além da morte de onze trabalhadores. A companhia petrolífera que operava a plataforma admitiu uma série de erros que podem ajudar a justificar o desastre.

A empresa apontou que a explosão foi o resultado de falhas mecânicas em cadeia e também de erros de engenharia e implementação operacional, além de más decisões humanas. Sabe-se que os eventos que levaram ao acidente estavam relacionados ao cimento que devia tapar o fundo do poço e não cumpriu a sua função, ao resultado de teste de pressão no interior do poço, que foi mal interpretado pelos engenheiros, aos trabalhadores na plataforma demorarem mais de 40 minutos para perceber que havia uma fuga de gás, sendo incapazes de o desviar para fora do poço e também à cavilha de segurança não conteve a saída do petróleo. É possível inferir que parte desses fatores estava ligado à operação do equipamento de BOP. A Figura 21 mostra o vazamento de petróleo através do aparelho, pelo do *blowout*.

Figura 21: *Blowout* na Deepwater Horizon.



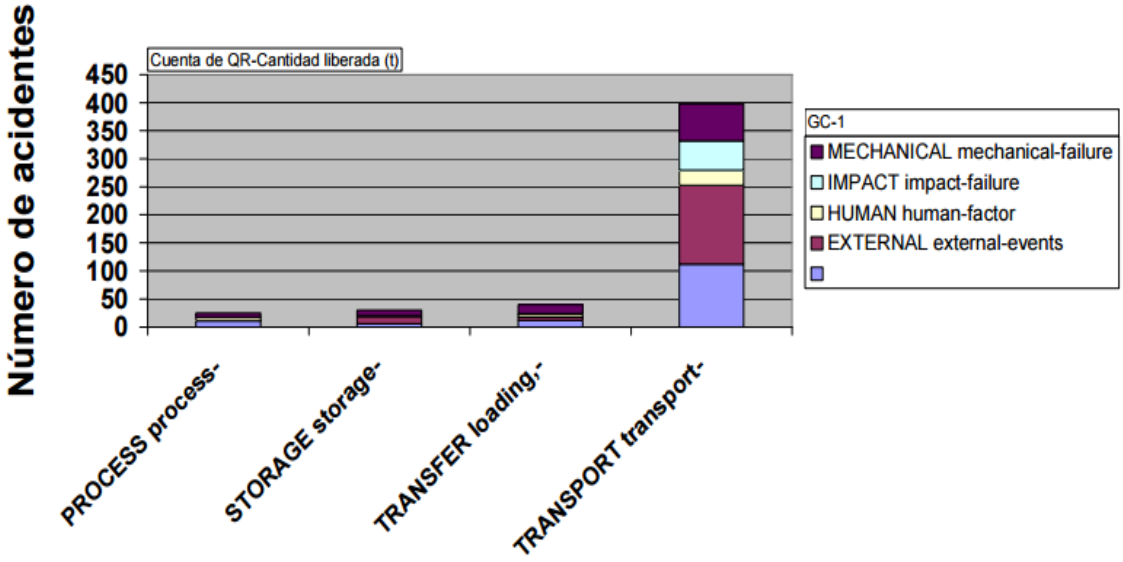
Fonte: GERK, Hermann Regazzi. Curso de Química Ambiental.

Na fase de processamento do petróleo, o grande risco advém da combustão espontânea dos hidrocarbonetos enquanto tratados. É conveniente observar que uma explosão em uma unidade, provocada por esse tipo de acidente, pode atingir grandes proporções muito rapidamente, não apenas pelo volume de hidrocarbonetos manipulados, mas também pelo fato de que a plataforma abriga outros produtos inflamáveis necessários a sua operação e ao pessoal, como óleo diesel, químicos e outros. Um incêndio atinge ainda o meio ambiente (produtos tóxicos da combustão são lançados na atmosfera) e coloca em risco a vida do pessoal. A explosão de tanques, tubulações e outros dispositivos na plataforma pode causar ainda o vazamento de petróleo.

Na fase de bombeamento, os produtos são direcionados a navios aliviadores. Acredita-se que as técnicas utilizadas para a realização dessa operação não permitam a formação de vapores inflamáveis em quantidades perigosas. No entanto, sob determinadas circunstâncias, esse processo pode ser falho e acarretar explosões com severas consequências.

A Figura 22 mostra um gráfico que relaciona a quantidade de acidentes com vazamento de hidrocarbonetos ocorridos em plataformas e as operações durantes as quais aconteceram, além de um comparativo entre as causas atribuídas a cada conjunto.

Figura 22: Número de vazamentos por tipo de atividade e causa.



Fonte: Allianz.

Pode-se observar que a grande maioria dos casos de vazamento de petróleo ocorre durante a fase de transporte, o que indica que, apesar das operações arriscadas descritas, acidentes a bordo das unidades marítimas de perfuração e produção são menos comuns que no percurso do carregamento do mineral aos destinos em terra. É possível observar ainda que, nos grupos referentes a acidentes em processos operados nas plataformas (*process*, *storage* e *transfer*), uma das causas mais comuns são as falhas mecânicas (*mechanical-failure*), ocorridas em equipamentos e na estrutura das unidades.

4.2.2 adaptações em unidades marítimas para transição de propósitos

Adaptações em embarcações são comuns quando se deseja transformar um tipo de unidade em outra, com características distintas. É possível citar os navios petroleiros que, atendendo às necessidades do armador, têm seu casco convertido para tornarem-se plataformas de exploração, através de incrementos em sua estrutura.

