

ENGENHARIA NAVAL

Projeto Estrutural 1

Disciplina ME 596

Curso de Engenharia Naval e Oceânica

Adriano Dayvson Marques Ferreira

2015

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural 1

•Parte 1

•1. INTRODUÇÃO

- 1.1. Carregamentos estruturais em navios
- 1.2. Cargas estáticas
- 1.3. Cargas dinâmicas
- 1.4. Cargas ocasionais
- 1.5. Arranjo Estrutural
- 1.6. Chapeamento reforçado
- 1.7. Tipos de cavernamento

•2. ESTRUTURA PRIMÁRIA

- 2.1. O Navio como uma viga flutuante
- 2.2. Relações básicas entre esforços solicitantes e cargas
- 2.3. Aplicação da teoria de vigas
- 2.4. Tensões de flexão
- 2.5. Módulo de Seção
- 2.6. Tensões cisalhantes

3. ESTRUTURA SECUNDÁRIA

- 3.1. Introdução
- 3.2. Distribuição de Cargas
- 3.3. Os efeitos do cisalhamento na flexão de vigas. Chapa Colaborante
- 3.4. Grelhas
- 3.5. Grelha Simples
- 3.6. Grelha Múltipla
- 3.7. Flambagem de painéis reforçados

4. ESTRUTURA TERCIÁRIA

- 4.1. Introdução
- 4.2. Nomenclatura
- 4.3. Hipóteses simplificadoras e suas limitações
- 4.4. Teoria das pequenas deflexões
- 4.5. Relações entre momentos fletores e curvaturas
- 4.6. Relações entre momentos torçores e curvaturas
- 4.7. Equação de equilíbrio, desprezando o efeito de cargas paralelas ao plano médio
- 4.8. Solução do problema de flexão de placas.
- 4.9. Placas simplesmente apoiadas
- 4.10. Soluções em forma de Gráficos

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural 1

-
- 4.11. *Placa longa*
- 4.12. *Comportamento elasto-plástico*
- 4.13. *Equação das placas para pequenas deflexões, incluindo-se o efeito de cargas paralelas ao plano médio*
- 4.14. *Flambagem de placas*
- 4.15. *Flambagem de placas no regime elástico*
- 4.16. *Efeito de uma*
- 4.17. *Flambagem por cisalhamento*
- 4.18. *Momento fletor no plano da placa*
- 4.19. *Carregamentos combinados*
- 4.20. *Comportamento de placas após a flambagem*

•Parte 2

•5. PRINCÍPIOS DE PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL

- 5.1. *Natureza do projeto estrutural*
- 5.2. *Projeto estrutural por regras da sociedade classificadora.*

6. DIMENSIONAMENTO DA SEÇÃO MESTRA

- 5.1. *Critérios de dimensionamento da seção mestra*
- 5.2. *Projeto de curso*

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Para as estruturas flutuante a segurança à falhas estruturais é tão ou mais importante que a segurança a estabilidade ou a sobrevivência devido a perda de flutuabilidade oriunda de um alagamento.



Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•Este assunto em todos os seus detalhes é extenso e complexo o suficiente para completar diversos volumes e muitas horas de curso, pois envolve:

- Previsão das cargas impostas a estrutura em serviço
- Análise das tensões causadas por aqueles carregamentos em milhares de componentes estruturais
- Especificação dos materiais a serem utilizados com base em suas propriedades de resistência
- Custo
- Soldabilidade
- Facilidade de manutenção
- Escolha do arranjo estrutural.



Figura 2 – Forças devido a cargas dinâmicas

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•1.1. Carregamentos estruturais em navios

- Uma embarcação deve possuir resistência estrutural suficiente para suportar as cargas sem sofrer falhas ou deformações permanentes.
- O mesmo poderia ser dito para qualquer estrutura, máquina ou dispositivo projetado pela engenharia.
- Como qualquer outro objeto de engenharia, o projeto estrutural de embarcações depende da avaliação precisa das cargas, ou das forças, impostas à estrutura durante sua vida útil.
- Para embarcações, no mar, as cargas resultam de uma ampla variedade de fontes inerentes a natureza, com amplitudes que não são determinadas de maneira determinística.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

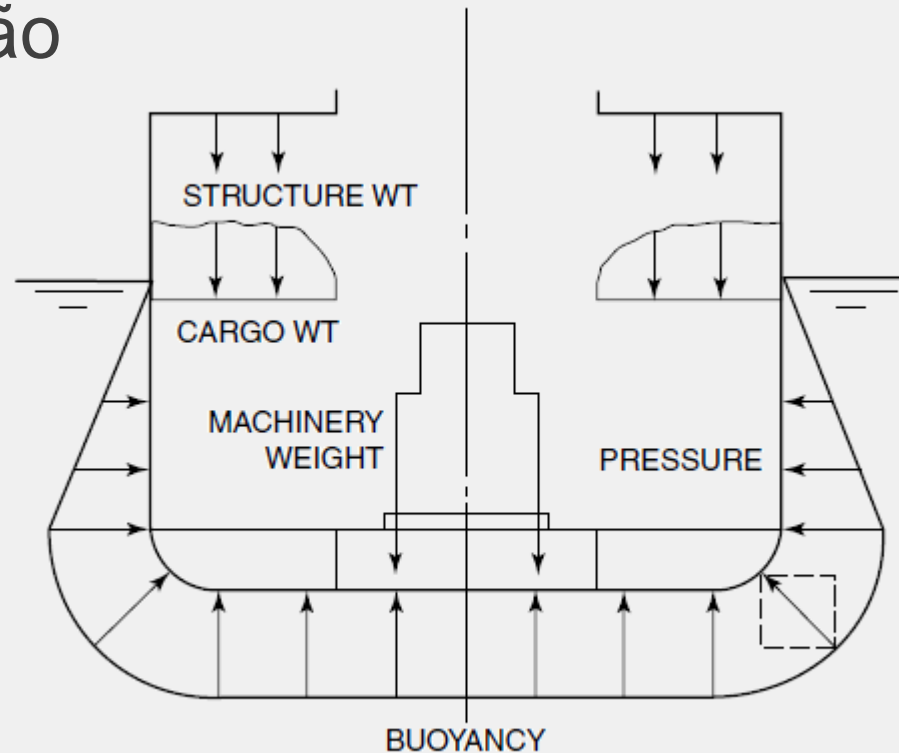
•1.2. Cargas estáticas

- São aquelas relacionadas com a flutuação, estabilidade e trim.
- Existem os pesos do próprio navio (estrutura, máquinas e equipamentos) e o devido à carga embarcada (carga, óleo combustível, óleos lubrificantes, água potável....) que geram as forças gravitacionais (mg), verticais e apontando para baixo, e cuja soma integraliza o deslocamento do navio.
- Equilibrando o total das forças de peso do navio flutuando estão as forças de flutuação ($\rho g \nabla$), com sentido oposto às de peso, que são as componentes verticais da pressão da água que atuam na parte imersa do casco.
- O total das forças de flutuação também é igual ao deslocamento da embarcação. Pressões externas e internas nas paredes de tanques que carregam líquidos também geram forças estáticas que solicitam a estrutura.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução



•Figura 3 - Cargas em uma seção típica de embarcação. Tupper, 1996.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Efeitos térmicos podem gerar tensões na estrutura do navio devido a contração e expansão de membros estruturais que estão acoplados a outros membros estruturais e que não estão sujeitos a extremos de temperatura.

- Para fins de análise e projeto estrutural, os carregamentos anteriormente descritos são considerados estáticos, embora de fato, eles mudem de viagem para viagem, uma vez que a distribuição de cargas e de óleo combustível nem sempre seja a mesma.

•1.3. Cargas dinâmicas

- Somando-se às cargas estáticas há uma grande quantidade de cargas dinâmicas que variam constantemente enquanto o navio está em operação. A mais óbvia destas é o carregamento variável imposto à estrutura causado pela combinação de ondas irregulares e dos movimentos do próprio navio resultante ao navegar nestas condições. As forças de onda geram variações contínuas da flexão do navio nos planos vertical e horizontal e também a torção.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução



Container feeder in heavy weather. The ship is partially on a wavetop; hogging



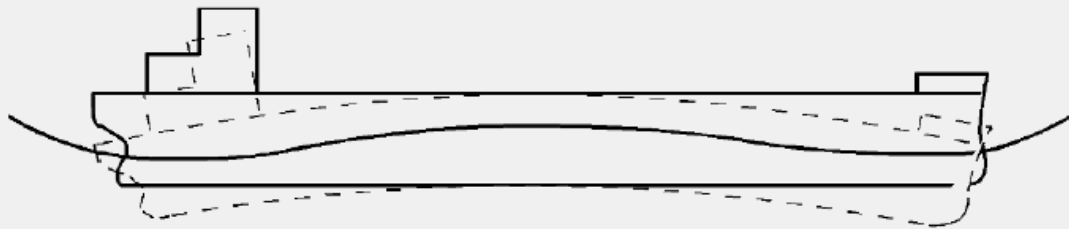
- Figura 4 - Carregamento devido a ondas. Alquebramento e Tosamento.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco

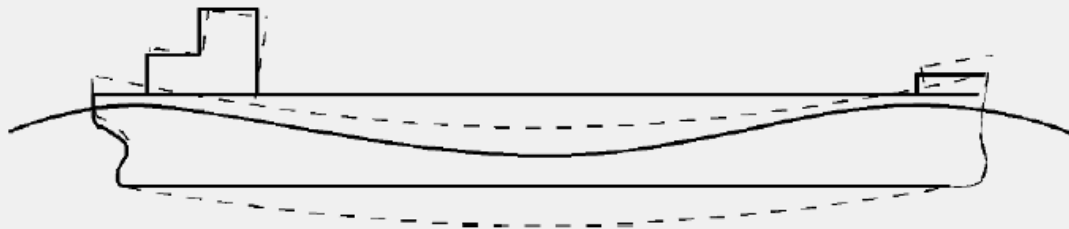


1. Introdução

Hogging



Sagging



•Figura 5 - Carregamento devido a ondas. Alquebramento e Tosamento.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução



•Figura 6 - Carregamentos devido a ondas

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•As ondas e o movimento do navio ao longo destas também são responsáveis pela carga da água que embarca nos convéses ou que impacta no costado. Outras mais severas ocorrem quando a embarcação sofre slamming, situação em que a proa emerge totalmente da água para, na sequência, reentrar, gerando uma breve, mas intensa pressão na estrutura do fundo da embarcação e que provoca um movimento vibratório de alta frequência que se propaga ao longo da estrutura.

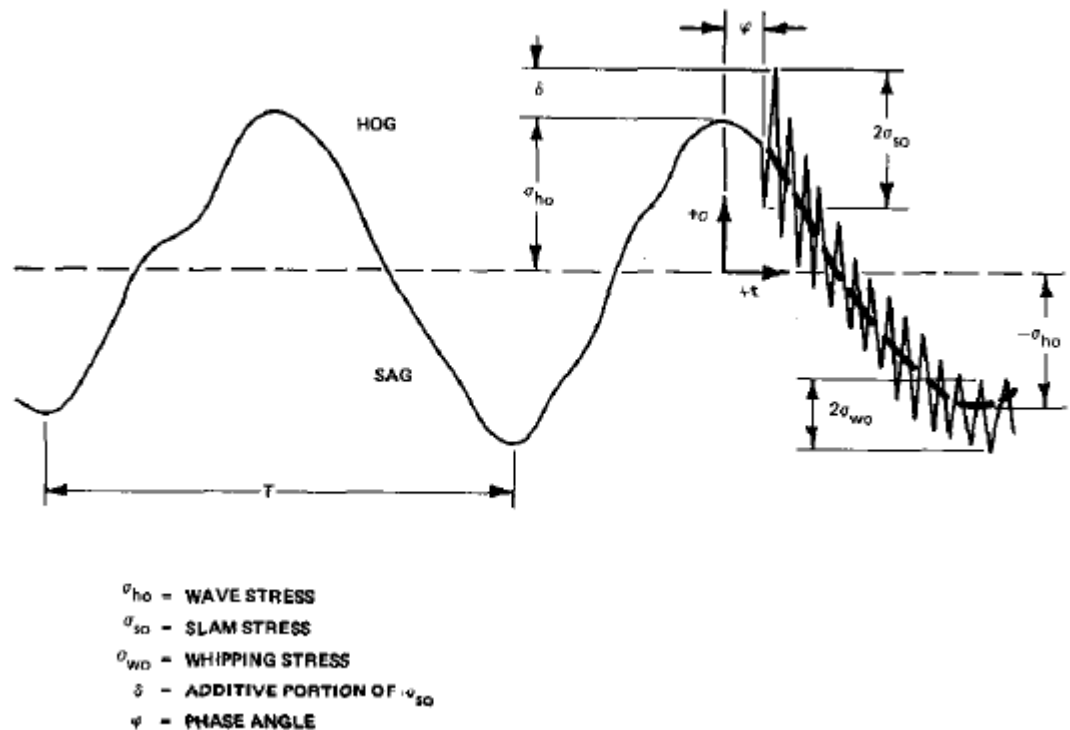


Figura 7 - Registro de Slamming.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•Os movimentos do navio também provocam forças em tanques que contém líquidos e que estão parcialmente cheios devido ao impacto, sloshing, que a superfície gera sobre suas paredes.

