

## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CAVERNAS NAS TENSÕES SECUNDÁRIAS PESADAS DE UMA EMBARCAÇÃO

Gelson Donadonni de Sousa Carvalho – gdsc.eng@gmail.com  
Universidade do Estado do Amazonas  
Rua Raimundo Nonato de Castro, 773, Ponta Negra  
69037042 – Manaus – Amazonas

Adson de Souza Farias – adsonfarias95@gmail.com  
Instituto de Ensino Leanorte  
Rua Yucatan, 23, Alvorada  
69042222 – Manaus – Amazonas

**Resumo:** O navio é uma estrutura que possui altos custos atrelados a sua construção e operação, e em virtude de um mercado cada vez mais competitivo, se faz necessário buscar novas alternativas, a fim de minimizar os custos e aumentar as margens de lucro. O presente trabalho propõe então, o estudo de uma dessas alternativas, buscando soluções na parte estrutural do projeto, que vão além do conservadorismo que comumente é visto na área. A alternativa consiste então, em um estudo de como as cavernas de uma embarcação podem influenciar nas tensões secundárias pesadas ao serem analisadas por um software de elementos finitos como o SAP 2000, e assim, podermos ou não observar possíveis melhorias que podem ser realizadas através de reduções na estrutura, mas que atenderão os critérios solicitados e deixará a embarcação com um menor peso próprio.

**Palavras-chave:** Navio. Estudo. Estrutura Secundária. SAP2000.

### 1 INTRODUÇÃO

Os navios estão diretamente ligados a história da humanidade. As mesmas sempre proporcionaram aos seres humanos poderem chegar aonde desejassem, poderem enviar ou receber cargas, além de serem utilizadas como demonstração de força, uma vez que elas são capazes de transportar tropas e mantimentos, a relevância de um país em uma guerra durante muito tempo era diretamente ligada com o mesmo possuir uma grande frota.

Naturalmente, ao longo do decorrer da história, a figura do navio passou por mudanças e evoluções, partindo primeiramente de pequenas construções feitas de madeira, onde cabiam poucas pessoas por vez, movidas pela força dos próprios tripulantes ou ainda através da força do vento contra as velas. Em seguida os navios aumentaram em tamanho, permitindo ao homem então percorrer distancias ainda maiores, anos depois dessa escala evolutiva

Nisso surgiu os estudos estruturais ligados ao navio, a importância de garantir que uma embarcação apresente índices de seguranças satisfatórios aos homens que estarão a bordo. Porém, o conservadorismo atrelado a área, ainda nos indica melhorias que podem ser feitas a fim de otimizar ainda mais o projeto de um navio. E para tanto, se faz necessária o conhecimento e estudo mais detalhado, fazendo uma revisão na bibliografia, sobre os conhecimentos obtidos e já empregados de autores já consagrados no que tange as tensões globais e locais que o navio estará sujeito.

A parte estrutural de um projeto de extrema importância uma vez que os custos ligados a mesma sejam enormes, além do fato mais importante que seria a segurança das pessoas que

estarão ligadas a esta estrutura e, portanto, se faz necessário que a mesma seja mais confiável possível.

Na indústria naval, sempre existiram dificuldades em conseguir propiciar uma resistência estrutural adequada para as estruturas flutuantes. Tal dificuldade se elevou quando as embarcações de pequeno porte de madeira foram trocadas por estruturas maiores de metal.