Existem diversos motivos que podem justificar a escolha desse tipo de conversão, a despeito da construção de uma unidade inteiramente nova. Dentre eles, destaca-se a pertinência das dimensões da unidade, cuja área do convés principal é capaz de abrigar todos os módulos da planta de processo, o sistema de *offloading*, o balcão de *risers*, a grande quantidade de tubulações de movimentação de carga, o sistema de ancoragem, a superestrutura, o heliporto, o bote de resgate e outros equipamentos necessários a bordo. Quanto maior a área de convés, menor a necessidade de elevação da altura da planta, o que

facilita a operação e contribui positivamente para a estabilidade da embarcação. Além disso, navios petroleiros já são projetados para o armazenamento, característica que é mantida após as modificações; dessa forma são mitigadas possíveis alterações no arranjo dos tanques de carga. Porém, o fator mais importante a ser considerado para a escolha da conversão de navios em plataformas é o econômico. Após a imposição da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) de haver apenas navios petroleiros de casco duplo, cresceu expressivamente o número de unidades que precisariam passar por adaptações, aumentando a quantidade de embarcações atracadas e em desuso e diminuindo assim o custo para sua aquisição. Cabe salientar que as plataformas FPSO não precisam atender a essa regra.

Como ocorre com os navios, um determinado tipo de plataforma também pode ser convertido em outro, de acordo com os interesses a que a unidade servirá. O processo de conversão de plataformas, em especial, receberá maior atenção nas próximas seções deste TCC. Um grande revés na transição de propósitos dessas unidades é a alocação de equipamentos no espaço disponível. Diferentemente dos navios *Very Large Crude oil Carrier* (VLCC) ou mesmo petroleiros convencionais, as plataformas marítimas em geral não possuem uma extensa área de convés para posicionar tanques e tubulações, sendo necessário empilhar componentes vitais em sua estrutura. As colunas de sustentação normalmente recebem reservatórios, aproveitando assim o espaço viável em um elemento estrutural básico, fundamental à sustentação do conjunto.

Serão analisados casos em que a modificações estruturais em plataformas de perfuração, adaptadas ao processo de produção de petróleo, provocaram acidentes catastróficos durante a execução de alguns dos processos já descritos (perfuração, produção e bombeamento). Tais modificações incluem a implementação de equipamentos específicos, reposicionamento de setores, construção e desconstrução de partes da estrutura, entre outros. A esses acidentes foi atribuída a causa de não conformidades operacionais, de manutenção e projeto. Será avaliada ainda a pertinência e confiabilidade das adaptações estruturais quando, em benefício do lucro e da produção, o projeto abre mão de considerações fundamentais sobre a segurança e resguardo da tripulação.

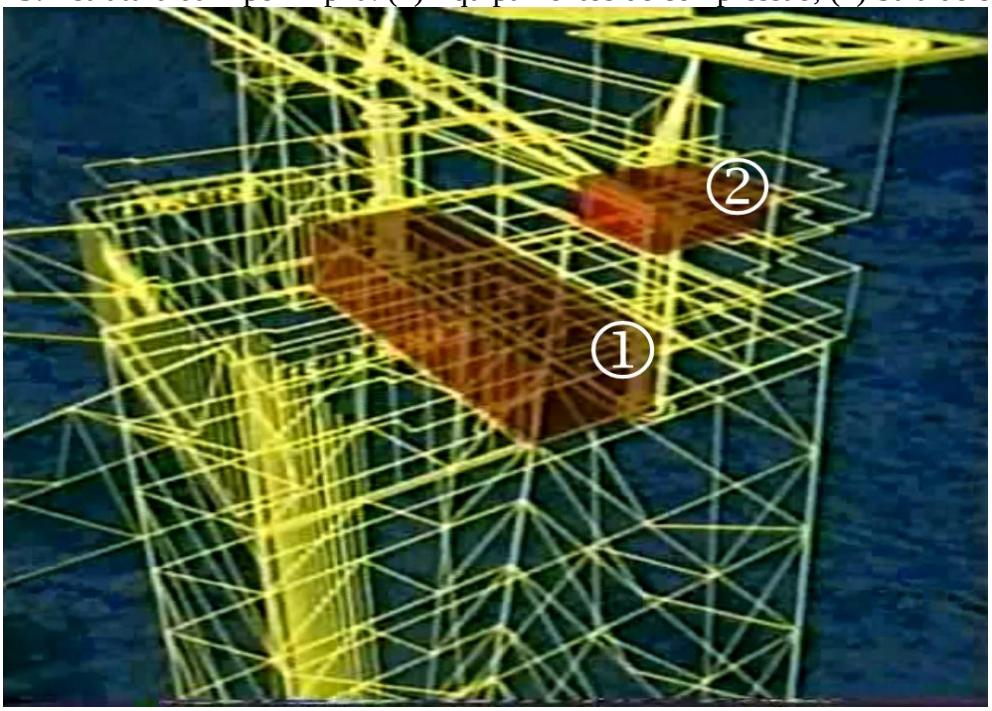
4.2.2.1 Piper Alpha

No dia 6 de julho de 1998, parte da plataforma de produção de petróleo Piper Alpha, que operava no Mar do Norte, explodiu, provocando um incêndio que matou 167 dos 226

trabalhadores a bordo, e levou a estrutura da unidade a colapso. A plataforma estava situada no campo de óleo Piper, em águas de 144 metros de profundidade. Uma vez que a plataforma estava mais perto da costa que outras unidades localizadas na mesma área, tinha duas tubulações provenientes das mesmas conduzindo à sua área de processamento. Ela processava o gás proveniente das outras plataformas mais o petróleo extraído por ela, para posteriormente bombear os produtos para a costa.