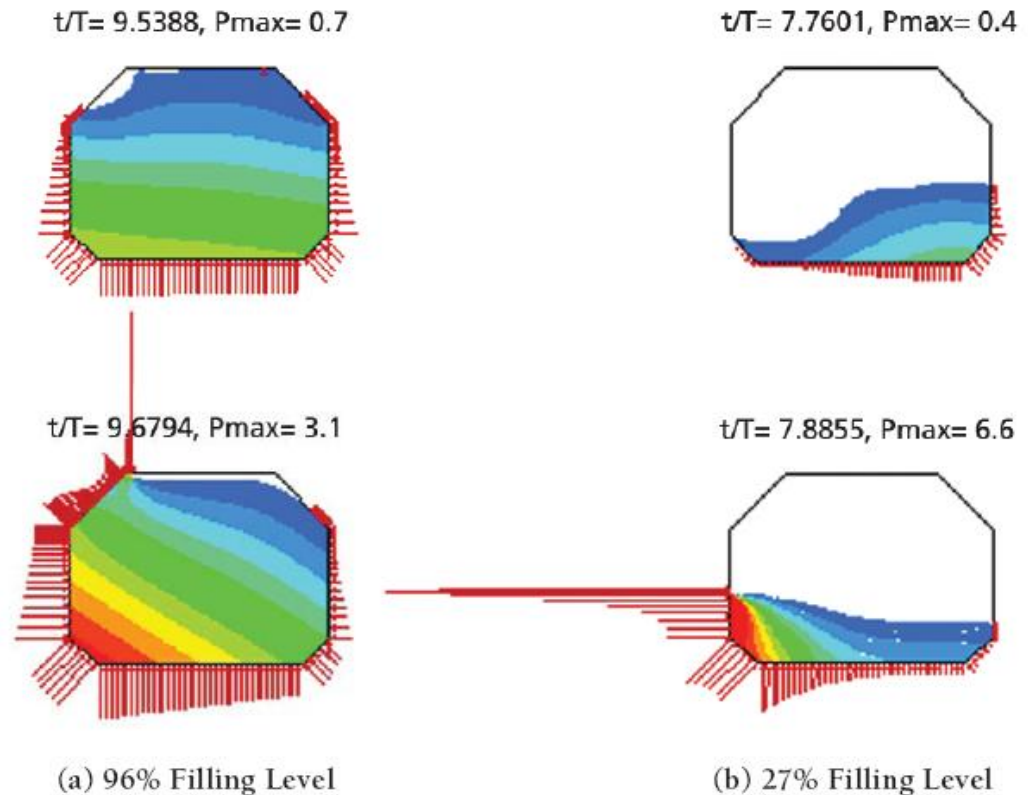


Figura 8 - Registro de pressões dinâmicas devido ao movimento de líquidos em tanques. ABS, 2000

Projeto Estrutural 1

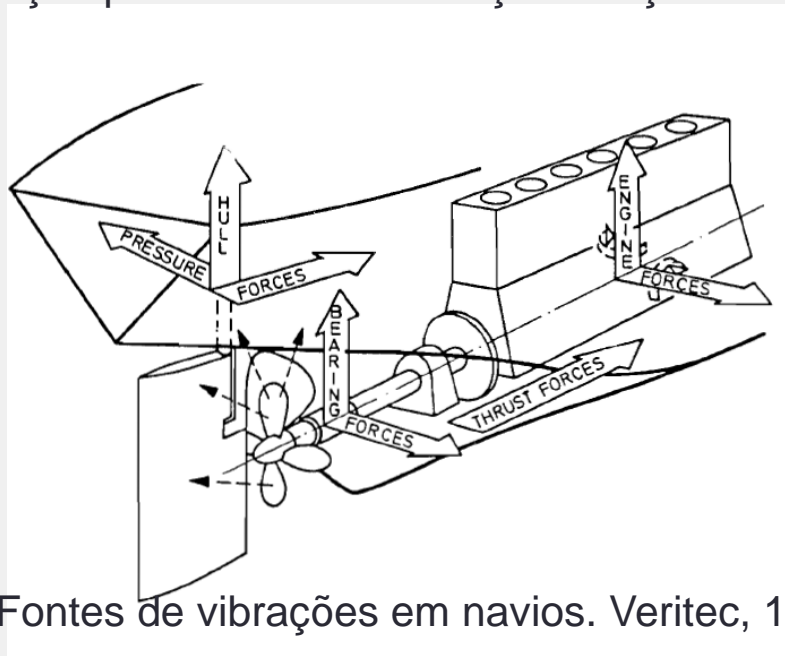
Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•A operação do sistema de propulsão também gera forças periódicas e de alta frequência nas estruturas de suporte das máquinas e propulsores que se transmitem para a estrutura da embarcação provocando as vibrações forçadas.



•Figura 9 - Fontes de vibrações em navios. Veritec, 1985.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•1.4. Cargas ocasionais

•Somando-se às cargas mencionadas é comum acontecer de uma embarcação estar sujeita a cargas em operações especiais. Navios que navegam no gelo estão sujeitos a cargas diferenciadas ao quebrar o gelo. Estas cargas induzem um acréscimo da flexão do navio enquanto navega ondas e causam forças localizadas de grande magnitude nos pontos de contato do casco com o gelo.



•Figura 10 - Navio operando em regiões geladas.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Navios de guerra estão sujeitos a cargas de impacto severas geradas por pouso de aeronaves, disparo de mísseis e explosões, sob ou acima d'água.
- Cargas severas também são impostas ao navio durante o lançamento e a docagem e mesmo durante a atracação.



Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Finalmente, cargas acidentais e não intencionais são causadas por albaroamentos e encalhes e as situações de alagamento provenientes de tais acidentes.



Figura 12 - Encalhe do navio, 1900.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Um cenário completo das situações de cargas impostas à estrutura de uma embarcação para um dado momento é extremamente complexo, como a lista de fontes mencionada pode indicar.
- Por isso, é comum entre os engenheiros navais arbitrarem um cenário hipotético de cargas equivalentes que é concebido de sorte que se a estrutura se mostra adequada a estes, ela terá um bom desempenho durante sua vida útil.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•1.5. Arranjo Estrutural

•Para servir ao seu propósito, um navio deve ser: um objeto flutuante e impermeável, capaz de transportar cargas e de resistir a ações do ambiente e de sua própria operação sem sofrer falhas por fratura ou por deformações permanentes.

•A estrutura pode ser imaginada como uma viga, isto é, apresenta uma dimensão muito maior que as outras, suportada pelas forças de flutuação e sendo solicitada pelas forças provenientes da carga, do próprio peso e outros itens que transporta, enquanto sofre flexão e torção ao longo de sua rota.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- A “viga navio”, como passaremos a designar tal estrutura, deve ser projetada para resistir ao momento fletor longitudinal, o esforço solicitante primário da embarcação. Logo esta estrutura deve consistir de material contínuo no sentido longitudinal, de proa a popa.
- Enquanto a maioria das estruturas é constituída de vigas sujeitas à flexão, a estrutura do navio é única neste universo, pois seu chapeamento deve ser estanque. A combinação dos requisitos de resistência longitudinal e de estanqueidade em uma única viga, enquanto se tenta conseguir o mínimo peso da estrutural, tem sido, há décadas, a principal tarefa dos engenheiros de estruturas.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•1.6. Chapeamento reforçado

•A configuração da unidade estrutural típica a que se chegou no desenvolvimento do projeto da estrutura de embarcações é o chapeamento reforçado. Um exemplo de chapeamento reforçado é mostrado na figura 13.

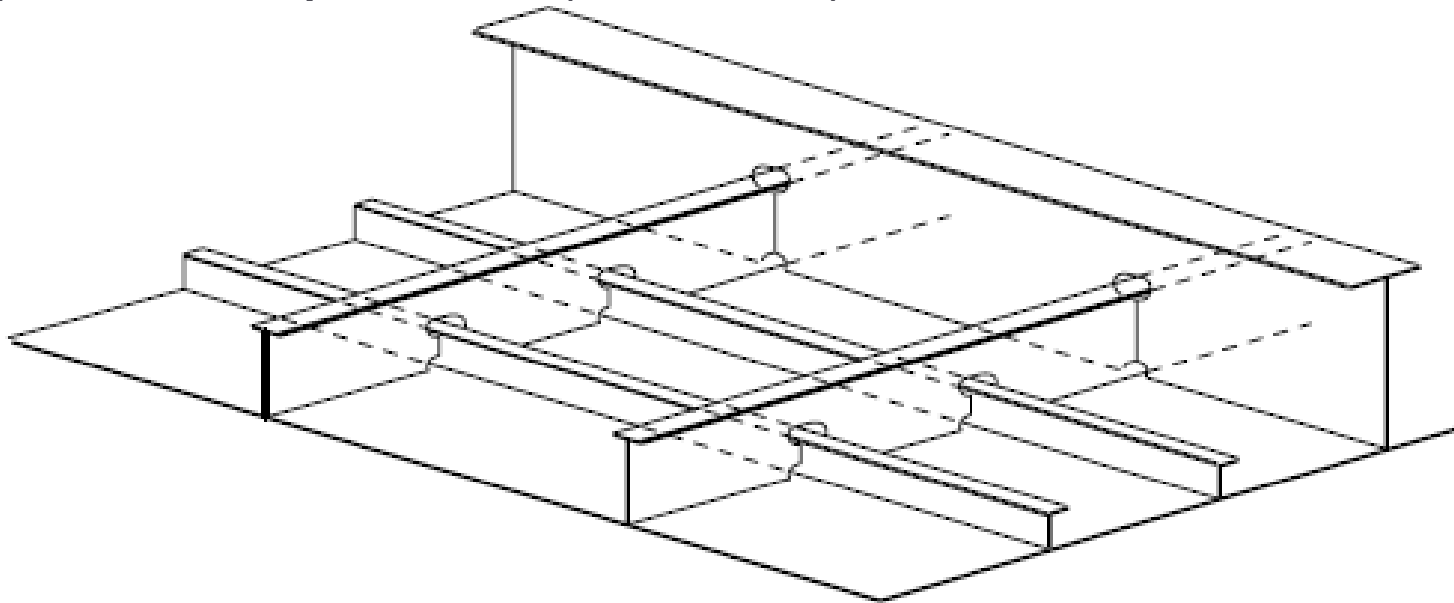
•Os reforçadores podem ser perfis laminados (cantoneiras, perfil T, bulbo, etc.) soldados no chapeamento, ou perfis fabricados, soldados a partir de chapas e posteriormente soldado ao chapeamento. Por razões de eficiência (menor peso para resistir à carga), os reforçadores devem ser dispostos em direções ortogonais, conforme o mostrado na figura.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Perfis leves, separados por menor espaçamento, agem como suporte para o chapeamento e os perfis pesados, separados por maiores espaçamentos, suportam o **chapeamento e os perfis leves** que neles se apoiam.



•Figura 13 - Painel estrutural

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

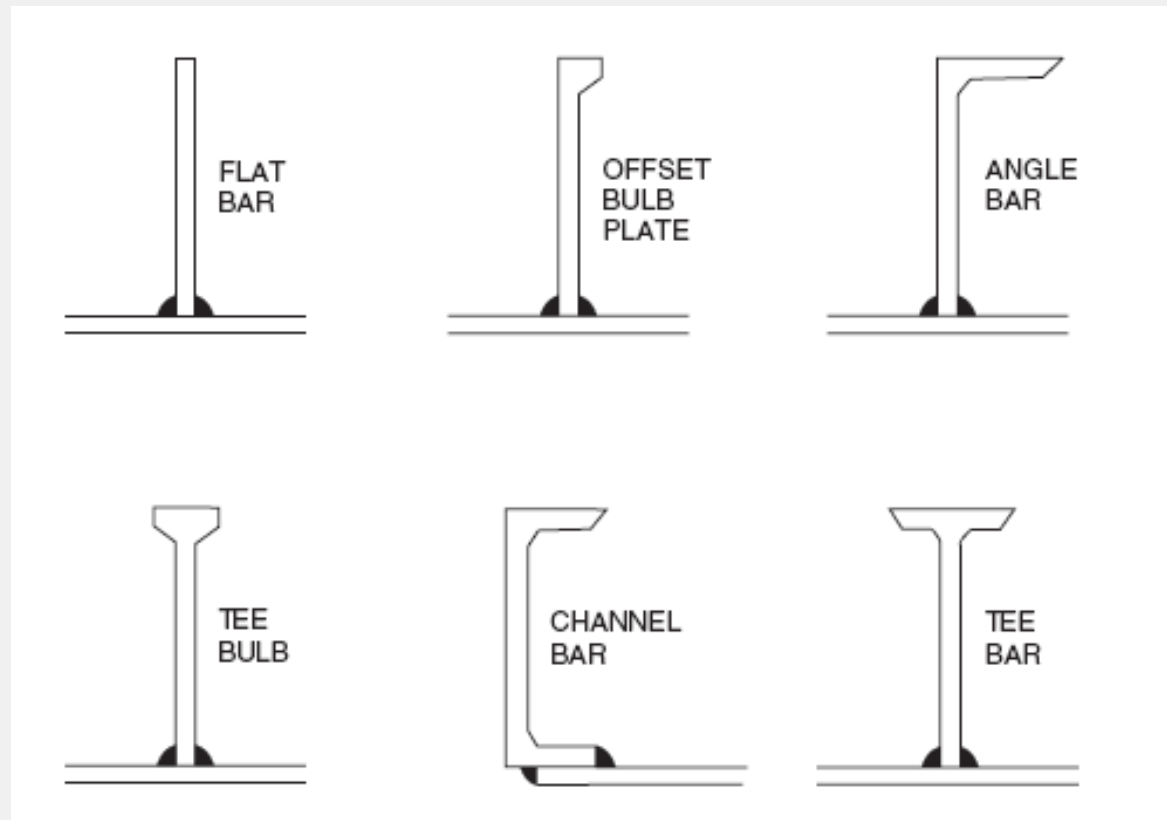


Figura 14 - Tipos de reforços. Lyres, D. S., 2001

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•O Projetista estrutural deve escolher a orientação (longitudinal ou transversal, vertical ou horizontal) de cada tipo de reforço em cada região da estrutura, como fundo, costados, conveses e anteparas. A escolha é baseada, na maioria das vezes, com base nas seguintes considerações:

1.Eficiência estrutural. Esta é determinada comparando-se os pesos de alternativas de arranjo com a mesma resistência estrutural. Em geral, o arranjo que resulta em mínimo peso para uma dada resistência é o melhor. Há exceções quando a solução de menor peso for a de custo elevado quando comparadas às demais alternativas.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

1.Custos de material e de fabricação. Alternativas de arranjo estrutural devem ser comparadas tanto no custo quanto no peso e uma relação de compromisso deve ser analisada, considerando-se quanto o custo adicional se justifica em função da redução do peso da estrutura e, portanto, no aumento da receita com o aumento da capacidade de carga da embarcação, mantendo-se o mesmo deslocamento.

1.Continuidade estrutural. Os membros estruturais como os reforçadores devem suportar as cargas na estrutura e as transmitirem aos membros adjacentes sem lhes gerar mudanças abruptas nos níveis de tensões. Para garantir que tais “concentrações de tensões” sejam evitadas, os membros estruturais concebidos contínuos, perfeitamente alinhados, se são cortados e soldados, ao encontrarem os painéis principais, como anteparas, costados e conveses.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

1.Utilização do espaço. Em painéis reforçados em duas direções, geralmente tem-se perfis leves, em espaçamento estreito entre eles, em uma delas e perfis pesados, em espaçamento largo, na outra, uma vez que os pesados suportam os leves. A escolha da orientação dos reforçadores pode, em muitas vezes, ser ditada pela necessidade de evitar que membros estruturais avancem no compartimento de carga e interfiram com a utilização do espaço.