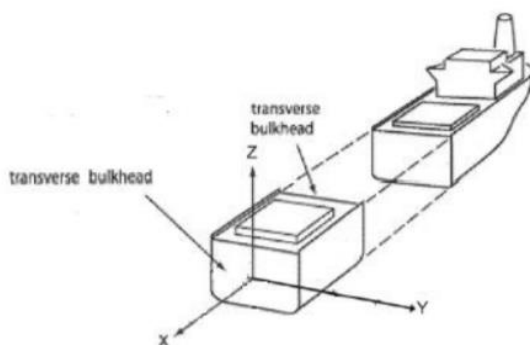
Porém, um navio sendo uma estrutura extremamente complexa e relacionada a altíssimos custos de construção e operação, exigindo então um alto custo de investimento por parte do Armador. Com base nisso, vemos a importância desse tema uma vez que o mesmo se relacione diretamente com a otimização de uma estrutura naval, possibilitando novos estudos que visem uma maior lucratividade no cenário naval com base nos estudos das tensões em estruturas secundárias. As estruturas secundárias correspondem a uma parte importantíssima das tensões em uma embarcação, pois limita os contornos aplicados nas tensões terciárias, e juntamente com a mesma resiste a esforços hidrostáticos locais.

Portanto, este trabalho visa conhecer as tensões reais existentes na estrutura, através da modelagem computacional no software Ansys, permitindo assim um estudo mais profundo do comportamento estrutural utilizando métodos computacionais disponíveis e eficientes, e a verificação das possibilidades de redução de componentes sem afetar as tensões finais visando sempre uma otimização da estrutura em si, que chegue a um senso comum entre armador e projetista.

## 2 O PROJETO ESTRUTURAL

Um projeto estrutural de uma embarcação, quando bem desenvolvido vem com o intuito de fornecer tensões dentro do padrão de segurança atendendo a norma de alguma entidade classificadora pré-estabelecida, levando em consideração a embarcação como um corpo flutuante impermeável alocada de equipamentos, instalações e cargas, e em termos mecânicos, ela pode ser vista como uma viga oca com diferentes variações de seções transversais ao longo da mesma e onde ela estará sujeita a esforços diferentes nos sentidos longitudinal e transversal (comumente adotado no sentido cartesiano como ordenada x para longitudinal e y para transversal) provenientes das diferentes distribuições de forças peso e hidrostáticas atuantes em ambos os sentidos (BARABANOV,1996)

Figura 1 – Orientação de eixos em um navio

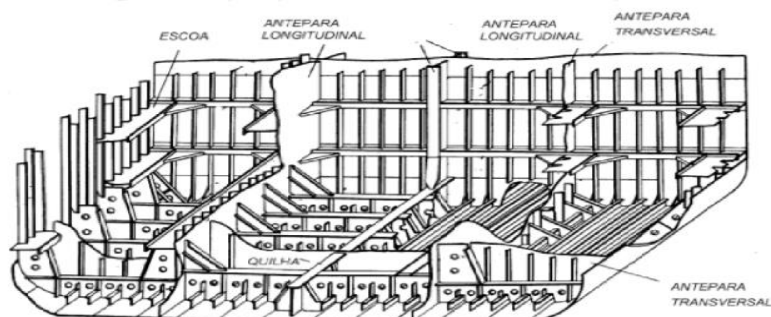


Fonte: Hughes (2010, p. 1.13)

Entretanto, existe a necessidade do projeto estrutural converse com as demais etapas atreladas ao projeto, de forma a não ocorrer um superdimensionamento estrutural, que acarrete em um sobre peso da embarcação, afetando as demais considerações básicas funcionais existentes que devem ser atendidas de forma satisfatórias tais como estabilidade, baixa resistência estrutural, alta eficiência de propulsão além de boas condições de navegação.

Portanto, o tamanho e características principais, e consequentemente todo seu arranjo estrutural, são determinados em função principalmente do seu objetivo de trabalho e das rotas operadas pelo mesmo (Lewis 1988).

Figura 2 – Painel Estrutural Típico



Fonte: Augusto (2004a, p. 4)

Como é visto na figura acima, a fim de atender aos requisitos estruturais preestabelecidos e minimizando o peso próprio, a embarcação deixa de ser apenas uma “casca” vazia, e é adotada uma série de elementos transversais tais como anteparas e cavernas, e elementos longitudinais, ou seja, elementos que terão comprimento no mínimo igual a  $2/3$  do comprimento total da embarcação, são elementos tais como a quilha, escoas e sicordas.