A plataforma era constituída por quatro módulos separados por paredes à prova de fogo. As operações mais arriscadas, de perfuração, eram feitas o mais afastadamente possível dos alojamentos dos operários. Porém, quando a Piper Alpha teve seu projeto e estrutura modificados para passar a extrair também gás natural, parte do equipamento de compressão foi posicionado próximo a áreas sensíveis como a sala de controle, conforme a Figura 23.

Figura 23: Estrutura da Piper Alpha: (1) Equipamentos de compressão; (2) Sala de controle.



Fonte: Filme O Desastre da Piper Alpha.

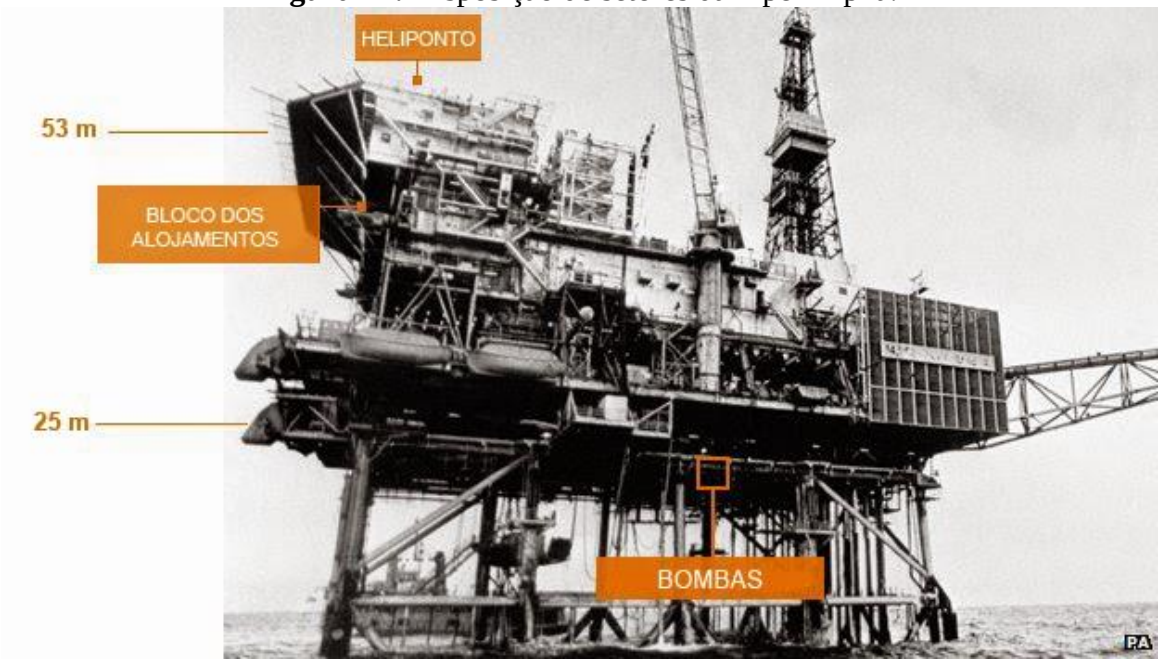
No dia da tragédia, uma das duas bombas que pressurizavam o gás antes de enviá-lo para terra foi tirada de serviço e sua válvula de alívio foi removida para manutenção, tendo a linha sido lacrada temporariamente com uma manilha cega. A válvula não pôde ser substituída até o fim daquele turno e uma permissão de trabalho foi preenchida para explicitar essa situação, já que a bomba de gás ficaria inoperante pela ausência da válvula. Por falhas na comunicação entre os responsáveis pelas operações, devido a um precário sistema de gerenciamento das permissões de trabalho, a permissão a respeito da remoção da válvula não chegou ao conhecimento do supervisor, e os operadores do próximo turno não sabiam da

condição da válvula, que tornava qualquer procedimento com a bomba extremamente inseguro.

Ainda no mesmo dia, a outra bomba de condensado que supria a produção teve um problema e parou. Se não pudesse ser reiniciada em poucos minutos, toda a base deveria ser fechada. Como consequência, por ser alimentada por geradores de combustível a gás, toda a plataforma perderia a potência. Se isso ocorresse durante uma operação de perfuração, a perfuratriz poderia emperrar, o que traria um enorme prejuízo. Sem saber que a primeira bomba estava fora de operação pela falta da válvula, os operadores decidiram reiniciá-la para não parar o bombeamento de gás. Em poucos minutos, a pressão produzida no flange cego provocou o rompimento do lacre e um grande vazamento de gás. O condensado que se formou sobre a plataforma incendiou-se, causando uma explosão de grandes proporções, que gerou incêndios secundários no óleo que chegava à plataforma, provocando o derretimento de tubulações e dificultando a contingência do problema.

Pelo fato de o setor onde ocorreu a explosão estar localizado próximo à sala de controle, a maior parte dos responsáveis por ordenar a evacuação foi morta logo no início do desastre, sendo que vários trabalhadores ficaram presos aguardando as ordens para sair da plataforma. A Figura 24 ilustra, sob outro ponto de vista, a disposição dos setores em que ficavam as bombas e os alojamentos, onde muitos operadores se encontravam.

Figura 24: Disposição de setores da Piper Alpha.



Fonte: Blog Inspeção de Equipamentos.