•1.7. Tipos de cavernamento

•Embora todo navio possua reforços nas direções longitudinais e transversais, o tipo de cavernamento em cada um é caracterizado pelo número, tamanho e espaçamento, dos reforçadores transversais relativamente ao número, tamanho e espaçamento, dos reforçadores longitudinais.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- A evolução do projeto estrutural de embarcações resultou em dois sistemas de cavernamento: o cavernamento transversal e o cavernamento longitudinal. E como não poderia deixar de ser, aproveitando-se os benefícios de cada um deles, há embarcações que apresentam um sistema misto.
- Cavernamento transversal.** Na figura 14, mostra-se a seção mestra de um navio com cavernamento transversal.
- Tal sistema apresenta muitos reforçadores leves, dispostos na direção transversal, sendo suportado por poucos reforçadores pesados na direção longitudinal.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

- Os reforçadores leves estão dispostos, em espaçamentos curtos, de 600mm a 1000mm, em forma de anéis, ao longo de todo o comprimento do navio. No mapeamento do anel ao longo do contorno da baliza do navio mostrado na figura, nota-se que ele é composto do vau do convés, que suporta o chapeamento do convés, caverna, que suporta o chapeamento do costado, e a hastilha, que suporta o chapeamento do fundo e do teto do duplo fundo.
- A cada transição ao longo do anel, há as borboletas conectando os membros estruturais. Estes anéis de cavernas garantem a resistência transversal da estrutura, mantendo o desenho da forma do casco, mas eles em nada contribuem para a resistência longitudinal do navio.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•A resistência longitudinal em navios com cavernamento transversal é garantida pelo chapeamento do casco, teto do duplo fundo, dos conveses, fora das regiões de aberturas e de escotilhas, e pelos reforçadores longitudinais pesados, como quilhas e longarinas, no fundo, sicordas nos conveses e escoas nos costados.

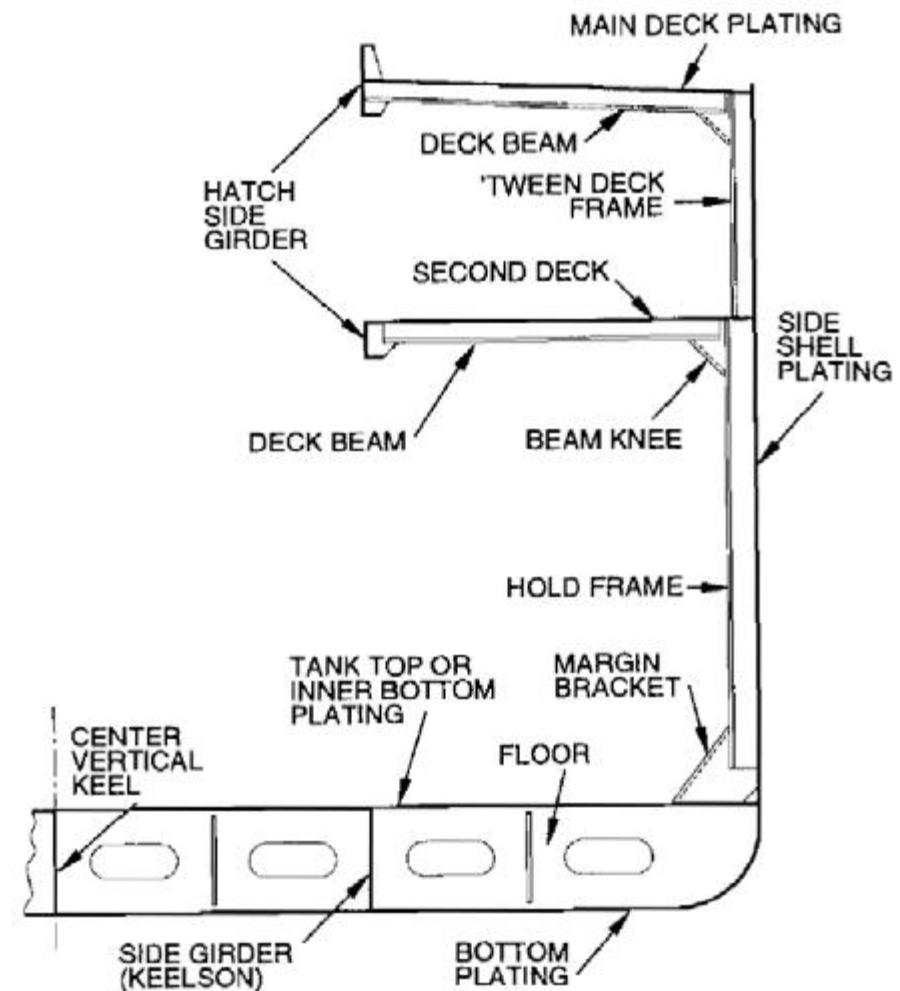


Figura 14 - Cavernamento transversal. Zubaly, R. B., 2000.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

• **Cavernamento longitudinal.** No sistema de cavernamento longitudinal, os reforçadores leves estão dispostos na direção longitudinal da embarcação.

• Na figura 15 mostra-se a seção mestra de um navio tanque onde tal sistema é frequentemente empregado. Tais reforçadores, espaçados entre 600mm e 900mm, além de darem suporte ao chapeamento também contribuem para a resistência longitudinal da viga navio, conferindo a tal arranjo mais eficiência do que o anterior. Anéis de cavernas gigantes, dispostos a cada 3 a 5 metros, fornecem resistência transversal e suporte para os longitudinais leves.

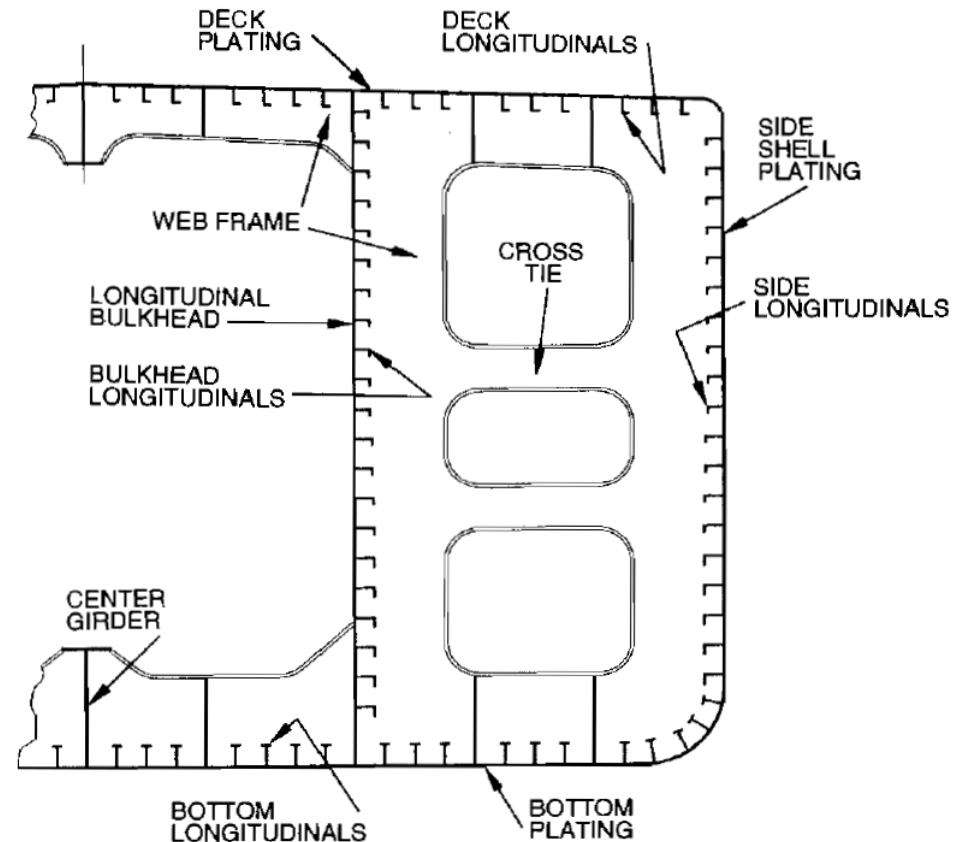


Figura 15 - Cavernamento longitudinal. Zubaly, R. B., 2000.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução

•**Cavernamento misto.** Como resultado das lições aprendidas na aplicação dos dois arranjos típicos apresentados, alguns tipos de navios apresentam uma combinação de cavernamento longitudinal e de carregamento transversal. Na figura 16 mostra-se um exemplo.

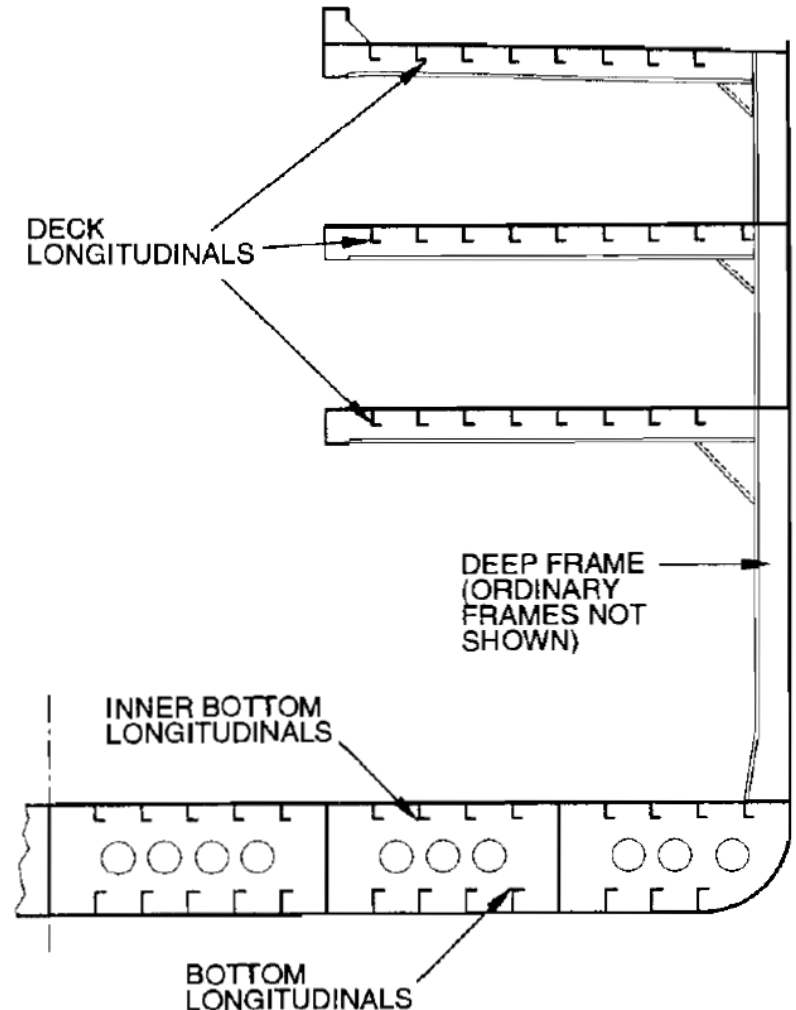


Figura 16 – Cavernamento misto. Zubaly, R. B., 2000.

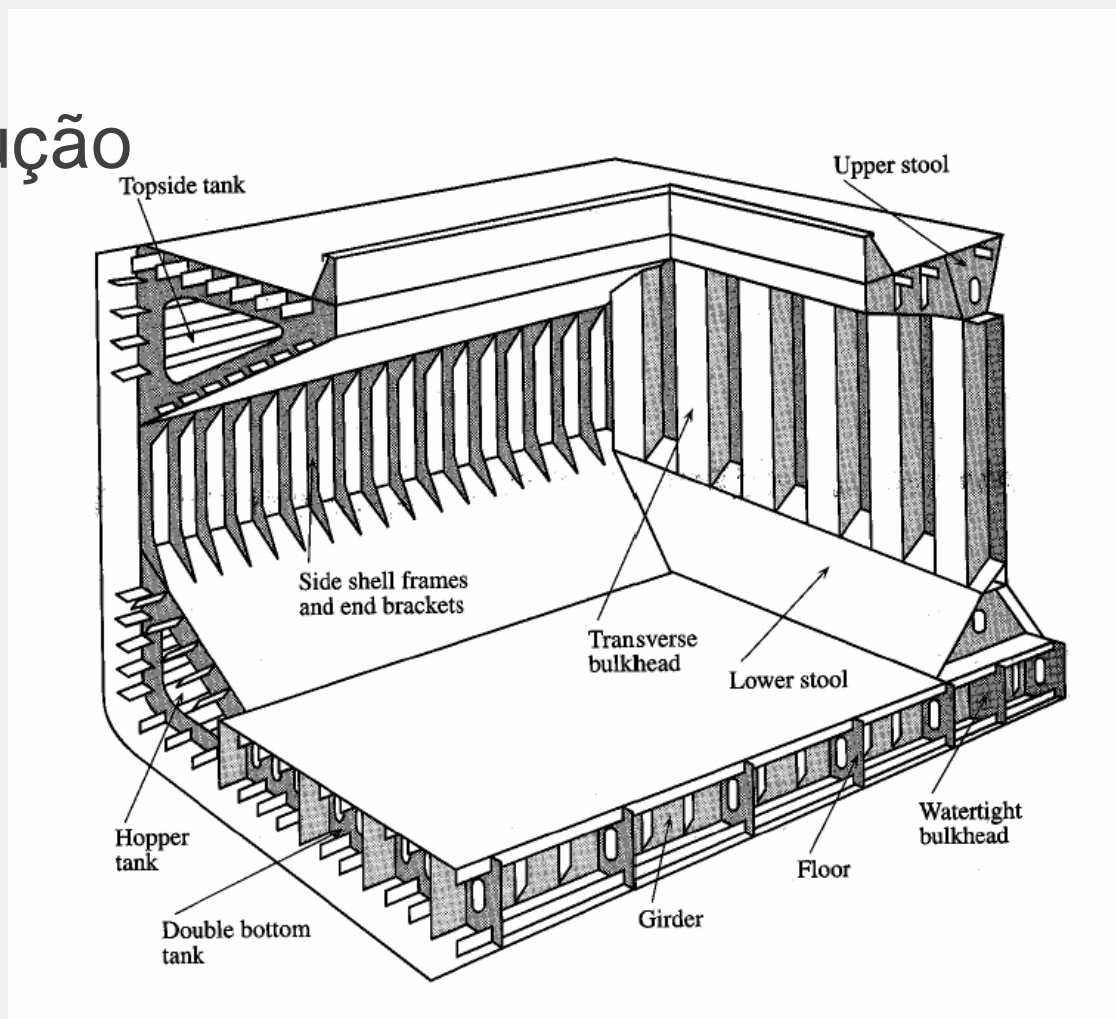
Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



1. Introdução



Cavernamento misto. Navio graneleiro de casco simples. Porão de carga. IACS, 1982.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•2. Estrutura Primária

- Na descrição dos arranjos estruturais, a estrutura do navio foi comparada com a de uma viga, suportada por baixo, pela flutuação, carregando seu próprio peso mais os pesos de máquinas e outros equipamentos, peso das cargas e dos itens de consumo.
- Na disciplina de arquitetura naval, nos cálculos de flutuação são consideradas apenas as magnitudes do peso e da flutuação. Nos cálculos de estabilidade, banda e trim, são necessários, além da magnitude, as posições dos centros de peso e de flutuação.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- Nos cálculos da resistência longitudinal da estrutura, ou resistência da viga navio, serão necessários o conhecimento destes itens e também de como peso e flutuação se distribuem ao longo do comprimento do navio.
- Diferentemente dos estudos de arquitetura naval, neste caso, o navio não é mais tratado como um corpo rígido, e sim um corpo que se deforma na presença dos esforços devido a pesos e flutuação.
- A deformação é causada pelas tensões impostas aos componentes estruturais do casco, da mesma forma que um corpo de prova se deforma no ensaio uniaxial de tração.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•Embora as previsões mais realistas das forças, tensões e deformações associadas à flexão longitudinal do navio em serviço requeiram um tratamento estatístico por conta da imprevisibilidade dos carregamentos impostos pela natureza do mar não serem conhecidos de maneira precisa, muito se pode inferir a partir do estudo da teoria simples de viga.