Apesar de essa ser a composição padrão, o arranjo estrutural fica a cargo do projetista então, o melhor estudo dos esforços estruturais em uma embarcação, e feita através da composição de tensões, onde as tensões são divididas entre tensões globais que se originam pela distribuição irregular de carga e geram um momento fletor ao longo de toda a embarcação e as tensões locais provenientes da flexão das chapas e reforçadores tanto transversais quanto longitudinais e que não podem ser analisados de forma global, uma vez que o raio de curvatura dos elementos locais é de uma grandeza inferior quando comparada a estrutura global, permitindo assim que essas tensões possam ser analisadas de forma separada (MARTINS, 2014). Portanto podendo a estrutura pode ser subdividida em três partes: tensão primária, secundária e terciária, porém, faremos apenas uma revisão da tensão secundária nesse trabalho.

## 2.1 T Tensões secundárias

A tensão secundária será responsável pelo estudo estrutural dos elementos longitudinais que reforçam o chapeamento do casco. Esses reforçadores são divididos entre estruturas menores, chamadas de reforçadores leves, e estruturas maiores chamadas de reforçadores pesados, que por sua vez irá gerar duas tensões secundárias, uma leve e outra pesada.

Semelhante a primária, os reforçadores possuem o comprimento bem maior do que suas demais medidas, e podem ser analisadas como uma viga, porém, diferente da viga-navio que

era adotada como livre-livre, os reforçadores são considerados engastados em ambas as extremidades, todos os graus de liberdade travados graças a similaridade de empuxo existente ao longo da seção. A estrutura secundária é calculada de maneira semelhante ao da estrutura primária, com a tensão calculada a partir da distribuição de cargas, porém considerada como um painel complexo composto, apoiado ou engastado nas laterais, em vez de como feixe simples Mathai (2013).

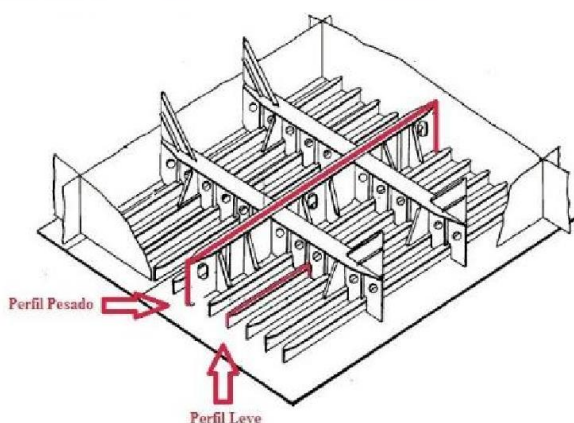
Cada uma dessas vigas é constituída então de um perfil e de uma parte de chapeamento a ele associada, chamada de chapa colaborante (AUGUSTO, 2004a), esse perfil pode variar de acordo com o projeto, os estaleiros, e as facilidades construtivas ou não da região, porém, normalmente é adotado um perfil do tipo "T" como no caso da figura mais abaixo. A chapa colaborante é importante para que se possa adotar a teoria de viga a esse perfil, e o mesmo possui uma dimensão menor do que a largura de carga (espaço entre 2 perfis) existente, uma vez que para a teoria de viga, existe a necessidade de que as seções devam permanecer planas e ortogonais a linha neutra e as cargas transversais na alma causam campos de cisalhamento, tornando a distribuição não uniforme de tensões no flange, e portanto se faz necessária conhecer a porção de chapeamento que efetivamente enrijece o reforçador e apresente uma distribuição de tensões uniformes para que a teoria de viga seja aplicada de forma satisfatória (Augusto 2004a)

A tensão secundária leve ou pesada, vai depender apenas dos reforçadores que estão sendo analisados. Os reforçadores leves, por terem uma dimensão menor, possuem uma rigidez flexional também menor, e são limitados longitudinalmente pelas cavernas, logo o vão livre para esse tipo de reforçador é a distância entre cavernas e os mesmos estarão sujeitas em sua maior parte apenas as pressões hidrostáticas.