Entre tantas falhas apontadas para justificar a dimensão da catástrofe, um fator importante foi que as unidades próximas, Tartan e Claymore, continuaram a bombear gás ao

núcleo do fogo, até que a tubulação interligando as plataformas rompeu-se devido ao calor. Os operadores não tinham autoridade para parar a produção, mesmo vendo ao horizonte que Piper Alpha estava queimando.

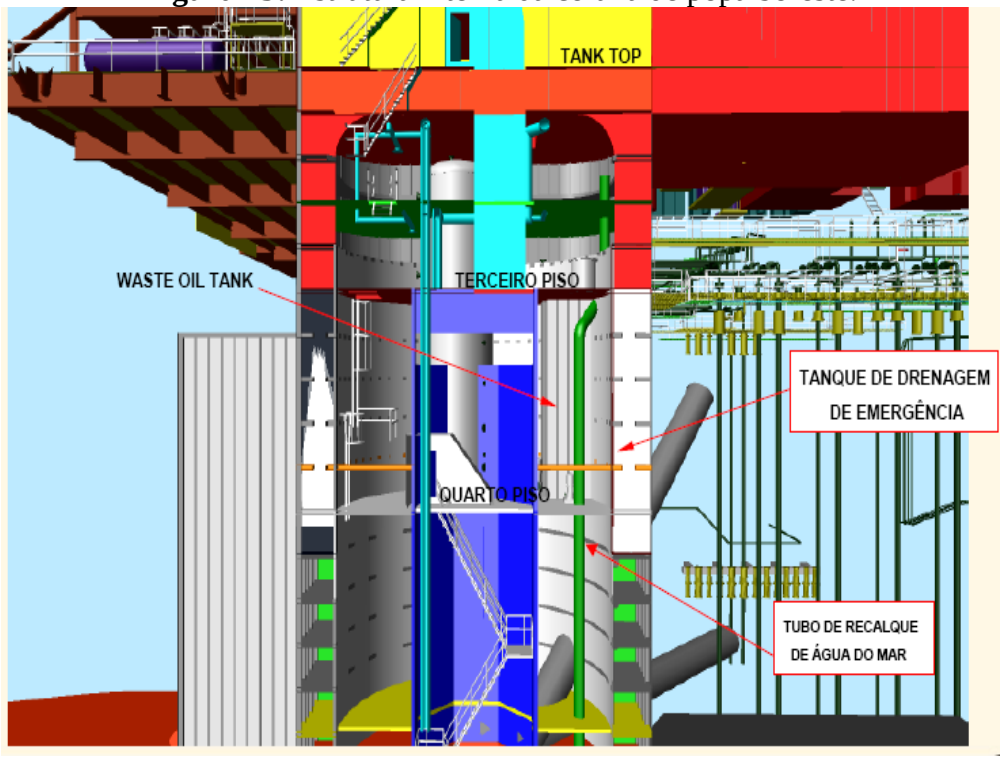
O caso do acidente ocorrido com a plataforma aponta, além de falhas nos sistemas de ordens de serviço e na comunicação, um exemplo emblemático de projeto deficiente, em que os riscos da disposição inadequada de setores não foram considerados. A modificação estrutural que permitiu o posicionamento de uma área de risco, onde se localizavam as bombas de gás, próxima aos alojamentos e à sala de controle, foi determinante para que o número de vítimas fosse tão expressivo. Além disso, a postura adotada pelas plataformas vizinhas demonstra que os responsáveis pela tomada de decisão que agravou a situação do incêndio priorizaram o escoamento da produção em detrimento da segurança diante da situação crítica em que a Piper Alpha se encontrava.

4.2.2.2 P-36

A plataforma semissubmersível de produção P-36, da Petrobras, era a maior do mundo, até seu afundamento no dia 14 de março de 2001. Encontrava-se ancorada em lâmina d'água de 1360 metros no campo de Roncador, na Bacia de Campos, produzindo petróleo e gás a partir de poços situados a uma profundidade de mais de 1800 metros. Para compreender os eventos que levaram a unidade à ruína, após uma explosão numa das colunas de sustentação, é preciso analisar essa estrutura e o posicionamento de equipamentos e tanques em seu espaço.

A parte da estrutura da plataforma onde se iniciou o problema foi a coluna de popa boreste, uma das quatro sustentações estruturais da unidade, que se situava sobre o submarino de boreste, um dos flutuadores do conjunto. No quarto nível da coluna popa boreste havia um tanque de rejeito de água oleosa, que armazenava águas contaminadas por óleo, usadas da planta, e o tanque de drenagem de emergência, incorporado à parede do casco da coluna, sendo responsável por armazenar hidrocarbonetos em situação de emergência ou na eventualidade de manutenção dos separadores da planta de processo. Na coluna de bombordo existia outro tanque, idêntico a esse, em posição equivalente. A Figura 25 mostra esquematicamente a estrutura interna da coluna de popa boreste.

Figura 25: Estrutura interna da coluna de popa boreste.



Fonte: GERK, Hermann Regazzi.