•2.1. O Navio como uma viga flutuante

•A maioria das estruturas em serviço em terra está sujeita a cargas que podem variar de tempos em tempos, mas raramente invertem a curvatura da estrutura deformada. O piso de um armazém no porto, por exemplo, irá fletir por ação de seu próprio peso e o peso variável dos produtos que nele são empilhados. Embora esse carregamento possa variar no tempo, não se espera que ele gere a flexão do piso para cima.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



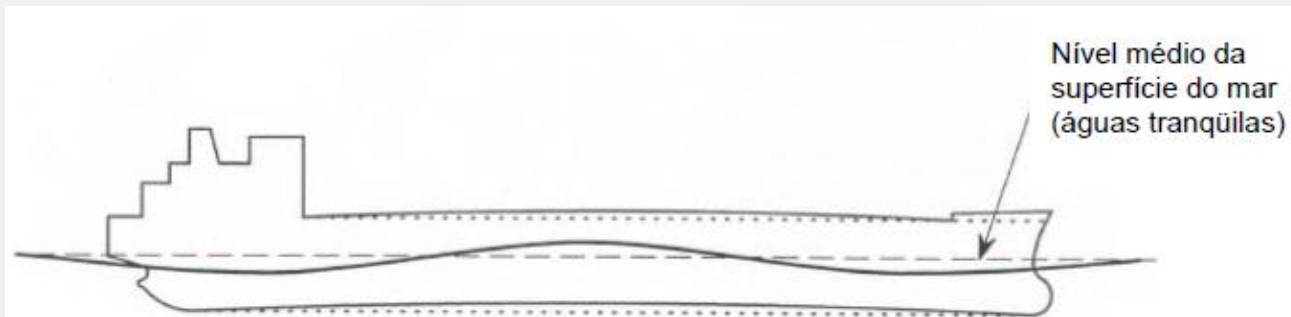
2. Estrutura Primária

- No caso do navio suportado pelas forças de flutuação e carregado pelo próprio peso, o peso da carga e o de outros itens que transporta, no entanto, deve-se esperar que, em alguns instantes, a viga navio apresente a tendência de fletir para baixo, a semelhança do piso do armazém, mas em outras, ele é forçado a fletir para cima, quando as forças de flutuação se reorganizam.
- Essa reversão no sentido da flexão não é de ocorrência rara. Na verdade, ela acontece continuamente ao longo de uma rota de navegação. Estima-se que durante um período de vida de 20 anos, um navio típico sofre 100 milhões destas reversões.
- Os dois sentidos de flexão da viga navio, ilustrados nas figuras 2.1 e 2.2, são denominados de arqueamento, quando a viga se arqueia para cima, e de tosamento, quando o arco se dá no sentido oposto.

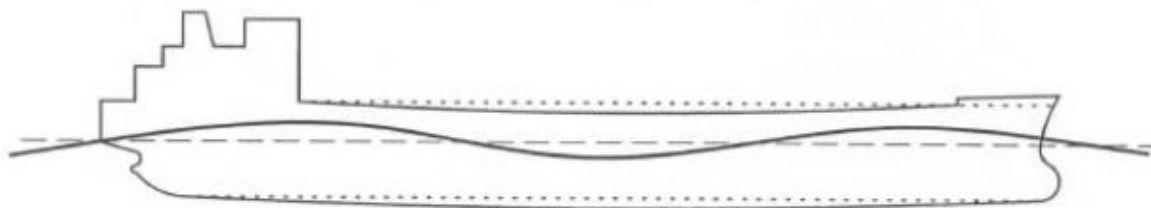
Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária



Alquebramento a quilha se curva para cima



Tosamento: a quilha se curva para baixo

Estrutura em Alquebramento e Tosamento

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- Estas curvaturas atingem seus valores extremos quando o navio se move de encontro ou no mesmo sentido das ondas, e estas possuem comprimento, de crista a crista, da mesma ordem do comprimento da embarcação, conforme se mostra na figura.
- Quando as cristas suportam os extremos da embarcação, o casco tende a tosar, devido à diminuição da flutuação a meio navio. O alquebramento ocorre na sequência, quando a crista se localiza a meio navio e os vales se encontram na proa e na popa.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- As reversões de sentido na flexão também invertem as tensões e deformações dela resultantes no fundo e no convés da viga navio. Tosamento gera tensões de compressão no convés e tensões de tração no fundo. Já o alquebramento gera tensões de tração no convés e de compressão no fundo.
- Nem sempre as embarcações navegam na direção das ondas com comprimentos da ordem de grandeza do próprio. Portanto, os ciclos de tosamento e de alquebramento nem sempre serão extremos. No entanto, essas reversões de carga ocorrerão continuamente em outras condições de mar, gerando níveis de tensões menores.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

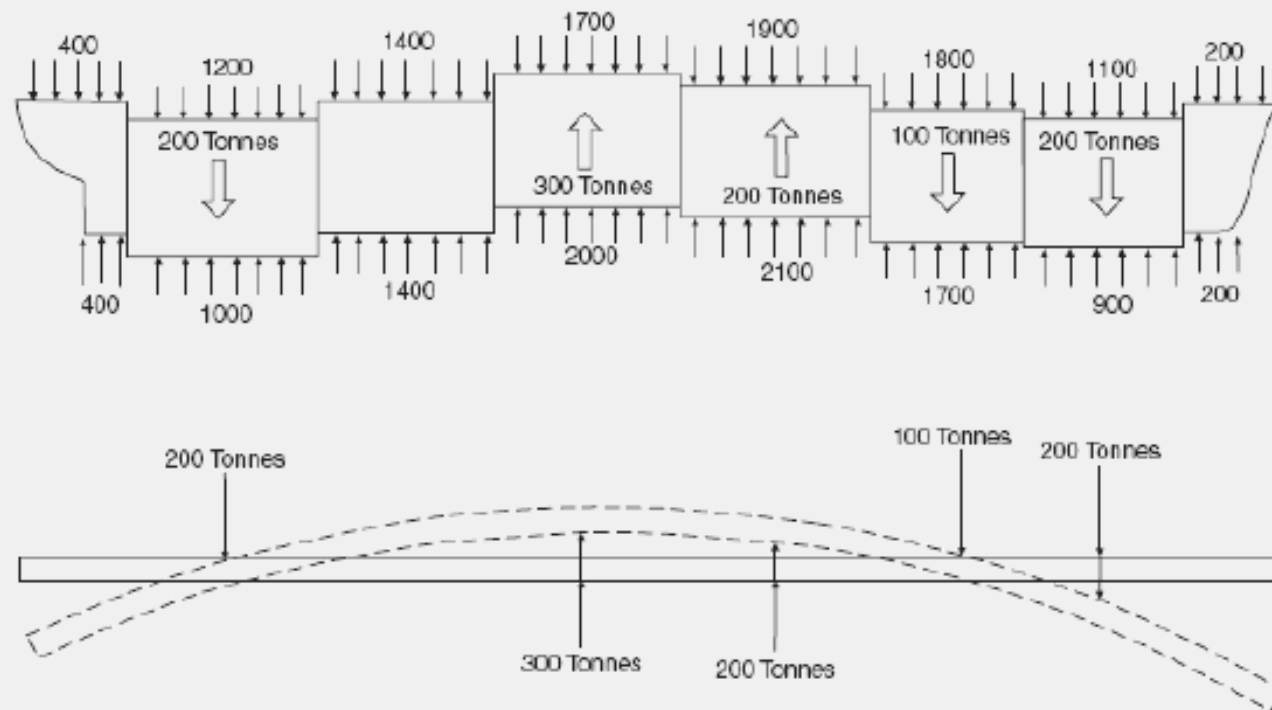


Figura 19 - A diferença entre as distribuições de peso e flutuação gerando a flexão da viga navio. Eyres, D. J., 2001.

Projeto Estrutural 1

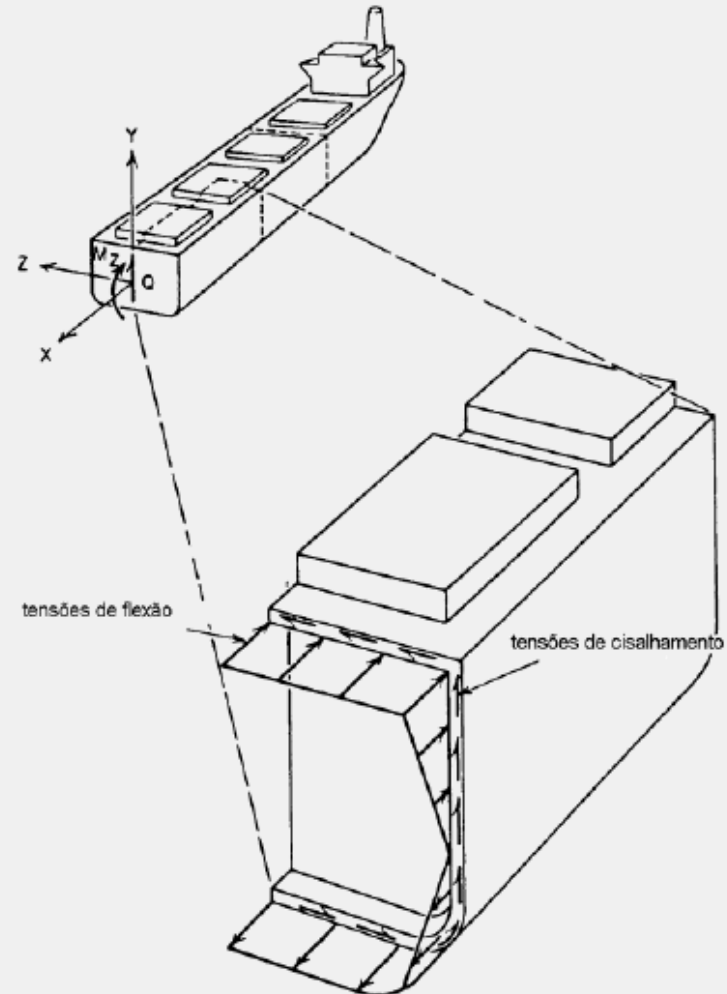
Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

• Importa destacar que inevitavelmente a distribuição de pesos e a distribuição da flutuação ao longo do comprimento do navio raramente serão iguais uma à outra. Assim, a viga navio estará sujeita a forças cortantes e momentos fletores e as tensões e deformações oriundas destes esforços, como serão vistas na solução do problema a seguir.



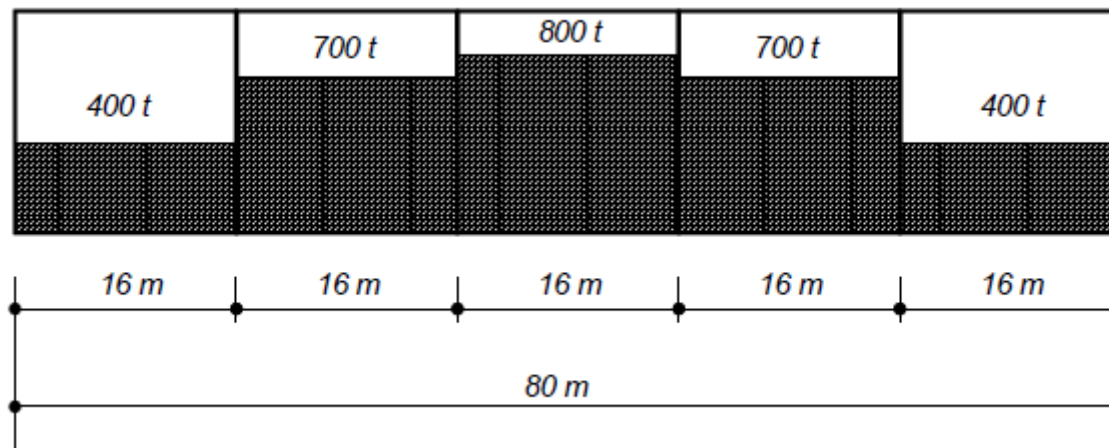
Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•Problema.

•Uma barça rectangular de 80m de comprimento, 10m de boca e 6m de pontal flutua em água salgada apresentando um calado de 0.5m quando vazia. O peso da embarcação leve pode ser considerado como uniformemente distribuído ao longo do comprimento da barça. Ela possui 5 porções de carga, cada um 16m de comprimento. As condições de carregamento da barça estão mostradas na figura. Pode-se adotar a hipótese de que as cargas estão distribuídas uniformemente ao longo do comprimento de seus porções. Calcular e desenhar os diagramas de pesos, de flutuação, de carregamento, de força cortante e de momento fletor.



Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•2.2. Relações básicas entre esforços solicitantes e cargas

•Como se mostra na figura 2.4, o equilíbrio vertical estático do navio, requer que o total das forças de flutuação equilibre o total das forças devido ao peso.

•Utilizando a notação da figura 2.4, tal requisito pode ser escrito como:

$$\rho g \int_0^l a(x) dx = g \int_0^l m(x) dx = \Delta \quad (2.1)$$

onde

$a(x)$	área imersa da seção transversal
$m(x)$	intensidade da massa distribuída
ρ	densidade da água do mar
g	aceleração da gravidade
Δ	deslocamento da embarcação.

O fator g foi mantido em ambos os membros da equação 2.1 para enfatizar que se trata de forças os termos envolvidos.

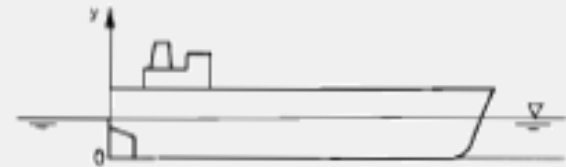
Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

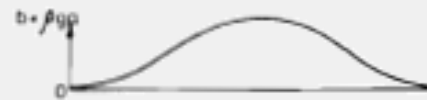
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária



(a) Buoyancy



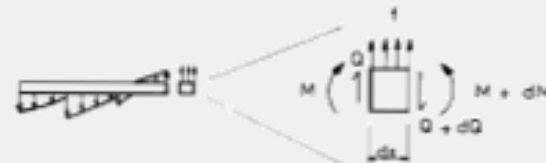
(b) Weight



(c) Load



(d)



(e) Shear Force



(f) Bending Moment



Resumo da flexão da viga navio.
Hughes, 1983.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- De modo análogo, o equilíbrio de momentos requer que:

$$\rho g \int_0^l a(x) x dx = g \int_0^l m(x) x dx = \Delta l_g \quad (2.2)$$

- onde l_g é a distância longitudinal do centro de gravidade do peso do navio.

