

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BALSA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Thiago Kenji Leão Shinoka, [kenjishinoka@gmail.com](mailto:kenjishinoka@gmail.com)<sup>1</sup>

Arlindo Pires Lopes, [alopes@uea.edu.br](mailto:alopes@uea.edu.br)<sup>1</sup>

Adriana Alencar Santos, [drica.eng@gmail.com](mailto:drica.eng@gmail.com)<sup>1</sup>

Bruno Mello de Freitas, [bfreitas@uea.edu.br](mailto:bfreitas@uea.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Avenida Darcy Vargas, 1200. Parque 10 de Novembro. 69050-020 – Manaus - Amazonas

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo comparar os resultados estruturais um modelo computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos com cálculos analíticos utilizando a Teoria de Vigas, tradicionalmente feitos em estruturas navais. Para atingir este objetivo foi utilizado o software Abaqus, onde uma balsa foi modelada e submetida a diversas condições de carregamento e então seus resultados foram comparados com o cálculo analítico desta mesma estrutura. Os resultados do modelo permite que se visualize a estrutura como um todo com suas regiões mais solicitadas e menos solicitadas, além destes resultados serem menos conservadores e mais próximos da realidade, possibilitando a realização de projetos mais sofisticados.

**Palavras-chave:** Análise estrutural, Estruturas navais, Elementos Finitos.

### 1. INTRODUÇÃO

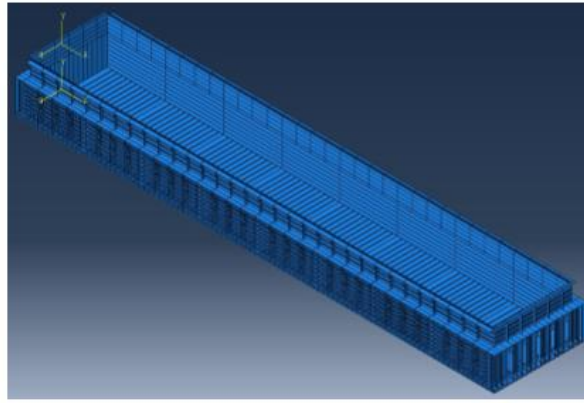
Segundo Hughes et al. (2010), com a evolução das exportações e o crescente destaque do transporte marítimo na economia, movimentando cerca de 95% de toda a carga mundial, os armadores passaram a exigir navios mais eficientes.

Um problema histórico é a incerteza com relação aos carregamentos a que o navio pode ser submetido, sobretudo os de origem na natureza tais como ondas e vento, sendo extremamente difícil prever a intensidade destes a que o navio será submetido em toda sua vida útil. Estes fatores fizeram com que construtores navais se limitassem por muito tempo a construir de forma empírica e a copiar obras anteriores que obtiveram sucesso. A consequência disso foi um mercado muito conservador e resistente a inovação.

Nas décadas recentes, entretanto, com o grande avanço na computação, benefícios enormes na qualidade de projetos de engenharia se tornaram possíveis. A utilização de métodos numéricos que exigem um número muito grande de computações se tornaram viáveis. Projetos estruturais se beneficiaram com análises utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) que permitiram que cálculos estruturais pudessem ser feitos para estruturas complexas com um alto grau de precisão.