Enquanto que os reforçadores pesados, e possuem uma dimensão maior, normalmente são elementos que ligam o fundo ao duplo fundo em embarcações de grande porte e portanto ficam sujeitos a resultante das forças hidrostáticas e da carga sendo transportadas, e possuem uma rigidez flexional maior quando comparada ao perfis leves, justamente por ter uma rigidez flexional maior, sua deflexão não pode ser parada pelas cavernas, uma vez que as cavernas tem a mesma ordem de rigidez não são suficientes para parar essa deflexão, os perfis pesados sendo então travados longitudinalmente pelas anteparas, logo, para esse caso o vão livre adotado será a distância entre as anteparas.

Essas cavernas, ainda que não possuam inercia suficiente para parar a deflexão, influência, em certo modo, e são desprezadas numa análise analítica e conservadora, e sua influência mais especificamente será melhor estudada ao longo deste trabalho testando diferentes modelagens e análises através de elementos finitos, a fim de obter resultados otimizados e não superdimensionamento conservador, como comumente é feito na forma analítica, comparando assim então, a relevância ou não desse estudo.

Figura 3 – Perfis leves e pesados



Fonte: Augusto (2004, p.5)

Por fim, a tensão secundária pode ser calculada de forma analítica através de:

$$\sigma_x = \frac{M Z_n}{I} \quad (1)$$

Onde: M= Momento fletor do carregamento local.

Z<sub>n</sub>= Altura que está sendo analisada a partir da linha neutra.

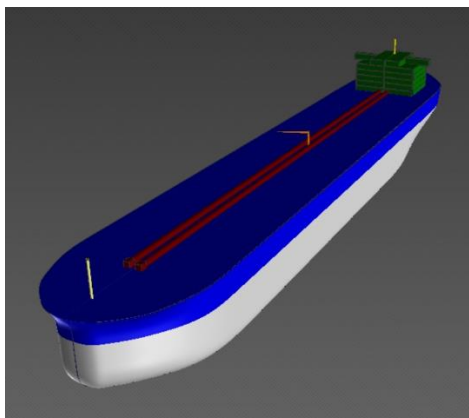
I= Inercia total da viga.

Por essa equação, podemos observar então que o fator Z<sub>n</sub> e I são constantes quando analisamos a mesma viga, em uma mesma altura, ou seja, precisamos procurar variações no momento fletor, uma vez que se as cavernas possuírem influencia a fim de reduzir o momento fletor, o valor da minha tensão secundária consequentemente será menor.

### 3 METODOLOGIA

Para o estudo deste trabalho, foi pego então, o arranjo estrutural de uma embarcação de grande porte, um petroleiro do tipo Suezmax, com uma configuração estrutural clássica, e que foi projetada apenas para atender as solicitações de uma sociedade classificadora, sem se preocupar com a otimização da mesma.

Figura 4 – Modelo 3D do navio utilizado



Fonte: Própria (2018)

Tendo por dimensões:

Tabela 1 – Dimensões do navio

Dimensões	m
LPP	264
Boca	48
Pontal	26,85
Calado	16,6

Fonte: Própria (2018)

Em seguida, foi feito um estudo das tensões, de forma clássica e conservadora, conforme é pedido pelas normas, utilizando apenas apoio do software de planilhas Excel para sistematizar todos os componentes e auxiliar nos cálculos de maneira mais eficiente.