•2.3. Aplicação da teoria de vigas

- Na teoria simples de vigas, pode-se caracterizar a distribuição do carregamento vertical atuante como sendo $f(x)$, sendo x a direção do eixo da viga. Para uma embarcação, tal distribuição deve ser a força líquida resultante da superposição do empuxo $b(x)$ e do peso $w(x)$, conforme se mostra na figura 2.4c. Na convenção de sinais adotada, as forças verticais positivas apontam para cima. Portanto, a força líquida resultante é $f(x) = b(x) - w(x)$.

$$f(x) = \rho g a(x) - g m(x) \quad (2.3)$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•O equilíbrio de forças resulta em relações interessantes entre os esforços solicitantes e o carregamento atuante nas vigas em flexão. Impondo-se o equilíbrio a um elemento diferencial, conforme mostrado na figura 2.4d e com as convenções de sinais ali mostradas, obtém-se:

$$Q + f dx - Q - dQ = 0$$

ou

$$f = \frac{dQ}{dx} \quad (2.4)$$

•da qual, por integração, obtém-se

$$Q(x) = \int_0^x f(x) dx + C \stackrel{=0}{\nearrow} \quad (2.5)$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

• Para navios, a constante de integração é sempre nula porque a viga navio é uma viga com condições de contorno, livre-livre, ou seja, não há a presença de forças cortantes ou de momentos fletores em suas extremidades, de proa e de popa.

$$• Q(0) = Q(L) = 0$$

• Impondo-se o equilíbrio de momentos em torno de um polo na extremidade direita do elemento e considerando-se momentos positivos aqueles que tendem a girar o elemento no sentido horário, obtém-se:

$$M + Qdx + fdx \frac{dx}{2} - M - dM = 0$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- observando que o termo dx^2 é de segunda ordem a equação se simplifica para:

$$Q = \frac{dM}{dx} \quad (2.4)$$

- da qual se obtém:

$$M(x) = \int_0^x Q(x)dx + C \stackrel{=0}{\nearrow} \quad (2.5)$$

- As convenções de sinais estão mostradas na figura 2.4e, para as forças cortantes, e 2.4f, para os momentos fletores. A força cortante em qualquer ponto é positiva se a integral, ou a soma acumulada do carregamento, até aquele ponto, for positiva. De modo similar, o momento fletor é positivo se a integral, ou a soma acumulada, das forças cortantes até o ponto for positiva.

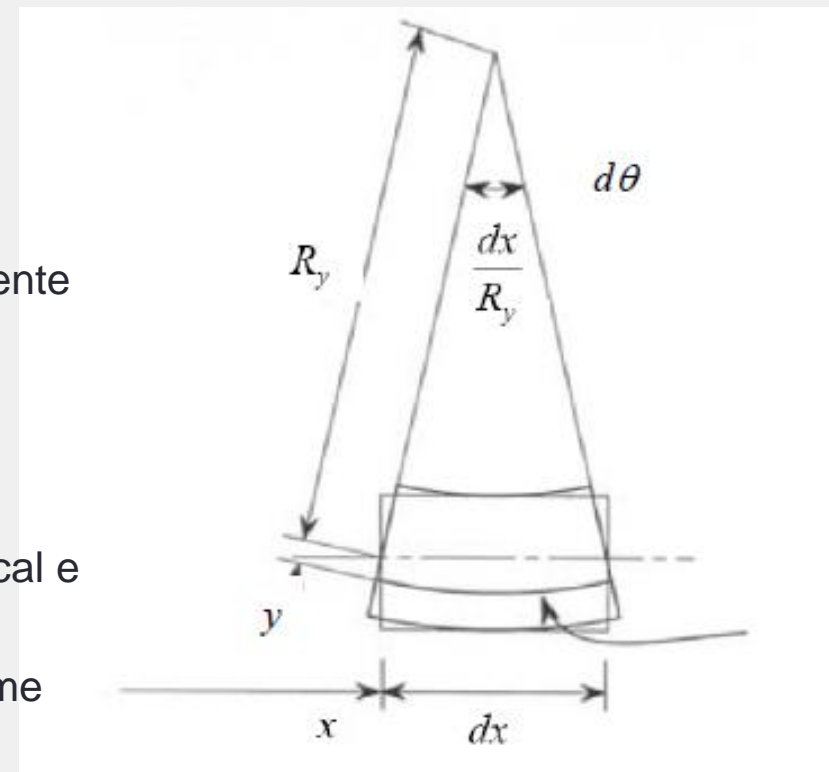
Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

2.4. Tensões de flexão

- A análise estrutural da viga navio utiliza a Teoria Simples de Viga, que se pauta nas seguintes hipóteses:
- 1. Seções planas de uma viga tomadas normalmente a seu eixo permanecem planas.
- 2. A viga é prismática sem aberturas e descontinuidades.
- 3. Outras formas de resposta estrutural aos carregamentos não afetam a flexão no plano vertical e podem ser tratadas separadamente.
- 4. O material é homogêneo e permanece no regime elástico.



Elemento diferencial em flexão

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

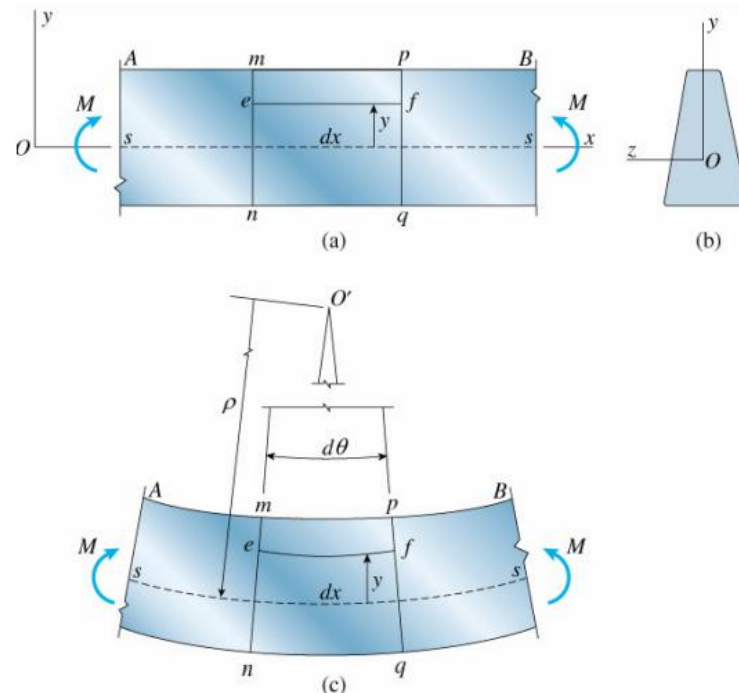


Figura 7- Deformações em uma viga em flexão pura: (a) vista lateral da viga, (b) seção transversal da viga e (c) Viga deformada.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

Para obter as deformações normais, considere uma linha longitudinal *ef* localizada entre os planos *mn* e *pq*. O comprimento L_1 da linha *ef* depois que a flexão ocorre é:

$$L_1 = (\rho - y)d\theta = dx - ydx/\rho \quad (5)$$

O comprimento original da linha *ef* é dx , segue que seu alongamento é $L_1 - dx$, ou $-ydx/\rho$. A deformação longitudinal é dada por:

$$\epsilon_x = -y/\rho = -ky \quad (6)$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

Tensões normais em vigas (Materiais Elásticos Lineares)

A relação tensão deformação mais comum encontrada na engenharia é a equação do material linear e elástico. Para tais materiais, substituímos a lei de Hooke para tensões uniaxiais ($\sigma_x = E\varepsilon$) na equação 6 e obtemos

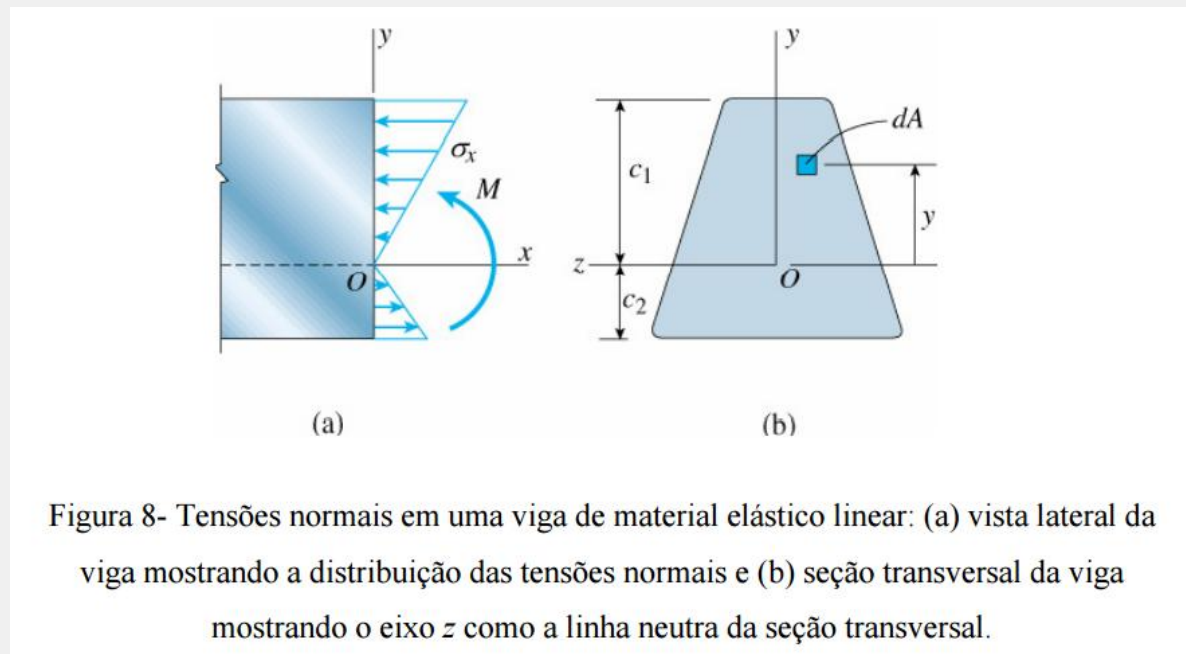
$$\sigma_x = E\varepsilon_x = -E y / \rho = -E k y$$

A equação 7 mostra que a tensão normal varia linearmente com a distância y da superfície neutra. Note a distribuição de tensão na Figura 8.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária



Observações sobre a Figura 8:

$M > 0$; $k > 0$; $\sigma_x < 0$ (compressão) acima da superfície neutra; $\sigma_x > 0$ (tração) abaixo da superfície neutra.

2. Estrutura Primária – Linha Neutra

Força agindo sobre o elemento $dA \rightarrow \sigma_x dA$ (compressão) se $y > 0$

Quando a viga está submetida à flexão pura, a força axial é zero. Assim tem-se que a força resultante na direção x é zero e assim a primeira equação da estática é:

$$\int \sigma_x dA = - \int Eky dA = 0 \quad (8)$$

$$E, k \neq 0 \therefore \int y dA = \bar{y}A = 0 \quad (9)$$

Onde \bar{y} é a distância de uma linha base (o eixo neutro) ao centróide da área A e $\bar{y}A = 0$. Como A não é nula, y deve ser igual a zero. Desta forma, a distância do eixo neutro ao centróide da seção transversal da viga. O eixo neutro pode ser determinado para qualquer viga, basta determinar o centróide da área da seção transversal.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

Importante:

- 1- A linha neutra passa através do centróide da área da seção transversal quando o material segue a lei de Hooke e não existem forças axiais agindo na seção transversal.
- 2- A origem O das coordenadas (Figura 8.b) está localizada no centróide da área da seção transversal

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

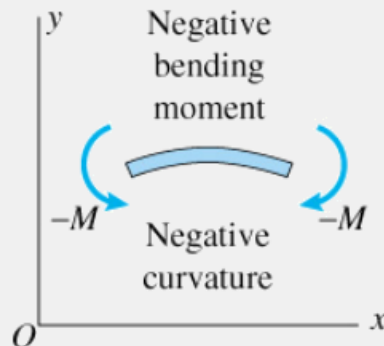
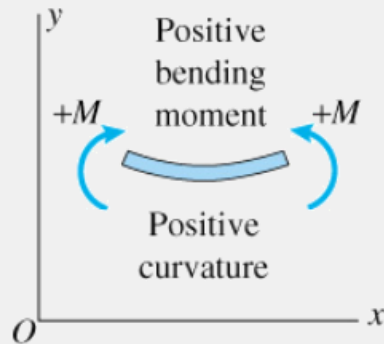


Figura 9 – Relações entre sinais de momentos fletores e sinais de curvaturas

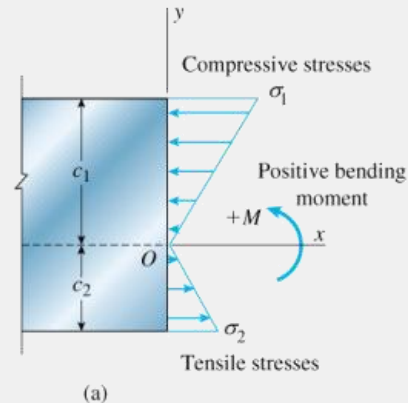
Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

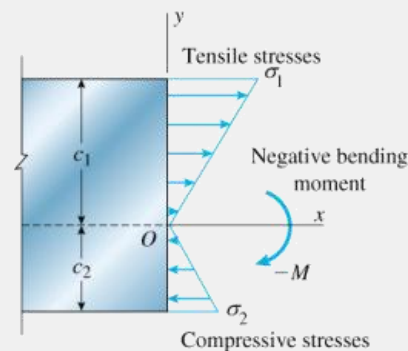
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária



(a)



(b)

Figura 10 – Relações entre os sinais dos momentos fletores e as direções das tensões normais: (a) momento fletor positivo e (b) momento fletor negativo.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•2.5. Módulo de Seção

- A equação da flexão indica que σ_x é máximo quando y é máximo, isto é nos extremos, superior e inferior, da seção transversal.
- Quando y corresponde a um destes extremos a quantidade I/y é chamada de módulo de seção e é usualmente denotado por Z .
- Como o eixo neutro não se localiza, geralmente, a meia altura da seção, existe, então, dois valores extremos de y : y_D para o convés resistente mais distante da linha neutra e y_K para a quilha, resultando dois valores para o módulo Z : Z_D e Z_K .
- Na maioria das embarcações, estrutura do fundo é mais robusta que a do convés, resultando uma localização abaixo do meio pontal para o eixo neutro.
- Uma altura de $0.4D$ acima da quilha é típica, mas tal localização varia entre os diferentes tipos de navios. Assim, as máximas tensões de flexão ocorrem tanto no convés quanto no fundo.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- O cálculo dos módulos reduz-se ao cálculo das propriedades de área e de inércia da seção transversal em questão.
- Como a estrutura longitudinal da viga navio é uma composição de diversos elementos, a marcha de cálculo destas propriedades é simples, porém dependendo da quantidade de elementos pode ser trabalhosa.
- Nestes casos, o uso de planilhas eletrônicas ou outros softwares de programação auxiliam sobremaneira o trabalho.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

•2.6. Tensões cisalhantes

- Devido a variação do momento fletor ao longo do comprimento do navio, as tensões σ_A e σ_B em duas faces, de um elemento diferencial ao longo do comprimento, não serão idênticas.
- Portanto, ao isolarmos uma porção deste elemento por meio de dois cortes, um na linha de centro e outro na distância s , ao longo do perímetro medido a partir da linha de centro, as forças resultantes da diferença de tensões devem ser equilibradas por uma distribuição de tensões cisalhantes no sentido longitudinal, ao longo das superfícies de corte.
- Por questões de simetria, as tensões de cisalhamento ao longo do corte na linha de centro não devem existir e o equilíbrio, portanto, deve ser totalmente obtido pela presença de tensões cisalhantes τ na outra seção de corte.