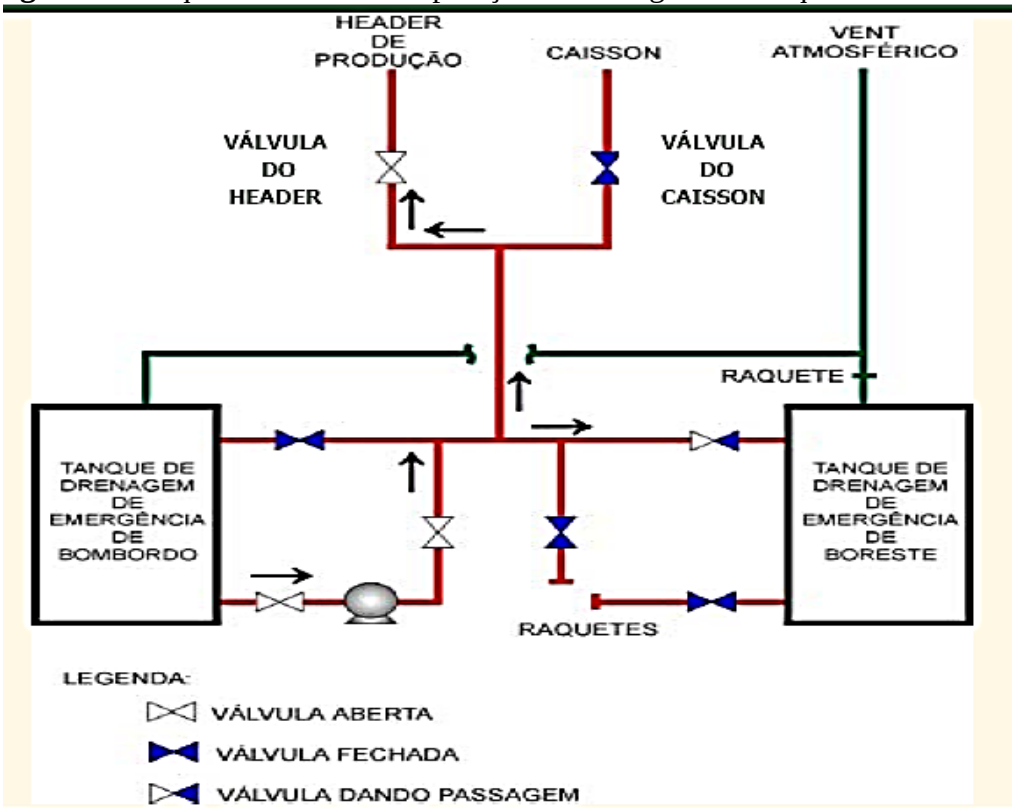
O acidente teve início no tanque de drenagem de emergência da coluna popa boreste, que estava ligado ao sistema de pressão atmosférica da plataforma por um suspiro. No dia 26 de fevereiro, a bomba de recalque, que era associada à válvula de bloqueio de entrada de óleo no tanque, foi retirada para manutenção, sendo tamponadas suas conexões com a tubulação. Posteriormente, no dia 9 de março, o suspiro desse tanque também foi bloqueado. No mesmo dia, o tubo de entrada de hidrocarboneto deveria ter sido igualmente fechado a fim de isolar o tanque.

Antes de iniciar uma operação de esvaziamento do tanque de drenagem da coluna de bombordo, as tubulações de entrada de ambos os tanques, de bombordo e de boreste, foram fechadas, sendo alinhadas as tubulações de recalque do tanque de bombordo para a planta. Porém, uma tubulação que conectava os dois tanques fornecia acesso para que o fluido chegasse à válvula de entrada fechada, no tanque de boreste, a qual, mesmo nessa posição, permitiu a entrada dos hidrocarbonetos no reservatório. Não se sabe se a válvula de bloqueio apresentou defeito ou se a falha foi provocada por uma operação inadequada.

Como as tubulações de recalque dos dois tanques estavam ligadas, o hidrocarboneto da planta de processo retornava pela linha de alimentação do tanque de boreste. O petróleo, liberando gases dissolvidos no interior do tanque de drenagem de emergência de boreste, fez com que a pressão no interior do reservatório aumentasse, devido ao suspiro bloqueado. Ao

iniciar-se efetivamente a operação de drenagem do tanque de bombordo, devido à válvula do tanque de boreste estar permitindo a passagem do fluido, parte da água bombeada fluiu para o tanque de boreste. A Figura 26 mostra a situação descrita, ilustrando as tubulações que uniam os dois reservatórios e a posição das válvulas.

Figura 26: Esquema da falha na operação de drenagem do tanque de bombordo.



Fonte: GERK, Hermann Regazzi.

A água bombeada empurrou o óleo para a linha de alimentação da planta de processo, cessando assim a entrada de hidrocarboneto no tanque de boreste. A água que entrava nesse tanque continuou a aumentar a pressão interna no reservatório, até que a sobreposição de fluidos levou à ruptura do tanque por excesso de pressão, provocando ainda a ruptura da tubulação adjacente de captação de água do mar. A explosão causou danos nos equipamentos, tubulações e dispositivos elétricos e eletrônicos no quarto piso da coluna.

Água e hidrocarbonetos acumulados no quarto nível da coluna de boreste foram levadas pela ventilação até a sala de bombas. Após o acionamento da brigada de emergência, dois técnicos, que abriram a escotilha do terceiro piso para examinar a coluna, permitiram que os gases acumulados fossem liberados e migrassem para os pisos superiores. Logo, com a formação de uma mistura explosiva, ocorreu uma explosão provocada por uma fonte de ignição ou pela combustão espontânea dos gases. A plataforma começou a adernar, inclinando dois graus em cinco minutos. Ao atingir um ângulo de adernamento de 16º, tornou-se

impossível reverter a situação e decidiu-se pelo abandono. Havia 175 pessoas a bordo da P-36, das quais 11 morreram. Os mortos eram todos integrantes da equipe de emergência. A Figura 27 mostra a sequência de quadros que retratam os momentos finais do afundamento da plataforma.

Figura 27: Afundamento da P-36.