Para essa análise, foi pego um segmento do navio, que correspondia ao espaço dos porões, onde teríamos a maior distância entre 2 anteparas, um espaço de aproximadamente 30 metros, e que tinha um total de 5 cavernas, então foi feita a análise da modelagem de um perfil pesado, que consistia em uma porção de chapa colaborante da chapa do fundo e junto dela um total de 6 perfis leves (3 perfis para cada lado), um elemento vertical que ligava o fundo ao duplo fundo, que representaria a alma da nossa viga, e uma porção de chapa colaborante da chapa do duplo fundo, juntamente de um total de 6 perfis (3 para cada lado) e testado um total de 3 diferentes condições de vínculos entre as cavernas e a viga, além do engaste nas extremidades onde seria a ligação da viga com as anteparas quando essa viga estivesse sujeita aos esforços em virtude do empuxo gerado pela pressão hidrostática em função do seu calado, contra o peso de uma coluna de petróleo de 20 metros que o navio deveria transportar.

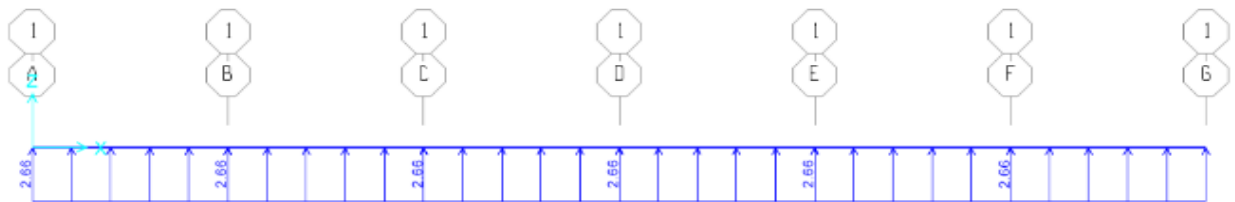
Essa análise foi possível através do recurso de elementos finitos. A análise de elemento finito é um método para resolver equações diferenciais, que consiste em discretizar o sistema sob análise em vários elementos. Os elementos possuem nós que se deslocam com a aplicação de carregamento e podem fornecer respostas sobre o fenômeno que está se estudando. Ela nos fornece resultados de tensão, deformação e deslocamento de uma estrutura, equipamento ou produto sob análise, permitindo um estudo sobre o comportamento antes mesmo do produto ser fabricado, possibilitando então assim a prevenção de futuros erros, isso somado com o poder computacional que vem crescendo cada vez mais ao longo dos anos, e se tornando mais barato e acessível, fazem como que esse tipo de análise seja um recurso importantíssimo no estudo de estruturas e que vem sendo amplamente usado nas grandes indústrias de desenvolvimento de produtos, e que originou então a existência de diversos softwares no mercado que permitam o emprego dessa ferramenta.

O software então adotado para esse trabalho foi um software de análise estrutural e dinâmica, linear e não-linear por Elementos Finitos, conhecido por SAP 2000, que permeia o mercado a mais de 30 anos e que segue a mesma tradição, com uma interface, sofisticada, intuitiva e versátil proporcionada por um sistema de análise estrutural inigualável e ferramentas de auxílio ao projeto, para engenheiros que trabalham com infraestrutura de transporte, obras industriais, públicas, instalações ginásios de esportes, para geração de energia, etc.

Para essa análise, observou-se que o espaçamento entre as hastilhas, e por consequência o local das cavernas, se daria a cada 5 metros, portanto, sendo a extremidade inicial e a final uma antepara, a viga teria então 5 pontos, onde estariam localizadas as cavernas conforme o sistema de coordenada a seguir tendo como direção x, o sentido de comprimento da viga e z, a altura relativa a mesma.

Após estabelecida as distancias e pontos, pode ser aplicado a viga a carga referente a carga resultante aplicada na embarcação, carga essa gerada pela diferença de pressão entre a coluna de petróleo nos tanques, e a coluna de água originada pelo calado da embarcação, sendo essa resultante no valor de  $2,6\text{KN/m}^2$ , tendo assim a seguinte situação.