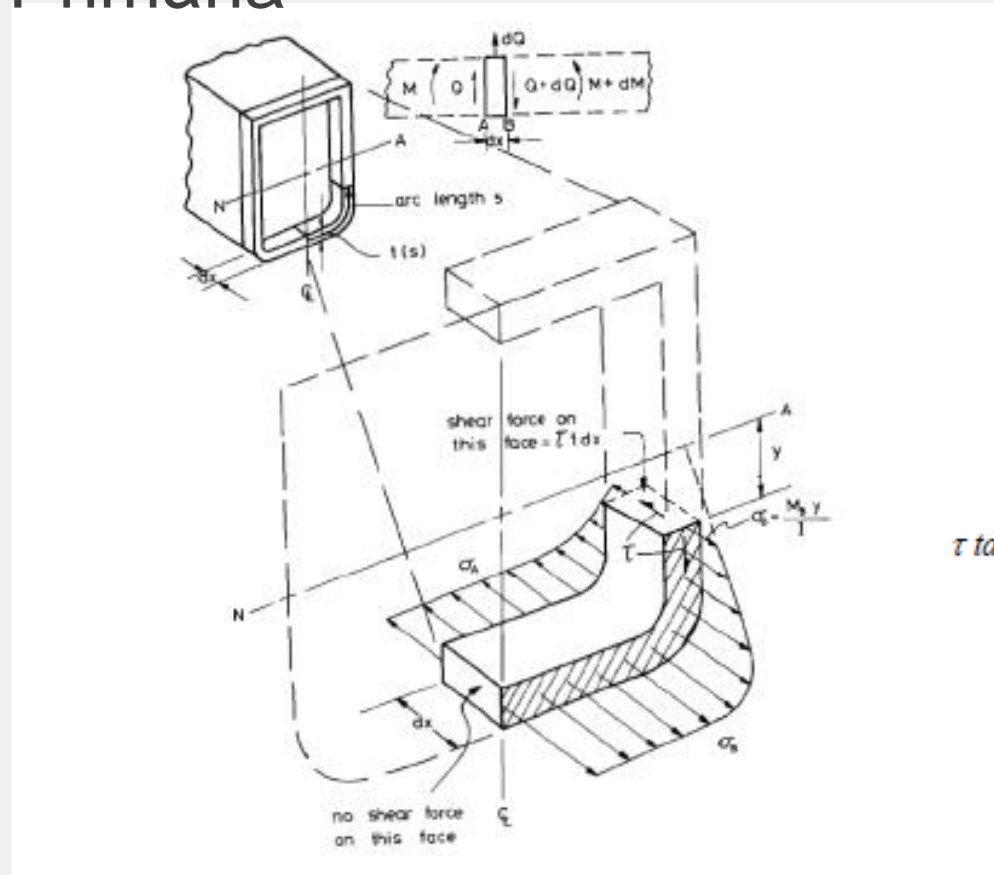
Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária



$$\tau t dx = \int_0^s \sigma_B t ds - \int_0^s \sigma_A t ds$$

Tensões de cisalhamento. Hughes, 1983

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

Substituindo $\sigma_x = \frac{M_x y}{I}$ em ambas as faces:

$$\tau t dx = \frac{M_B - M_A}{I} \int_0^s y t ds = \frac{dM}{I} \int_0^s y t ds \quad (2.10)$$

•Substituindo $dM=Qdx$:

$$\tau t dx = \frac{Q dx}{I} \int_0^s y t ds \quad (2.11)$$

•A integral na equação 2.10 é função da geometria da seção e da posição s ao longo desta. Por conveniência, associa-se o símbolo m para essa grandeza:

$$m = \int_0^s y t ds \quad (2.12)$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- Pode-se notar que m é o momento estático, em relação a linha neutra, da área da área acumulada, iniciando-se em um corte livre de tensões cisalhantes. (ou livre ou no plano de simetria).
- Substituindo m em 2.11 e isolando τ , obtém-se:

$$\tau = \frac{Qm}{It}$$

- O produto τt possui significado especial tanto no cisalhamento quanto na torção de vigas de paredes finas. Ele é denominado como fluxo de cisalhamento, como analogia ao escoamento de um fluido ideal contido em uma rede de tubulações. Guarda as mesmas características, ou seja, em um entroncamento, se preserva a conservação da massa, “a soma dos fluxos que chegam deve ser igual a soma dos fluxos de saem”. O produto τt , denominado de fluxo de cisalhamento, é representado pelo símbolo q

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

$$q = \frac{Qm}{I} \quad (2.14)$$

• Como, tanto Q quanto I , são constantes ao longo da seção, o fluxo de cisalhamento é diretamente proporcional a distribuição de m . De fato a relação Q/I pode ser interpretada como um fator de escala e uma vez calculada a distribuição de m , a distribuição do fluxo de cisalhamento é idêntica, a menos das unidades. Outra vantagem do cálculo de q é a não existência de mudanças abruptas com as variações de espessuras, o que já ocorre com a distribuição de τ .

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- Resolver os Exercícios 1 a 12 da apostila (páginas 38 a 42)

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



2. Estrutura Primária

- O que deveria ser, idealmente o projeto estrutural do navio?
- Um projeto estrutural do navio comportaria as seguintes fases:
 - a) Especificação de requisitos indispensáveis e desejáveis de arranjo, fabricação e de manutenção em forma quantificada;
 - b) Especificação de cargas, com sua lei de variação sobre a estrutura e no tempo:
 - $\vec{P} = \vec{P}(\{g\}, t)$
 - $\vec{P} = \text{função carga}$
 - $\{g\} = \text{vetor de coordenadas geométricas suficientes para descrever a estrutura}$
 - $t = \text{tempo}$
 - c) Estabelecimento de critérios, cientificamente fundamentados, para tensões e deflexões admissíveis, para diferentes combinações dos seguintes fatores:
 - Materiais; Ação corrosiva do meio; Ciclagem dos esforços; caracterização de possíveis avarias para cada parte da estrutura;

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

Um projeto estrutural do navio comportaria as seguintes fases:

- a) Especificação de requisitos indispensáveis e desejáveis de arranjo, fabricação e manutenção de forma qualificada
- b) Especificação de cargas
- c) Estabelecimentos de critérios para tensões e deflexões admissíveis

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- d) Concepção inicial da estrutura, por um processo automatizado de síntese. Os dados de entrada de tal processo seriam os produtos das fases a, b e c. A estrutura resultante seria automaticamente descrita em termos numéricos e gráficos;
- e) Análise da estrutura gerada em d, por um processo automatizado de análise, tendo como núcleo uma teoria elasto-plástica de extrema generalidade. Submissão automática dos resultados aos critérios estabelecidos em c, e identificação de locais que não satisfizessem aos critérios, em forma quantificada;
- f) Modificação da estrutura, por um processo automatizado de síntese, tendo como entrada e saída do item e;
- g) Reciclagem de e e f, até obter a convergência.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Alguns comentários sobre estas fases:
- Na fase **a** (especificação de requisitos), alguns requisitos do arranjo podem referir-se, por exemplo, a:
 - Distância máxima permitível entre anteparas estanques;
 - Número e disposição de escotilhas de carga; largura mínima aceitável para tais escotilhas; largura desejável para essas escotilhas;
 - Alturas mínima e máxima desejáveis para o fundo duplo;
 - Posições desejáveis e permitíveis para os “hopper tanks”, “wing tanks” etc.
- Ainda na fase **a**, alguns requisitos de fabricação e de manutenção poderiam ser:
 - Espessura máxima de chapas de convés;
 - Tipos desejáveis de perfis a serem usados, em ordem de prioridade;
 - Indicações numéricas sobre escantilhões de perfis fabricados a serem usados;
 - Conveniência ou não, de anteparas corrugadas versus anteparas reforçadas por perfis;
 - Conveniência, ou não, do uso de aço de alta tensão em partes altamente solicitadas da estrutura;
 - Conveniência, ou não, do uso de aço de alto “notch-toughness” nas fiadas do cintado e do bojo.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Na fase **b** (especificação das cargas) – especificação de cargas – deve-se notar que, onde o problema é dinâmico, o efeito máximo das forças não depende apenas do valor das forças, mas de suas frequências e das suas fases. As forças que agem sobre a estrutura do navio são de baixa e alta ciclagem, tais como: trens de ondas; Grandes amplitudes de pesos; Forças de excitação do hélice e trens de ondas de pequena amplitude. Importantes também são as forças de “slamming” e de “whipping”.
 -
 - Quanto a fase **c** (estabelecimento de critérios), observe-se que os critérios cientificamente fundamentados de que se dispõe para tensões admissíveis, não levam em conta a presença de tensões residuais e a corrosão, muito embora estes efeitos estejam sempre presentes.
-
- A Ação corrosiva do meio, aliada a um estado de tensões num corpo, estabelece o processo denominado “stress corrosion cracking”. As tensões admissíveis para que um material não falhe, ao longo de certo tempo, sobre estas condições, não são obviamente aquelas que se pode estabelecer quando não existe a ação do meio corrosivo.
 - Quanto a ciclagem dos esforços, ela introduz, como se sabe, considerações sobre fadiga. Embora este fenômeno seja comumente associado apenas aos esforços de alta ciclagem, ele pode ser importante para frequências mais baixas, como aquelas dos esforços primários de viga-navio, desde que as tensões em jogo, situem-se próximas do valor de escoamento.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

• Os comentários sobre a fase c, não deverão terminar sem considerarmos as palavras, avaria, ruína e colapso. Elas são empregadas na literatura técnica sem que tenham sido bem definidas, levando frequentemente a mal entendidos. A ISSC, de 1967, definiu tais palavras, sem, no entanto dar-lhes a desejável precisão e objetividade. Em nosso texto, usaremos as seguintes definições:

• **Falha** – É qualquer ocorrência indesejável na estrutura; pode ter diferentes níveis de gravidade, segundo seja avaria, ruína ou colapso;

• **Avaria** – É uma falha que não chega a impedir a estrutura de cumprir bem sua função. Exemplo: Amolgamento de uma unidade de chapeamento no convés principal de um navio tanque;

• **Ruína** – É o resultado de uma falha que impede totalmente a estrutura, ou parte desta, de cumprir bem sua função para a qual foi projetada. Exemplo: O amolgamento de um convés em balanço.

• **Colapso** – É o resultado de uma falha que impede a estrutura, ou parte da mesma, e absorver qualquer carga adicional àquela que a levou a esse estado.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Na fase fase **d** – “concepção inicial da estrutura por um processo automatizado de síntese”. Existem vários trabalhos neste sentido, em centros de pesquisas e empresas de elevada capacidade técnico-científica. Deve-se notar que a descrição das estruturas em termos numéricos deverá ser dado de entrada para a automatização seguinte: A do projeto de fabricação. Esta por sua vez terá como saída, descrições, em termos numéricos, adequadas à entrada das máquinas de corte, das chapas as várias peças que comporão a estrutura.
- Resta considerar a fase **f**. Os processos automatizados de análise tem, limitações , que são de natureza técnico-científica e econômica. Modernamente os softwares computacionais em uso permitem que estas limitações sejam parcialmente minimizadas.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

•5.2 – O Projeto Estrutural Atual

•Historicamente, o projeto estrutural tem se realizado mediante as “Regras de Sociedades Classificadoras”, com ou sem o auxílio da mecânica das estruturas. No primeiro caso, tem-se o “Projeto por Regras”, aplicável a navios mercantes comuns e no segundo, o “Projeto Racional”, aplicado a navios e embarcações não convencionais.

•São características do projeto por regras:

- Razoável grau de síntese;
- Forte apoio da experiência prática, extrapolações lentas, cautelosa introdução de conhecimentos resultantes da pesquisa na área estrutural;
- Fundamentos teóricos calcados em teorias simples de viga sem recalques, de um só tramo, com hipóteses sobre rotação nas extremidades e arbitragem de cargas;
 - Síntese - Composição de um todo pela reunião das suas partes.
 - Análise - Exame minucioso de uma coisa em cada uma das suas partes.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Podem-se apontar as seguintes características presentes no projeto racional:
 - Baixo nível de síntese;
 - Exame da experiência prática a luz de conhecimentos da pesquisa na área estrutural, consequente formulação de critérios de resistência e estabilidade, empenho na introdução de novos conhecimentos e técnicas para análise;
 - Conceituação de deformação primária, secundária e terciária, formulação de critérios para a superposição de tensões daí resultantes.