Fonte: GERK, Hermann Regazzi.

O inquérito constatou que modificações no projeto original, feitas para que a plataforma passasse de unidade de perfuração e produção apenas para unidade de produção, foram fatores determinantes para que o acidente fosse de tal gravidade, a ponto de fazer sucumbir toda a estrutura da P-36. O trecho do processo do Tribunal Marítimo que levantou os responsáveis pelo desastre explicita os erros no projeto de adaptação:

> Assim, considero a Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS e a empresa Marítima Petróleo e Engenharia Ltda. como responsáveis pelo desenvolvimento, acompanhamento e execução do projeto de conversão da plataforma "SPIRIT OF COLUMBUS" para atender as necessidades impostas pela transformação para possibilitar seu aproveitamento no campo do RONCADOR, na bacia de Campos, RJ, quando foram necessárias substanciais modificações em sua planta original, de unidade perfuração e produção para, exclusivamente, engajar-se como unidade de produção, [...] ficando claramente provado nos autos a existência de erros de projeto cometidos por ambas. [11]

As principais falhas foram quanto ao posicionamento dos tanques de drenagem de emergência no interior das colunas de sustentação, além da existência de uma única linha para drenagem e para esgotamento dos mesmos, sendo que o projeto, normalmente, tem linhas independentes para drenagem e para esgotamento a fim de conferir maior segurança à instalação; determinadas salvaguardas deveriam existir para que uma mesma linha fosse usada, o que não foi previsto no projeto. O texto do processo afirma ainda:

> Não tendo sido realizados estas análises, os responsáveis solidários pelo projeto, a PETROBRAS e a Marítima, através de sua subsidiária AMEC, permitiram que uma condição insegura tenha sido adicionada na alteração do projeto, portanto a possibilidade de ocorrer um vazamento de gás sem que o conjunto estivesse preparado para eventuais falhas de componentes do sistema, o que implicaria, por exemplo, na adequação de equipamentos elétricos para operarem em atmosfera explosiva.[12]

Dessa forma, é possível inferir que alterações de projeto, ainda que legalmente permitidas e tecnicamente exequíveis, podem trazer condições inseguras à operação da unidade e sujeição a falhas estruturais. Apesar de não haver disposições em contrário, redigidas por lei, sobre o posicionamento dos tanques de drenagem de emergência no interior das colunas de sustentação de uma plataforma semisubmersível, concluiu-se que a adoção dessa característica estrutural necessitaria de ressalvas acerca da segurança da instalação, pois a coluna representava um componente fundamental da estabilidade e suporte da unidade.

---

[11] BRASIL. Processo n.º 19.489/01 Embargos Infringentes. "P XXXVI". Não conhecer dos embargos infringentes por falta de suas condições de validade. Arquivamento. **Tribunal Marítimo,** Rio de Janeiro, 19 dez. 2006. Disponível em: < https://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/19489.PDF>. Acesso em: 12 jul. 2015.

[12] BRASIL. Processo n.º 19.489/01 Embargos Infringentes. "P XXXVI". Não conhecer dos embargos infringentes por falta de suas condições de validade. Arquivamento. **Tribunal Marítimo,** Rio de Janeiro, 19 dez. 2006. Disponível em: < https://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/19489.PDF>. Acesso em: 12 jul. 2015.

Qualquer dano a esse pilar seria capaz de comprometer todo o conjunto da P-36, colocando em risco a estrutura e os operadores a bordo. Tais riscos poderiam ser mitigados através de equipamentos extras que pudessem dar resposta a eventuais situações de emergência e falhas, os quais não constavam no projeto de modificação da plataforma.

4.2.2.3 Bombay High North (BHN)

O acidente no complexo de plataformas Bombay High North (BHN), que operava no campo de Bombay High, a 162 quilômetros da costa de Mumbai, na Índia, foi o mais sério, em termos de danos à propriedade, da empresa Oil and Natural Gas Corporation (ONGC). Uma explosão na plataforma, seguida de incêndio, provocou a morte de 22 pessoas a bordo.

Um funcionário da cozinha, a bordo de um navio de uso geral, o MSV Samudra Suraksha, havia quebrado um dedo e precisava de cuidados médicos. Foi impossível transferi-lo para a cidade de Bombay, pois essa se encontrava sob forte chuva (período de monções). Por isso, apesar das condições de vento e mar desfavoráveis, optou-se pela tentativa de transferir o tripulante para a plataforma BHN, que estava próxima, a fim de receber o devido tratamento. Porém, durante a operação, o navio colidiu com o conjunto de *risers* da unidade de perfuração e produção, pelo bordo de atracação. Os MSV são embarcações computadorizadas altamente sofisticadas, com capacidade para lidar com inúmeros tipos de emergências, além de possuírem sistemas de posicionamento dinâmico. Apesar disso, o comandante do navio optou por mudar o comando do sistema para o modo manual, ou seja, para que o controle fosse feito pelo próprio operador, não através de recursos automáticos.

A colisão provocou um rompimento na estrutura da plataforma, vazamento de grande quantidade de óleo e uma explosão, que desencadeou um incêndio. A Noble Charlie Yester, uma sonda de perfuração, de propriedade privada, que se encontrava nas proximidades do local do acidente, também precisou ser abandonada. O MSV permaneceu em chamas, enquanto a plataforma foi completamente perdida em menos de duas horas. Das 384 pessoas a bordo de todos as unidades envolvidas (navio, plataforma e sonda), 355 foram resgatadas. A Figura 28 mostra a plataforma acidentada em chamas. É possível observar, pela intensidade do incêndio no bordo, que o fogo é alimentado pelos *risers* posicionados naquela região da estrutura, onde o navio colidiu.