Figura 5 – viga modelada no SAP



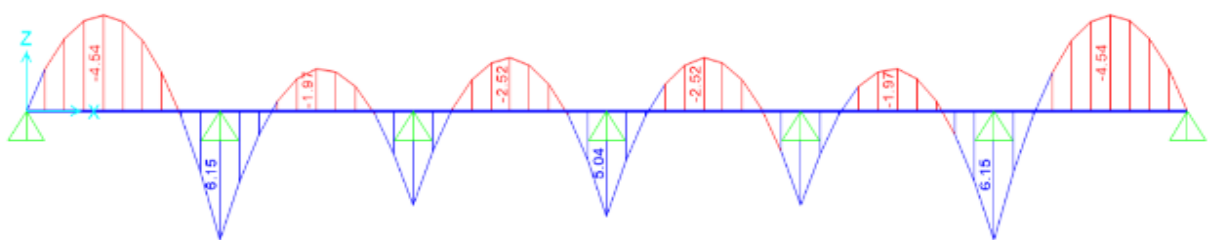
Fonte: Própria (2018)

Onde os pontos A e G correspondem a localização das anteparas, e os pontos B, C, D, E e F correspondem aos locais das cavernas.

#### 4 RESULTADO DA ANÁLISE DO SOFTWARE

Foram testadas então, diferentes vínculos nos locais das cavernas, além de variar os pontos dos locais das anteparas a fim de observar o comportamento da mesma. A primeira condição a ser analisada então, fugindo da maneira clássica no mercado naval, foi de se considerar todos os pontos, de cavernas e anteparas, como apoios, onde admitiríamos então, que as extremidades apesar da grande inercia proveniente das anteparas, não seria suficiente para parar a rotação dos perfis, o resultado obtido foi o seguinte.

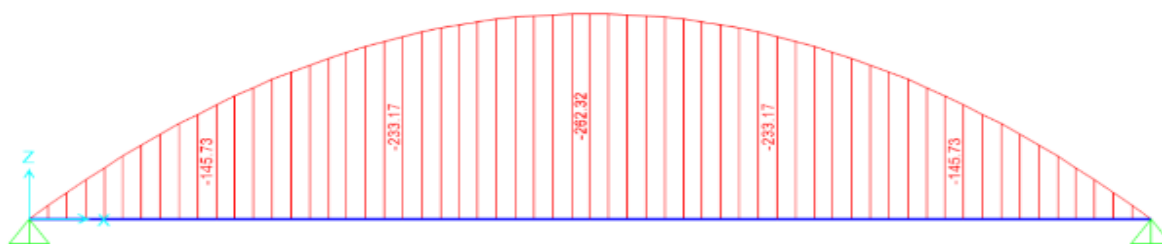
Figura 6 – Viga com apoio em todos os pontos



Fonte: Própria (2018)

Pudemos perceber por essa análise que o perfil estrutural foge muito dos padrões esperados, além de resultar em uma configuração de momento fletor que não é possível de comparar com as outras estruturas, sendo assim, essa hipótese foi desconsiderada. Em seguida, testamos algo semelhante a hipótese anterior, porém sem nenhum vínculo nos pontos das cavernas, considerando apenas os pontos das anteparas com apoios.

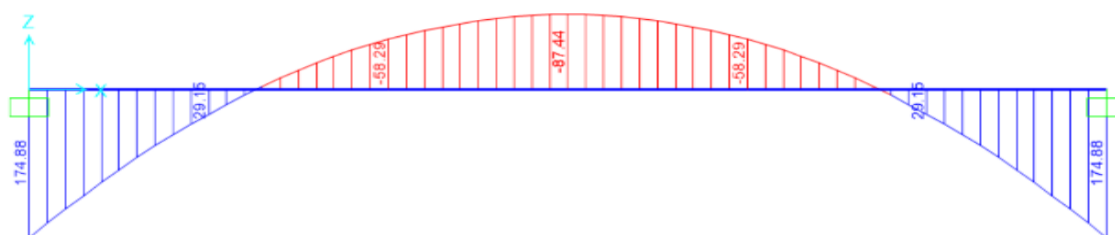
Figura 7 – Viga apenas com apoios nas extremidades