•5.3 – Tendências do Projeto Estrutural do Navio

- A tendência é a de evoluir na direção ao que deveria ser um projeto estrutural ideal, e será melhor entendida, avaliando-se as tendências para cada uma das fases daquela idealização:
- A fase **a** (especificação de requisitos), parece estar esquecida. Para dinamizar-se, depende do desenvolvimento científico da “Produção em Estaleiros”.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Na fase **b** (especificação de critérios), a tendência atual é a de obter a função pela idealização da estrutura discretizada e introdução de cargas nodais equivalentes, associadas a estudos estatísticos do mar e dos movimentos do navio. O conhecimento da variação de σ com t , é ainda hoje objeto de muitos estudos mas não existe uma formulação geral aplicável.
- A fase **c** (estabelecimento de critérios), hoje se encontra razoavelmente desenvolvida, principalmente com o uso de recursos computacionais.
- Quanto à fase **d** (concepção inicial), foram incorporados ao projeto, satisfatoriamente, critérios de resistência da fase elástica, mas ainda assim desenvolvidos cientificamente para condições estáticas, ou quase-estáticas, não obstante o grande esforço em pesquisa para prever os efeitos da corrosão sob tensão, fadiga, tensões residuais etc.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Os processos automatizados de análise encontram-se em grande desenvolvimento, com a adoção de sistemas e programa com base em elementos finitos. Hoje existe uma grande variedade de softwares disponíveis no mercado, a maioria com um propósito estrutural geral, mas alguns aplicados a estruturas de navios. Contudo, a maioria destes programas trabalha apenas com a fase elástica, e pequenas deflexões.
- A fase f (otimização estrutural), começa a virar realidade com o uso de softwares de projeto colaborativo, onde o projeto é trabalhado desde a concepção da forma, passando por dimensionamento estrutural e projeto de construção.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Deve-se acrescentar que as Sociedades Classificadoras recorrem e exigem, cada vez mais, métodos apurados de análise.
- Como exemplo, sugere-se o exame da seção 8 das regras do Det Norske Veritas (DNV) de 1988, relativas a “Girder Systems”. O mero exame do índice desta seção já dá uma ideia do crescente racionalismo nas regras das Sociedades Classificadoras. Este índice geral está assim organizado:
 - A – General
 - B – Stress Analysis
 - C – Design Loads
 - D – Allowable Stresses

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- A maioria das Classificadoras obedece as seguintes diretrizes:
 - Fornecer dimensionamentos aproximados, por fórmulas simples, para facilitar a síntese;
 - Estabelecer escantilhões mínimos, por fórmulas semi-emprícas, nos seguintes casos:
 - Partes da estrutura de geometria e carregamento mais complexo (proa e popa, por exemplo)
 - Partes da estrutura em que considerações práticas de manutenção (ou outros critérios), recomendam escantilhões mínimos, o que reduz também o número de variáveis a considerar nas demais partes do navio.
- Exigir cálculos acurados em partes da estrutura já tratáveis analiticamente, e de grande importância.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Alguns comentários adicionais são oportunos.
- A discretização da estrutura e a introdução de cargas nodais equivalentes são as bases do método dos elementos finitos para análise, fator primordial do desenvolvimento da engenharia de estruturas, aliado a evolução computacional nos últimos 20 anos.
- O conhecimento da função, , em termos determinísticos é impraticável, visto que tal função resulta, em grande parte, das cargas hidrodinâmicas e de inércia impostas pelo mar, o qual por sua vez, tem caráter aleatório, conforme se discutirá adiante.
- Entretanto o seu conhecimento estatístico é viável, pelo menos para toda a estrutura globalmente. O conhecimento da função , ponto a ponto da estrutura, isto é, o conhecimento de , como se definiu há pouco, parece no momento inviável.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

•5.4 – Previsão de Cargas

- Nos capítulos anteriores, foi considerado as cargas que agem sobre a estrutura eram determinísticas e quase-estáticas, Ignorou-se o possível efeito de tensões térmicas e residuais. Iremos agora salientar o caráter dinâmico e complexo das cargas.
- A rigor devem-se considerar sempre para uma estrutura oceânica as seguintes cargas:
 - 1.Pesos;
 - 2.Forças de pressão impostas pelo mar;
 - 3.Forças viscosas do mar;
 - 4.Esforços excitadores do hélice;
 - 5.Tensões residuais, resultantes da construção;
 - 6.Cargas térmicas, resultantes da ação do sol ou do aquecimento de carga líquida, etc.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

• Dessas cargas, todas variam com o tempo. Essa variação é muito lenta para a primeira, a quinta e a sexta, podendo ser desprezada, mas torna-se importante quando se considera a excitação do hélice e das ondas. Estas não só impõem movimentos de corpo rígido à estrutura, gerando esforços de inércia, como ainda podem induzir vibrações no todo ou em partes da estrutura.

O comentário anterior, ocorre tipicamente nos casos de ocorrência do efeito de slamming, que ocorre quando a embarcação se encontra num estado de mar severo, gerando impactos periódicos que excitam vibrações de viga navio. (figura 5.1).

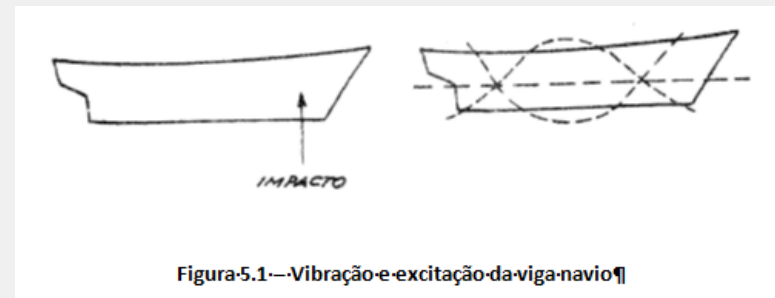


Figura-5.1—Vibração-e-excitação-da-viga-navio¶

• Tal é o caso também de vibrações em mastros, longarinas, longitudinais, trechos de costado e outras partes da estrutura, excitadas pela ação das ondas, de frequência próximas às frequências naturais das estruturas afetadas. As vibrações de slamming, por exemplo, causam tensões que se superpõem às do momento fletor, podendo chegar a 20% ou mesmo 30% do valor destas, para navios mercantes ou mesmo a 160% para alguns tipos de navios militares. O comportamento estrutural é, por conseguinte, parcialmente dinâmico.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- As forças de viscosidade podem ser desprezadas, exceto quanto ao seu benéfico efeito na atenuação das amplitudes de vibração. As forças de pressão deveriam ser determinadas levando em conta simultaneamente os movimentos das partículas fluidas nas ondas e no próprio navio. O problema é importante e extremamente complexo, sendo objeto de intensas pesquisas em hidrodinâmica.
- Mesmo em águas tranquilas, a onda advinda do movimento do navio, pode produzir um momento fletor que não é desprezível. Para elevados valores de ω , tal momento, superposto ao de tosamento das ondas do mar, ocasionalmente levou a flambagem do convés.
- Quanto a consideração simultânea do movimento do navio e das partículas do mar em agitação, algumas teorias existem e são aplicadas. Cita-se, dentre elas, a “Strip Theory”, que tenta estudar o problema separadamente para diversas “fatias” transversais ao longo do casco, supondo que em cada fatia o movimento é bidimensional. A excelência dessa teoria, depende das formas do navio, podendo levar a resultados insatisfatórios para momentos fletores e esforços locais.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- A complexidade apontada acima para o cálculo das forças de pressão adicione-se aquela que advém do caráter aleatório das elevações da superfície do mar. A ocorrência de uma dada elevação da superfície do mar, num dado período, somente se pode prever estatisticamente.
- Portanto as forças de pressão sobre a estrutura também só poderão ser previstas estatisticamente e, ainda assim, desde que se disponha de recursos teórico-experimentais para resolver o problema hidrodinâmico mencionado no parágrafo anterior.
- O comportamento estrutural então, somente pode ser estudado adequadamente, como um problema dinâmico e estatístico.
- Mesmo quando se dispõe de conhecimentos estruturais, hidrodinâmicos e estatísticos, julgados suficientes para tratar os efeitos do peso, das forças do mar e da excitação dos hélices, ficam por considerar os efeitos de tensões residuais e tensões térmicas.

Natureza do Projeto Estrutural

•As operações de corte, ajustagem, soldagem e desempenho, durante a construção, introduzem tensões residuais em inúmeras regiões. A figura 5.2, esquematiza a distribuição de tensões residuais, para um caso simples de soldagem, podendo-se ver que o material escoa, em uma estreita faixa paralela ao eixo central da solda. Para um caso prático a distribuição mudará, segundo os vínculos e a sequência de soldagem que se adote.

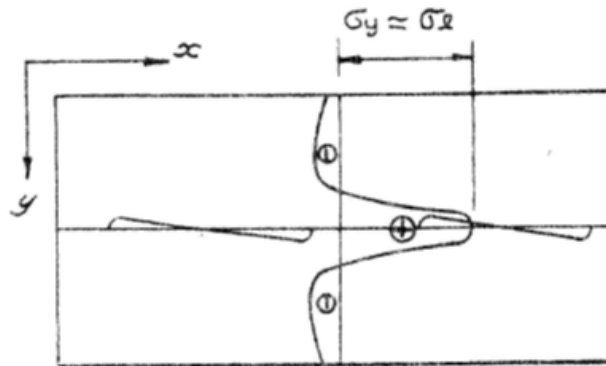


Figura 5.2 – Esquema de tensões residuais em duas chapas soldadas livremente

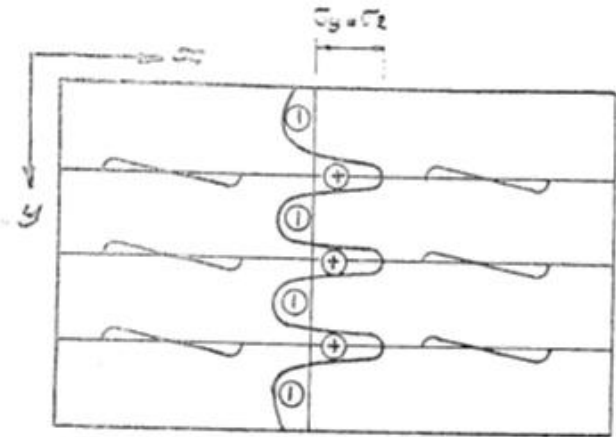


Figura 5.3 – Esquema de tensões residuais em um painel soldado

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

•Pode-se concluir então, que mesmo quando o comportamento estrutural é considerado como um problema dinâmico e estatístico, a impossibilidade de introduzir cientificamente na formulação, efeitos de tensões residuais, tensões térmicas etc., obrigará a incluí-los de forma empírica ou semi-empírica.

•5.5 – Resistência Estrutural

•O termo resistência tem significação relativa. Convém entendê-lo como resistência a uma determinada falha, ou a um dado conjunto de falhas. A precisão do termo estará sempre ligada à da definição das correspondentes falhas. Em literatura técnica ele frequentemente é vago.

- A resistência a certa falha dependerá dos seguintes fatores:
 - Geometria da estrutura e suas variações;
 - Propriedades mecânicas que se relacionem com a falha, em questão, e suas variações;
 - Valor e distribuição dos esforços internos, que possam facilitar ou dificultar a falha (tensões residuais);
 - Detalhes de fabricação e suas variações.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- As variações mencionadas acima, referem-se aos desvios de valores das grandezas correspondentes, de um ponto para outro, ou de um instante para outro. Elas são aleatórias. Consequentemente, a resistência estrutural também é aleatória, merecendo ser estudada estatisticamente, tal como se faz hoje, para a previsão das cargas.

-

•5.6 – Probabilidade de Falha

- A ocorrência de uma falha dependerá das cargas e da resistência estrutural que a condicionarem. Dado o caráter aleatório, tanto das cargas como da resistência, qualquer falha também é aleatória. Não há, sentido portanto, em tentar estabelecer, deterministicamente se haverá ou não, esta ou aquela falha.

- O que se pode dizer é que a falha poderá ocorrer, com probabilidade entre zero e um. A determinação desta probabilidade passa a ser um mero problema matemático, uma vez que já se tenha conseguido estabelecer as distribuições de probabilidade de ocorrência dos esforços e da resistência pertinentes.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Mesmo com os modernos recursos computacionais, este tipo de cálculo ainda é trabalho e mesmo assim exige uma série de hipóteses simplificadoras, limitando sua aplicabilidade a algumas situações bem específicas. Existem muita pesquisa sobre o assunto, principalmente quando relacionados a estruturas offshore.

•5.7 – Tensões Admissíveis

- Uma tensão admissível é um indicador, destinado a manter a probabilidade de ocorrência de uma falha, ou de um conjunto de falhas, em valores aceitavelmente baixos. Quanto mais grave for a falha a que se vise, tanto menos deverá ser a probabilidade de falha admitida. Conferiu-se a tensão admissível, a função de “indicador”, porque se supõe que ocorrerá a falha sempre que certa função das tensões atuantes igualar ou superar um valor que se considere admissível.

- Na realidade essa suposição raramente pode justificar-se cientificamente, isto é, raramente se dispõe de uma teoria cientificamente válida para estabelecer a função das tensões e seu valor admissível, como adiante procurará se demonstrar. Observe-se que a tensão admissível não é necessariamente uma tensão, mas uma função de tensões, com a dimensão de tensão.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

•5.7 – Abordagem Determinística

- Diante da Complexidade e insuficiências que ainda se encontram no tratamento do problema estrutural como dinâmico e estatístico, ainda é necessário considera-lo estático e determinístico, para quase todas as finalidades práticas. Isto demanda que se façam hipóteses muito mais numerosas e incertas. Ganha-se em eficiência e perde-se em compreensão.
- A suficiência dos resultados passa a depender mais da comprovação experimental e a evolução tem que ser lenta e cautelosa, agregando resultados de diversas fontes e conciliando diversos julgamentos. Alia-se à teoria, grande dose de intuição a qual, por sua vez, pode servir-se de estudos mais teóricos para educar-se.
- A transformação do problema estrutural em estático e determinístico requer que sejam selecionados certos carregamentos estáticos, que se adotem certos métodos de cálculo e que se estabeleçam certas tensões admissíveis. A mudança de uma dessas três partes do processo, mantendo-se as demais inalteradas já levará a resultados diferentes.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- As simplificações necessárias à abordagem determinística frequentemente tornam difícil relacionar a realidade dos modelos de carga e mesmo de cálculo que se adotam, dificultando a formação de um juízo próprio em casos particulares, onde é necessário. Podem ainda, ainda levar a uma indevida adoção de carregamentos, métodos de cálculo e tensões admissíveis para casos que não são bem aplicáveis, podendo produzir sub ou superdimensionamento. Para evitar esses inconvenientes, requer-se adequado conhecimento teórico, intuição e maturidade.
- Como exemplo da transformação de um problema estrutural estatístico e dinâmico e um outro determinístico e estático, pode-se mencionar a tradicional avaliação da resistência longitudinal, onde se supõe que o navio se equilibra estaticamente sobre uma onda de perfil selecionado, com uma suposta distribuição hidrostática, na qual se adota, como método de cálculo, a teoria simples de viga, daí se computando as tensões primárias que estaria atuando.
- Nessa avaliação, o carregamento é fictício, conseqüentemente as tensões são normais, isto é, não se podem dizer se realmente atuem, mas servem como indicadores de uma adequada resistência estrutural e, mesmo de um nível de tensões primárias que ocorrerá no navio, com uma probabilidade suficientemente baixa, a qual porém não se sabe qual é.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Os departamentos de pesquisa de algumas Sociedades Classificadoras costumam usar, em certos casos reais, uma versão limitada do método estatístico e dinâmico para avaliação da resistência longitudinal.
- Nestes casos, utilizando critérios hidrodinâmicos, determina-se a distribuição de probabilidade de ocorrência de momentos fletores. Seleciona-se uma dada probabilidade e o correspondente momento fletor como aceitáveis.
- Considera-se a resistência como determinística e dividindo-se o momento fletor pela resistência, diz-se que tem uma tensão primária com aquela probabilidade de ocorrência.
- Compara-se esta tensão com a que se estabeleceu como admissível.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

•5.8 - Critérios de Projeto Estrutural

•Em qualquer projeto estrutural, deseja-se conciliar, da melhor forma possível, os seguintes requisitos gerais:

- Mínima probabilidade de ocorrência de falhas;
- Mínimo custo de fabricação;
- Mínimo custo de manutenção
- Mínimo peso;
- Máxima funcionalidade, isto é, máxima facilidade oferecida pela estrutura e todas as funções necessárias para construir, manter e operar o navio.