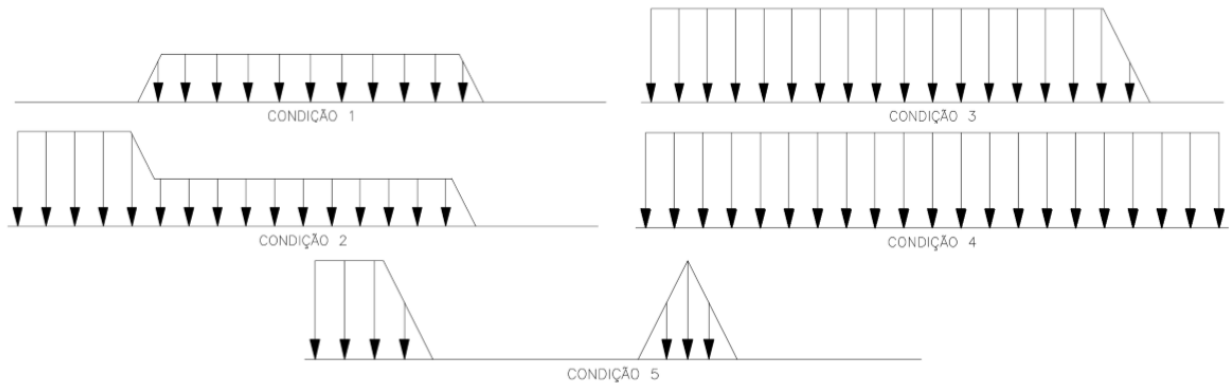
### 2. DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS

Um estudo de caso foi feito em uma balsa graneleira para transporte hidroviário de geometria simples. A balsa foi modelada no software Abaqus. Como a estrutura é formada somente por chapas e perfis, onde uma das dimensões (espessura) é de grandeza muito inferior às demais dimensões, todas as partes foram modeladas utilizando elementos bidimensionais. Na seção *Properties* os dados dos materiais são atribuídas as partes, assim como a espessura. Todas as partes são feitas do mesmo aço, mudando somente a espessura. Com as propriedades atribuídas as partes são finalmente montadas na estrutura final na seção *Assembly*:



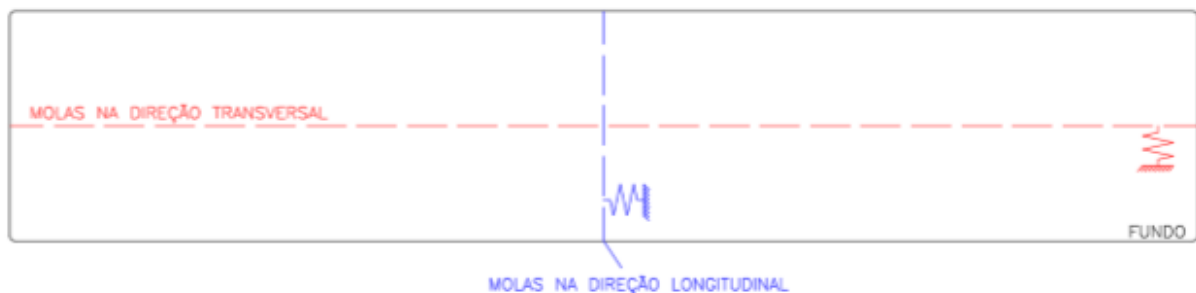
**Figura 1: Estrutura com parte do chapeamento ocultado**

A estrutura foi então carregada com diversas condições de pela qual a balsa será submetida em sua vida útil. Estas condições são as fases de carregamento e descarregamento, além da balsa completamente cheia. Todos os casos considerados são estáticos e lineares, uma vez que não estão sendo consideradas variáveis dinâmicas ou de outra natureza.



**Figura 2: Diagramas das condições de carregamento**

Uma vez que se trata de uma estrutura livre-livre, o modelo se torna instável devido a inexistência de apoios. Para contornar este problema são necessários elementos que estabilizem o modelo de forma que estas não comprometam o resultado com concentrações de tensão local. Foram utilizadas molas devido a sua natureza unidimensional e por ser possível controlar o deslocamento aceitável ao se alterar sua rigidez. As molas na direção longitudinal foram colocadas sobre a linha de centro da balsa, enquanto que as molas na direção transversal foram colocadas sobre a meia nau da embarcação, todas no fundo conforme a figura abaixo:



**Figura 3: Molas na vista do fundo da balsa**

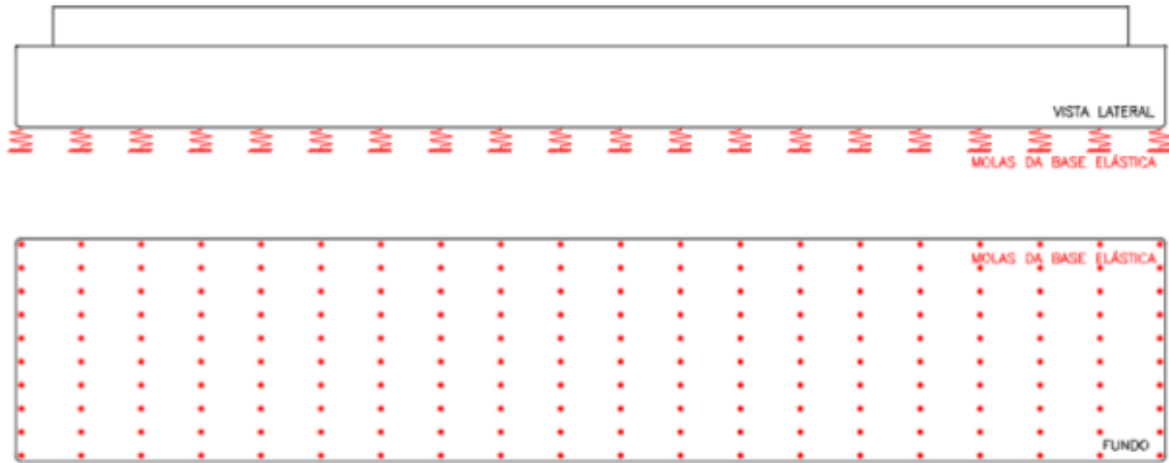
As molas são colocadas nestas posições para que permitissem o efeito de Poisson nas deformações. A rigidez foi distribuída entre diversas molas de forma que não houvessem concentrações de tensão pontuais que comprometessem o resultado.

A pressão hidrostática no fundo não pode ser colocada diretamente como uma pressão, uma vez que dependendo da condição de carregamento, pode haver um trim na embarcação, fazendo com que a pressão no fundo não seja constante. Outro problema que aparece ao se utilizar uma pressão no fundo é que o modelo não “afunda” na profundidade do calado na análise, comprometendo a pressão hidrostática no costado que será discutido a seguir. Para solucionar este problema, é utilizada uma série de molas distribuídas no fundo da balsa, de forma que formem uma base

elástica, que irá reagir de acordo com o carregamento imposto pelo carregamento. A rigidez global das molas deve ser tal que o carregamento na balsa gere um deslocamento igual ao calado da balsa:

$$F = k.x = \Delta.g [N] \quad (9)$$

Onde  $[x]$  é o deslocamento das molas e  $[\Delta]$  é o deslocamento da balsa.



**Figura 4: Base elástica**

A pressão hidrostática no costado foi introduzida no modelo através de uma pressão triangular obedecendo a função:

$$p = -\frac{z.p_{max}}{(D+1000)} [MPa] \quad (10)$$

Onde para altura  $Z = 0$  a pressão é zero, enquanto que para  $Z < 0$  a pressão tem valor igual a pressão hidrostática.  $Z$  é o calado da embarcação, que varia de acordo com a condição de carregamento devido a reação das molas da base elástica.  $D$  é o calado de projeto, onde  $Z=0$ . Foi considerado também 1000mm de coluna d'água acima do calado de projeto para um resultado mais conservador.

A malha de Elementos Finitos foi feita de forma livre devido à complexidade do modelo, uma vez que a geometria deve ser simples para que se possam utilizar elementos estruturados. Os elementos usados são de lineares (primeira ordem) bidimensionais, com quatro nós por elementos, cada nó tendo seis graus de liberdade.