Fonte: Própria (2018)

Novamente, essa hipótese fugiu dos que se esperava, uma vez que a mesma mostrou um comportamento único de tração ao longo de toda a viga, além de dos valores de momento fletor obtidos, serem acima do esperado, e sendo até mesmo acima do que se obteria da forma clássica e conservadora, mostrando assim, que tais resultados estariam extrapolados. Em seguida, optou-se então, por fazer a análise clássica, onde os pontos dos locais das anteparas estariam engastados, ou seja, sem admitir nenhum deslocamento e nenhuma rotação.

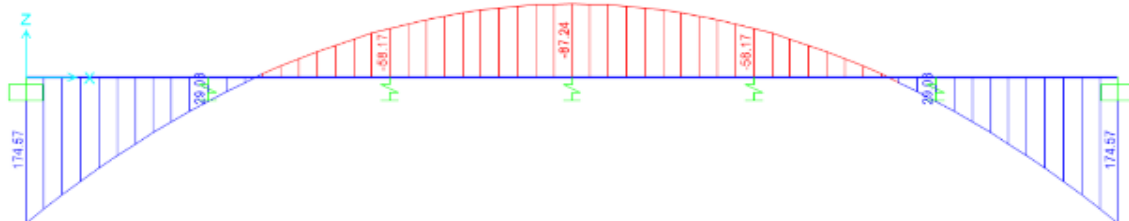
Figura 8 – Viga apenas com apoios nas extremidades



Fonte: Própria (2018)

Agora se pode observar um resultado mais verdadeiro dentro do que se esperava para essa situação de carregamento, onde a viga iria comprimir. Porém, apesar desse vínculo se mostrar mais fidedigno, acreditasse que os momentos fletores estejam superdimensionados. Por fim, foi testado uma condição onde as extremidades das anteparas tivessem engastadas, como a nomenclatura naval instrui, porém, foi colocada molas nos pontos das cavernas.

Figura 9 – Viga com engastes e molas de  $k=0,03$



Fonte: Própria (2018)

Essa situação foi a que se mostrou mais coerente, ela mostra um comportamento dentro do esperado, onde a viga se comprime no meio e traciona nas extremidades, além dela atender o esperado, atenuando o momento fletor, uma vez que as cavernas possuam inercia para ajudar a parar a deflexão, mas não para travar o mesmo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final das comparações, pudemos observar uma discrepância significativa entre os momentos fletores obtidos pelas vigas testadas, concluindo assim, que a prática adotada atualmente e comumente no mercado naval não é a mais eficiente, tendo o resultado de engastes nas extremidades e molas nos pontos das cavernas sido o melhor resultado.

A grande chave da questão agora, consiste em realizar estudos mais profundos com testes de campo a fim de determinar qual constante elástica seria apropriada para cada situação. Nesse estudo foi utilizado uma constante de 0,03 KN/m no intuito de mostrar resultados próximos do obtido de forma tradicional, com mesmo comportamento, porém momentos fletores diferentes.

Este não é um estudo finalizando, pelo contrário, apenas existe de forma a mostrar e incentivar novos estudos que visem determinar, quais constantes elásticas podem ser empregadas para as cavernas, a fim de se obter valores condizentes com a realidade, que assim, possam reduzir as tensões finais, permitindo então, que mudemos a inercia da seção, com chapas e elementos menos espessos, que resultaram em resistências satisfatórias, porém com um peso leve da embarcação menor, o que permitirá uma maior alocação de carga ou passageiros, resultando em maiores ganhos, e possivelmente uma melhor competitividade no mercado naval.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS) – “American Bureau of Shipping. Hull Construction and Equipment. Rules for Building and Classing - Steel Vessels, Part 3

ANDRADE, Maria Margarida de et al. Introdução à metodologia do trabalho científico. 1999..