Figura 28: Plataforma do complexo BHN em chamas.

Fonte: Google Imagens.

O que se conclui com o acidente no complexo de plataformas BHN é mais do que apenas imprudência por parte dos operadores, especialmente do comandante do navio, que tomou a decisão de conduzir manualmente, sob condições adversas de mar e tempo, a operação do sistema de posicionamento, sem a utilização de recursos da automação que pudessem agir como facilitadores da manobra exigida. É possível perceber ainda uma característica insegura na disposição de elementos estruturais da plataforma. Os *risers* estavam posicionados nas extremidades da estrutura, próximos ao bordo de atracação, suficientemente desabrigados a ponto de o navio ser capaz de se chocar com a tubulação por onde passavam fluidos altamente inflamáveis.

Normalmente, os *risers* que conduzem petróleo e gases até a plataforma são alocados no centro do conjunto, de forma que a própria estrutura possa proteger esse componente sensível de grandes impactos externos e outras possíveis avarias. No tocante à legislação, a BHN incorre na mesma questão fundamental acerca dos eventos que levaram ao acidente na plataforma P-36. Não havia disposições em contrário que impedissem a construção adotada, embora a posição escolhida para determinados elementos e equipamentos representasse uma condição insegura sob dadas circunstâncias. Assim como na plataforma brasileira, a unidade marítima indiana foi exposta a situações de risco por um projeto inadequado, em que reveses estruturais foram responsáveis por grandes catástrofes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Falhas estruturais em navios e plataformas offshore estão entre as maiores causas de vazamento de óleo no mar e sempre podendo levar a desastres ambientais. Compreender os fenômenos, naturais ou de caráter indutivo, que levam à ocorrência das falhas é de fundamental importância no intuito de evitar catástrofes que geram perdas materiais e humanas. Estudos em favor desse entendimento ajudam no desenvolvimento de métodos de construção mais seguros e na criação de estruturas mais eficientemente preparadas para suportar adversidades do meio ou decorrentes de eventuais erros operacionais.

Os avanços tecnológicos nas áreas de construção naval, engenharia mecânica, metalurgia e outras especialidades tão caras ao aprimoramento do desempenho e da solidez de embarcações permitiram que, nos dias atuais, fosse alcançado um elevado grau de confiabilidade nesse tipo de estrutura. Comparadas às do século passado, as unidades marítimas hoje possuem maior resistência e versatilidade. Porém, apesar dos conhecimentos adquiridos acerca dos danos estruturais naturalmente suscetíveis a embarcações, do desgaste e comportamento dos materiais sob condições ambientais específicas, bem como do desenvolvimento de políticas de segurança mais rígidas na indústria naval, não se pode afirmar que as embarcações mercantes estejam menos propícias a acidentes provocados por falhas estruturais, já que nem todas as condições de operação podem ser previstas e nem todas as contingências devidamente inibidas.

A regulamentação de aspectos construtivos das unidades marítimas, desde as características dos materiais empregados até a disposição dos diversos equipamentos e sistemas, possibilita a minimização do risco de acidentes ou estabelece padrões que facilitam o controle de eventos inesperados.

No sentido de evitar a ocorrência de falhas mecânicas nas estruturas, é possível apontar os cuidados pertinentes ao projeto e construção de navios e plataformas, em que são empregadas técnicas a fim de reforçar pontos críticos, como os que receberão maior volume de tensões e esforços, além de recursos que visam retardar processos naturais de degradação da estrutura, como a pintura do costado e colocação de proteções galvânicas para atrasar o processo de corrosão das chapas. As embarcações, ainda em sua fase de construção, também passam por um meticuloso controle de qualidade, de modo que cada componente atenda a padrões bem delimitados de aceitação.

Objetivando preservar o conjunto estrutural e detectar possíveis pontos de fragilidade, são empreendidas vistorias e inspeções regulares, também previstas por legislação, através da

Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS). Por esses procedimentos identificam-se trincas, rachaduras, enfraquecimento de partes da estrutura e folgas não permitidas, fatores que prenunciam a ocorrência de falhas, promovendo os reparos cabíveis a cada não conformidade para evitar que os danos sejam amplificados.

Ainda que o tema abordado neste TCC seja a análise de falhas estruturais em embarcações mercantes, as técnicas de prevenção e controle de avarias, que compreendem inspeções e vistorias, bem como aperfeiçoamentos no projeto das estruturas e controle de qualidade, fogem ao escopo do trabalho por se tratarem de um estudo amplo, em que uma análise mais aprofundada se faz pertinente. Pela importância do assunto, e em favor de avanços na área da construção naval, sugere-se que os métodos de prevenção de falhas estruturais sejam abordados como tema principal de outros trabalhos acadêmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. Qualitymark Editora Ltda, 2002. p. 32.

BRASIL. Processo n.º 19.489/01 Embargos Infringentes. "P XXXVI". Não conhecer dos embargos infringentes por falta de suas condições de validade. Arquivamento. **Tribunal Marítimo,** Rio de Janeiro, 19 dez. 2006. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/19489.PDF>. Acesso em: 12 jul. 2015.

BRASIL. Processo nº 20.999/04 Acórdão. N/M "SÃO LUIZ". Colisão com estrutura do cais, em processo de instalação, em porto Trombetas, da Mineração Rio do Norte, com danos materiais, sem vítima e sem registro de poluição ao meio ambiente. Imprudência dos representados. Condenação. **Tribunal Marítimo,** Rio de Janeiro, 16 fev. 2006. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/20999.PDF>. Acesso em: 30 jun. 2015.