Foi feito também o cálculo estrutural analítico para que se possam comparar os resultados. Segundo Tancredi (2004), para navios que possuem o comprimento muito maior que suas outras dimensões, a utilização da Teoria de Viga de Euler-Bernoulli retorna resultados satisfatórios. Para isso foi calculada a tensão primária, através do cálculo do módulo de resistência da seção transversal da balsa, assim como o momento fletor gerado pelo peso próprio da balsa, peso da carga e o empuxo, fazendo a aproximação da balsa a uma viga livre-livre de seção transversal constante.

$$\sigma_1 = \frac{M}{W} [MPa] \quad (11)$$

Onde  $M$  é o momento fletor resultante do carregamento e  $W$  o módulo de resistência da seção transversal.

O mesmo procedimento foi feito para os reforçadores do fundo e duplo fundo da balsa e seus carregamentos locais (tensão secundária), considerando estes engastados ao chapeamento, uma vez que existe simetria no carregamento. A tensão na unidade de chapeamento no fundo e no duplo fundo (tensão terciária) foi feita utilizando a simplificação para placas planas da teoria geral da elasticidade, calculando a tensão longitudinal e transversal, considerando a chapa engastada nos perfis estruturais adjacentes.

$$\sigma_{xxP1} = 0.34.p.\left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (12)$$

$$\sigma_{yyP1} = 0.3.\sigma_{xxP1} \quad (13)$$

$$\sigma_{yyP2} = 0.5.p.\left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (14)$$

$$\sigma_{xxP2} = 0.3.\sigma_{yyP2} \quad (15)$$

Onde  $p$  é a pressão gerada pelo carregamento local,  $b$  o espaçamento entre perfis estruturais,  $t$  a espessura da chapa e  $a$  a largura total da chapa.  $\sigma_{xx}$  é a tensão na direção longitudinal da balsa,  $\sigma_{yy}$  a tensão na direção transversal da balsa e  $P1$  e  $P2$  são pontos nos engastes em  $b/2$  e  $a/2$  respectivamente.

Os valores encontrados nas análises é finalmente somado em suas respectivas direções e destes então é encontrada a tensão de Von Mises. Segundo Lamb (2003), em grande parte dos casos, existe pequena ou nenhuma interação entre as três componentes (primária, secundária e terciária) das tensões ou deflexões, e portanto podem ser computadas por métodos e considerações totalmente independentes das outras duas.

### 3. RESULTADO E DISCUSSÃO

O modelo gera resultados de tensão e deslocamento para cada condição de carregamento. Os resultados em foram comparados com os resultados do cálculo do modelo de viga em três pontos: braçola, fundo e duplo fundo. Estes resultados estão nas tabelas a seguir:

**Tabela 1: Comparação condição 1**

| Condição 1 | $\sigma_{braçola}$ [MPa] | $\sigma_{fundo}$ [MPa] | $\sigma_{d.fundo}$ [MPa] |
|------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Modelo     | 67.2                     | 58.0                   | 81.3                     |
| Cálculo    | 75.4                     | 64.7                   | 75.6                     |
| Erro       | 10.9%                    | 10.4%                  | 7.5%                     |

**Tabela 2: Comparação condição 2**

| Condição 2 | $\sigma_{braçola}$ [MPa] | $\sigma_{fundo}$ [MPa] | $\sigma_{d.fundo}$ [MPa] |
|------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Modelo     | 14.0                     | 49.6                   | 60.1                     |
| Cálculo    | 14.1                     | 62.9                   | 57.2                     |
| Erro       | 0.7%                     | 21.1%                  | 5.1%                     |

**Tabela 3: Comparação condição 3**

| Condição 3 | $\sigma_{braçola}$ [MPa] | $\sigma_{fundo}$ [MPa] | $\sigma_{d.fundo}$ [MPa] |
|------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Modelo     | 79.1                     | 73.3                   | 99.4                     |
| Cálculo    | 81.3                     | 115.0                  | 131.7                    |
| Erro       | 2.7%                     | 36.3%                  | 24.5%                    |