AUGUSTO, Oscar Brito. Proteus: sistema para o projeto racional automatizado e otimizado da estrutura de embarcacoes. 1996..

AUGUSTO, Oscar Brito, Cardoso, Modelo para o Cálculo de Resistência e de Estabilidade de Grelhas, 16°. Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro, 1996.

MANOBRABILIDADE, E. PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM NAVIO PATRULHA DE FORMAS NÃO-CONVENCIONAIS COM CARACTERÍSTICAS SUBMERSÍVEIS: VIABILIDADE. 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO..

CARDOSO, Ademar de Azevedo. Síntese racional automatizada de cavernas de embarcações. 1994. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BARABANOV, Nikita V. Structural Design of Sea-Going Ships. Hardcover, 1966.

BV104 - Norma de Construção para Navios de Guerra, 1981 - DEN-MB.

KANG, Sang-Seob; SEHYUN, M.; HAH, S. H. A design expert system for auto-routing of ship pipes. Journal of Ship Production, v. 15, n. 1, 1999..

FONSECA, Maurílio M. Arte naval. Rio de Janeiro-RJ: Serviço de Documentação da Marinha, v. 1, 2002.

FUSCO, Péricles Brasiliense; LANGENDONCK, Telemaco Hyppolito de Macedo van. Critérios de projeto estrutural dos navios de superfície. 1968.

HUGHES, O.F; PAIK, J.K. Ship Structural Analysis and Design. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.

BONIN - Jorge. Evolução das embarcações. Disponível em <  
<http://jgbonin.blogspot.com.br/2015/07/evolucao-das-embarcacoes.html> >. Acesso em junho de 2018.

JURAS, Ilidia da Ascensão Garrido Martins. Medidas de prevenção de acidentes com navios petroleiros. 2002.

LAMB, Thomas et al. (Ed.). Ship design and construction. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2004.

LEWIS, Edward V. (Ed.). Principles of naval architecture. 1. Stability and strength. Soc. of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.

MARTINS, Rodrigo Silveira de Magalhães et al. Desenvolvimento de uma ferramenta para suporte na análise de tensões longitudinais em estruturas de embarcações convencionais de grande porte. 2016.

MATHAI, Alice; GEORGE JOHN, P.; JACOB, Jini. Direct Strength Analysis of Container Ships. International Journal of Engineering Research and Development, 2013.

HERMANN, Marcelo Paiva et al. Otimização de projeto estrutural para embarcações de grande porte. 2016.

STOPFORD, Martin. Maritime Economics. Third Edition. Routledge, 2008.

TANCREDI, Thiago Pontin. Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TANCREDI, Thiago Pontin. A estrutura primária do navio. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

TUPPER, Eric Charles. Introduction to naval architecture. Butterworth-Heinemann, 2013.

WATSON, David GM. Practical ship design. Gulf Professional Publishing, 2002.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF CAVES ON HEAVY SECONDARY VOLTAGES OF A VESSEL

**Abstract:** *The ship is a structure that has high costs linked to its construction and operation, and due to an increasingly competitive market, it is necessary to seek new alternatives, in order to minimize costs and increase profit margins. The present work proposes the study of one of these alternatives, seeking solutions in the structural part of the project, which go beyond the conservatism that is commonly seen in the area. The alternative is then, in a study of how the caves of a vessel can influence the heavy secondary voltages when analyzed by finite element software such as SAP 2000, and thus, we may or may not observe possible improvements that can be made through reductions in the structure, but which will meet the requested criteria and leave the vessel with less weight.*

**Key-words:** *Ship. Study. Secondary Structure. SAP2000.*