BRENNEN, Christopher E. Fission of collapsing cavitation bubbles. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 472, p. 153-166, 2002.

CÂMARA, Marcos Corrêa. **Aplicações de confiabilidade estrutural em projeto e em planejamento de manutenção de navios submetidos à fadiga e corrosão**. 2011. 156 p. (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CANELLA, Hugo de Mattos. **Análise da integridade do casco de navios graneleiros através de modelo computacional.** 2009. 47 p. (Graduação em Engenharia Naval) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CASTRO, Filipe Vieira de. **A Nau de Portugal: Os navios da conquista do Império do Oriente.** Lisboa: Prefácio, 2003.

CHAVES, Rafael Sottili. **Fragilização por hidrogênio em aços carbono**. 2008. 34 p. (Graduação em Engenharia de Materiais) – Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CONTRERAS, Víctor Manuel Palma. **Estimativa de ruído estrutural através de fórmulas empíricas: aplicação em navios e plataformas offshore**. 2013. 111 p. (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, Lucas Vivacqua Ferreira da. **Conversão de VLCC em FPSO**: Implicações Estruturais. 2015. 96 p. (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M**. TM-229 – Introdução aos Materiais:** Propriedades mecânicas. Disponível em: <http://demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/material%20didatico/tm229/TM229%20-%20Propriedades%20mecanicas.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2015.

FALHAS em Estruturas Metálicas: Conceitos e Estudo de Casos. Disponível em: <http://wwwo.metalica.com.br/falhas-em-estruturas-metalicas-conceitos-e-estudos-de-caso>. Acesso em: 20 maio. 2015.

FERREIRA, A. B. H. **Miniaurélio Eletrônico versão 5.12**. 7 ed. rev. Editora Positivo, 2004. 1 CD-ROM.

FRERICHS, Göke. **Parecer do Comité Económico e Social sobre a "Proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece normas e procedimentos harmonizados para a segurança das operações de carga e descarga de navios graneleiros"**. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52000AC1181>. Acesso em: 29 jun. 2015.

GADAG, S. P.; SRINIVASAN, M. N. Cavitation erosion of laser-melted ductile iron. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 51, n. 1, p. 150-163, 1995.

GERK, Hermann Regazzi. **Hidrodinâmica para navegantes.** 3. ed. Rio de Janeiro: CIAGA, 2014.

GOMES, Abrahão da Cruz Mercês. **Critérios determinantes para certificação da qualidade do processo construtivo de embarcações**: um estudo de caso. 2009. 70 p. (Graduação em Engenharia Naval) – Escola de Engenharia**,** Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GOUVEIA, Kátia Cristina. **Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto Charpy**. 2013. 162 p. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário da Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo, 2013.

GUROVA, Tetyana; QUARANTA, Francisco; ESTEFEN, Segen. Monitoramento do Estado de Tensões Residuais Durante a Fabricação de Navios. **Laboratório de Tecnologia Submarina – COPPE, UFRJ**, 2008.

MANZANO, Fabio. **Na terra e no mar, Poli estuda como prevenir falhas em estruturas.** Disponível em: <http://www5.usp.br/41963/na-terra-e-no-mar-engenharia-trabalha-para-previnir-falhas-em-estruturas/>. Acesso em: 20 maio. 2015.

MEDEIROS, Victor Alves de. **O Estado da Arte do FPSO**. 2015. 77 p. (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MOURA, Livia Laranjeira da Rocha. **Área efetiva no cisalhamento em modelos unidimensionais para predição de frequências naturais de vibração de navios**. 2014. 87 p. (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PEREIRA, Carlos Henrique Selle. **Um estudo sobre a dureza e os mecanismos de desgaste de materiais metálicos em altas temperaturas**. 2010. 67 p. (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PEREIRA, Henrique Dias. **Influência da flexibilidade do casco de FPSO no comportamento estrutural de planta de processo**. 2009. 37 p. (Graduação em Engenharia Naval) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

QUEIROZ, Joseane Vieira de. **Análise comparativa de riscos de estaleiros e projetos de construção naval no Brasil**. 2012. 81 p. (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

RIVA, Ikaro dos Reis. **Análise de fadiga de estruturas metálicas com ênfase em offshore**. 2004. 160 p. (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ROCHA, Cláudia Lisiane Fanezi da. **Desempenho em fadiga de arames submetidos ao processo de *shot peening***. 2010. 103 p. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SEGURANÇA e Transporte Marítimo: Análise Crítica de 2014. Disponível em: <http://www.imcgrupo.com/impress/gt/upload/allianz_-_marine_safety_2014.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2015.

SEMANA DA ENGENHARIA MECÂNICA, 23., 2002, Ilha Solteira, SP. **Curso de Análise de Falhas**. Ilha Solteira, SP: Universidade Estadual de São Paulo, 2002.

SILVA, Osvaldo Pinheiro de Souza e. **Modelo numérico simplificado para análise da vibração excessiva no casco, superestrutura e praça de máquinas de navio**. 2011. 56 p. (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

WORKSHOP TECNOLÓGICO, 1., 2012, Campinas, SP. **Programa de Plataformas Tecnológicas FPSO**. Campinas, SP: Organização Nacional da Industria do Petróleo, 2012.

ZOLIN, Ivan. **Curso técnico em automação industrial**: ensaios mecânicos e análises de falhas. 3. Ed. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Santa Maria, 2010.