**Tabela 4: Comparação condição 4**

| Condição 4 | $\sigma_{braçola}$ [MPa] | $\sigma_{fundo}$ [MPa] | $\sigma_{d.fundo}$ [MPa] |
|------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Modelo     | 17.5                     | 61.0                   | 73.9                     |
| Cálculo    | 18.9                     | 105.5                  | 110.0                    |
| Erro       | 7.4%                     | 42.2%                  | 32.8%                    |

**Tabela 5: Comparação condição 5**

| Condição 5 | $\sigma_{braçola}$ [MPa] | $\sigma_{fundo}$ [MPa] | $\sigma_{d.fundo}$ [MPa] |
|------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Modelo     | 41.4                     | 73.9                   | 82.1                     |
| Cálculo    | 45.5                     | 97.6                   | 155.6                    |
| Erro       | 9.9%                     | 24.3%                  | 47.2%                    |

Como esperado o valor da tensão na braçola no modelo e no cálculo analítico tiveram valores bem próximos, uma vez que a única carga agindo sobre a braçola é a tensão primária, portanto é fácil de isolá-la. Entretanto no fundo e no duplo fundo os valores das tensões encontradas pelo modelo foram menores que os calculados, isso se dá devido a interação entre elementos transversais na rigidez longitudinal e vice-versa, algo que é desprezado no cálculo analítico.

### 4. CONCLUSÃO

Diante dos resultados é possível afirmar que a utilização de modelos de FEM para a análise estrutural de embarcações é válida e apresenta resultados satisfatórios em análises estáticas lineares. Deve-se, entretanto, levar em consideração o tamanho da malha, uma vez que se trata de uma estrutura de grandes dimensões com diversas partes pequenas. Esta deve ser refinada o suficiente para que não haja concentração de tensão devido a deformação dos elementos. Pode-se observar que a maior discrepância entre os modelos ocorrem nas situações de maior tensão, chegando a um erro de 47.2% na tensão mais crítica observada no modelo analítico. Portanto, a utilização de modelos de FEM permitem a obtenção de resultados estruturais mais precisos e próximos da realidade que o modelo de viga, permitindo a realização de projetos mais sofisticados e menos conservadores.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] HUGHES, O. F. et al. Ship Structural Analysis and Design. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [2] LAMB, T. Ship Design and Construction. EUA: Sname, 2003. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. ISBN 0-939773-40-6.
- [3] TANCREDI, T.P. A estrutura primária do navio. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

## STRUCTURAL ANALYSIS OF A BARGE USING THE FINITE ELEMENTS METHOD

Thiago Kenji Leão Shinoka, [kenjishinoka@gmail.com](mailto:kenjishinoka@gmail.com)<sup>1</sup>

Arlindo Pires Lopes, [alopes@uea.edu.br](mailto:alopes@uea.edu.br)<sup>1</sup>

Adriana Alencar Santos, [drica.eng@gmail.com](mailto:drica.eng@gmail.com)<sup>1</sup>

Bruno Mello de Freitas, [bfreitas@uea.edu.br](mailto:bfreitas@uea.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Avenida Darcy Vargas, 1200. Parque 10 de Novembro. 69050-020 – Manaus - Amazonas

**Abstract.** *The present work has the objective of comparing the structural results of a computational model using the Finite Elements Method with the analytical calculation using Beam Theory, traditionally used for naval structures. To reach this objective the software Abaqus was used, where a model of a barge was made, subjected to several loading conditions and had its results compared to the structural analytical calculation. The results of the model allow for the visualization of the structure as a whole with its most stressed and least stressed regions. The results are also less conservative and closer to reality, permitting the achievement of more sophisticated projects.*

**Keywords:** *Structural analysis, Naval structures, Finite Elements.*