•Obviamente os requisitos acima são até certo ponto antagônicos e sua importância relativa depende de cada projeto.

•Um critério de projeto idealmente deveria garantir a satisfação do primeiro destes requisitos e orientar, direta ou indiretamente, para razoável consecução dos demais. Além disso, um critério de projeto deveria, tanto quanto possível, levar a uma rápida convergência dos ciclos do projeto.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Isto pode ser entendido, quando comparamos, por exemplo, os projetos estruturais de dois navios, sendo um longo (digamos com mais de 150 m) e outro curto (por exemplo, com menos de 50 m).
- Teoricamente não há razão para estabelecermos diferentes valores para a tensão admissível s_1 , entretanto, se tal fizermos, tomando como base o navio maior, o projetista, tendo escolhido uma seção inicial para satisfazer este critério, verá que o mesmo não resistirá aos esforços locais que predominam em navios menores. Valores adequados para s_1 nos dois casos contribuem para evitar este inconveniente e outros semelhantes.
- O mesmo se pode dizer para as tensões admissíveis em outras partes da estrutura. Por outro lado, a tentativa de estabelecer tensões admissíveis que não apenas garantam suficiência estrutural, mas também levem a uma rápida convergência do projeto, poderá tolher demasiadamente a liberdade do projetista, conduzindo-o para soluções medíocres.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- A função principal de um critério de projeto é minimizar a probabilidade de ocorrência de falhas. Deve-se frisar que um critério de projeto é um juízo, uma opinião, destinada a avaliar de forma implícita, bastante subjetiva e geralmente determinística, se uma estrutura tem probabilidade de falha.
- Uma estrutura, submetida a diferentes carregamentos, e analisada segundo certo modelo, apresenta diferentes estados de tensão.
- Um mesmo carregamento, mas com diferentes modelos de análise, obtém-se diferentes estados de tensão para uma mesma estrutura.
- Um critério de projeto só é verdadeiramente significativo, quando estabelece, simultaneamente os carregamentos e respectivos modelos de análise, com as correspondentes tensões admissíveis.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- A tensão admissível por si só, pode carecer totalmente de sentido. Normalmente, porém, encontram-se apenas tensões admissíveis quando se pesquisam critérios.
- A exposição acima, mostra que necessitando de critérios de projeto, deve-se estabelecê-los recorrendo a subsídios, que no entanto, deverão ser judiciosamente interpretados e se necessário, completados e modificados.
- Seria longa a enumeração de todos os critérios necessários ao projeto das várias partes da estrutura. Citaremos as principais:
 - Critério para a resistência e deformações primárias;
 - Critério para a resistência e deformações secundárias longitudinais;
 - Critério para a resistência e deformações secundárias transversais;
 - Critério para resistência a deformações terciárias;
 - Critério para as fundações propulsoras principais;
 - Critérios para mastros.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- Faremos breves comentários sobre cada um destes critérios:

- **A) Critério para a resistência e deformações primárias;**

- As deformações primárias podem causar falhas por escoamento, fratura e instabilidade. Esta última pode envolver umas poucas unidades de chapeamento, ou estas e longitudinais de convés, ou uma grande região da grelha do convés ou do fundo. Cada caso deve ser estudado segundo seu próprio mérito.

- O carregamento estático e determinístico deverá ser adotado segundo o apresentado para a Resistência longitudinal, bem como o método de cálculo para a tensão admissível. Esta porém, refere-se a previsão de falha por escoamento no convés ou no fundo.

- A falha por fratura estará automaticamente considerada, exigindo-se adequadas propriedades de ductilidade e de “notch-toughness” e cuidados nos detalhes de fabricação. Quanto a estabilidade, poderá ser adotado o mesmo carregamento, considerando-se porém uma unidade de chapeamento, um longitudinal entre dois transversais ou uma grelha, com métodos de cálculo vistos anteriormente.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Natureza do Projeto Estrutural

- A tensões admissíveis deverão obedecer as seguintes diretrizes:
 - A tensão máxima de compressão das unidades de chapeamento deverá ser, em princípio, 1,5 vezes menos que a de flambagem; caso a tensão de colapso esteja próxima a de flambagem, dever-se-á obter fator de segurança maior;
 - Os fatores de segurança contra a flambagem de longitudinais, sicordas e grelhas, deverão ser maiores que o os unidade de chapeamento e crescentes nesta ordem.
- Ainda sob esse título, deve-se estudar a estabilidade de chapeamento do cintado, na região de força cortante máxima.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

•5.9 - Projeto Estrutural por Regras de Sociedades Classificadora

•Conforme dito anteriormente, o projeto estrutural por sociedade classificadora é baseado em fórmula empíricas e semi-empíricas, que, no entanto são baseados em intenso estudo de cálculos e formulações determinísticas.

•Os centros de estudos das classificadoras normalmente realizam pesquisas intensas, baseadas em fatos passados, de modo a realimentar suas formulações e implementar mais precisão nas determinações de escantilhões, com foco de por um lado, garantir a segurança, mas também a redução de peso e a consequente redução de custos.

•A estrutura de um livro de regras, com respeito ao projeto estrutural, costuma ser mais ou menos comum, independente da classificadora. Cabe notar, que cada vez mais há uma tendência, a que os livros de regras sejam únicos, seguindo as orientações do IACS (International Association of Classification Societies). Com efeito, no que diz respeito ao projeto estrutural, isto já é uma realidade entre seus associados.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

- Passaremos a descrever aqui as principais partes de um livro de regras, no que diz respeito a sua estrutura e como costuma ser as determinações de escantilhões, calculo da resistência longitudinal etc. Usaremos como exemplo as regras do Bureau Colombo, para “REGRAS PARA CONSTRUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE EMBARCAÇÕES DE AÇO PARA NAVEGAÇÃO EM MAR ABERTO”, edição de 2008.
- Normalmente todas as classificadoras costumam começar cada capítulo de seus livros de regras com uma parte destinada a regras gerais, definições e apresentação de nomenclaturas, passando após isto normalmente a determinação da resistência longitudinal e os cálculos dos escantilhões, normalmente separados por regiões do casco (fundo convés etc), tendo normalmente capítulos especiais para tipos de navios particulares. Por exemplo, o Tomo II, referente à Estrutura, do livro do Bureau Colombo, tem a seguinte estrutura:

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

- SEÇÃO 1 - GENERALIDADES E DEFINIÇÕES
-
- SEÇÃO 2 - DIMENSIONAMENTO E DETALHES ESTRUTURAIS
- SEÇÃO 3 - CARREGAMENTOS DE PROJETO
- SEÇÃO 4 - RESISTÊNCIA LONGITUDINAL
-
- SEÇÃO 5 - CHAPEAMENTO DO FUNDO E DO COSTADO
- SEÇÃO 6 - CONVESES
- SEÇÃO 7 - ESTRUTURA DO FUNDO
- SEÇÃO 8 - CAVERNAS
- SEÇÃO 9 - VAUS DE CONVÉS E REFORÇOS DE CONVÉS
- SEÇÃO 10 - ANTEPARAS ESTANQUES À ÁGUA
-
- SEÇÃO 11 - TANQUES
- SEÇÃO 12 - RODA DE PROA, CADASTE, PÉS-DE-GALINHA E TUBO TELESCÓPICO
- SEÇÃO 13 - LEME E APARELHO DE GOVERNO
- SEÇÃO 14 - SUPERESTRUTURAS E CASARIAS
- SEÇÃO 15 - ESCOTILHAS.
- SEÇÃO 16 - EQUIPAMENTO
- SEÇÃO 17 - LIGAÇÕES SOLDADAS
- SEÇÃO 18 - EXECUÇÃO DOS TRABALHOS
- SEÇÃO 19 - ACABAMENTO E INSTALAÇÃO
- SEÇÃO 20 - ACOMPANHAMENTO DOS SERVIÇOS NO ESTALEIRO
-
- SEÇÃO 21 - NAVIOS PETROLEIROS
- SEÇÃO 22 - REGRAS ADICIONAIS COMPLEMENTARES PARA NAVIOS-TANQUE
- SEÇÃO 23 - NAVIOS DE PASSAGEIROS
- SEÇÃO 24 - REBOCADORES
- SEÇÃO 25 - NAVIOS PESQUEIROS
- SEÇÃO 26 - DRAGAS.
- SEÇÃO 27 - CHATAS-PONTÕES
- SEÇÃO 28 - NAVIOS PARA NAVEGAÇÃO EM ÁGUAS RASAS
- SEÇÃO 29 - REGRAS ESPECIAIS PARA DIQUES FLUTUANTES
-
- SEÇÃO 30 - REGRAS, INSTRUÇÕES E PROCEDIMENTOS PARA CLASSIFICAÇÃO E TESTES
- EM VASOS COM CARGA SOB PRESSÃO

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

- Alguns exemplos de várias partes do livro de regras.

- **“3.2 - CARREGAMENTO EXTERNO DEVIDO AO MAR**

- **3.2.1 - Carregamento em Convés Exposto** - Devem ser tratados como conveses expostos todos os conveses possíveis de serem atingidos pelas águas do mar conforme definido na Seção 1, item 1.6. Para os conveses expostos de superestruturas e casarias, ver o item 3.2.4.

-

- **3.2.1.1 - Fórmula**

- O carregamento dos conveses expostos deve ser determinado pela seguinte fórmula:

$$P_D = p_0 \cdot \frac{10 \cdot H \cdot c_a}{P \cdot (10 + z)} \quad [\text{kN/m}^2]$$

Projeto Estrutural 1

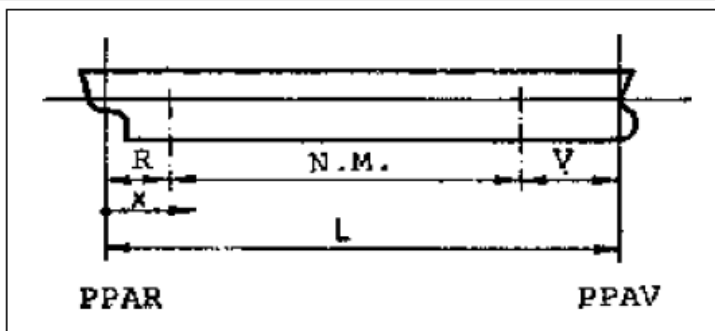
Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

- $p_0 = 10,5 \cdot c_1$, em $[kN/m^2]$
- $c_1 = 0,0226 \cdot L$, para L menor que 100 m
- $c_1 = c_0 / 3,5$, para L maior ou igual a 100 m
- $c_0 = 10,75 - [(300 - L) / 100]1,5$, para L menor que 300 m
- $c_0 = 10,75$, para L maior ou igual a 300 m e menor ou igual a 350 m
- $c_0 = 10,75 - [(L - 350) / 100]1,5$, para L maior que 350 m
- L = comprimento, em $[m]$
- H = calado, em $[m]$
- P = pontal, em $[m]$
- z = distância vertical entre o convés exposto e a linha d'água do calado máximo, em $[m]$
- c_a = coeficiente adimensional obtido da seguinte tabela,
- e conforme mostrado na Figura 3.1



Região	Posição longitudinal no convés	c_a
R	$0 \leq x / L \leq 0,1$	1,1
N.M.	$0,1 \leq x / L \leq 0,8$	1,0
V	$0,8 \leq x / L \leq 1,0$	$(2,5 \cdot x / L) - 1$ para $L \leq 100$ m $(10 \cdot x / L) - 7$ para $L \geq 200$ m

x = distância do convés, a partir da perpendicular a ré (PPAR), em $[m]$.
Para L entre 100 e 200 m, C_a deve ser obtido por interpolação.

Figura 3.1

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

•5.9.2 - Resistência Longitudinal

•“4.2.2 - Momentos Fletores Verticais Devido a Onda

•4.2.2.1 - Momento Fletor Vertical a Meia - Nau

•O momento fletor vertical, a meia-nau, devido a onda, deve ser determinado através da seguinte fórmula:

-
- $MW_v = 190 \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot CB \cdot 10^{-3} [kN \cdot m]$ em alquebramento
- $MW_v = 110 \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot (CB + 0,7) \cdot 10^{-3} [kN \cdot m]$ em tosamento
-

•onde

- $C = 10,75 - [(300 - L) / 100]1,5$ para $90 \leq L < 300 \text{ m}$
- $C = 10,75$ para $300 \leq L \leq 350 \text{ m}$
- $C = 10,75 - [(L - 350) / 150]1,5$ para $L > 350 \text{ m}$
- CB não pode ser tomado com valor inferior 0,6

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

•4.2.2.2 - Distribuição do Momento Fletor Sobre o Comprimento L

•O momento fletor, em onda, deve ser distribuído sobre o comprimento L de acordo com as seguintes fórmulas:

-
- $M W v(x) = M W v . C M$
-
- O fator CM está plotado na Fig. 4.1
-
- $CM = 2,5 \cdot (x / L)$ para $x / L < 0,4$
- $CM = 1,0$ para $0,45 \leq x / L \leq 0,65$
- $CM = 2,86 \cdot [1 - (x / L)]$ para $x / L > 0,65$

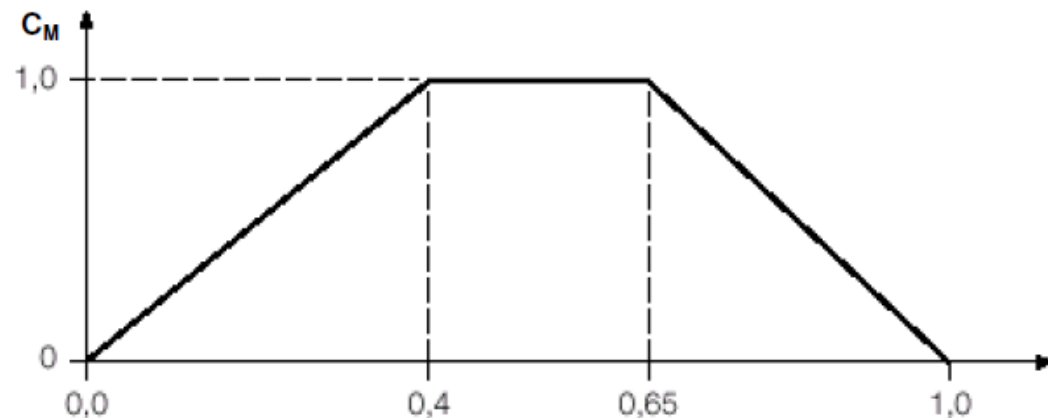


Figura 4.1

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

•5.9.3 - Escantilhões

•“5.2.1 - Chapeamento Dentro de 0,4 L, a Meia-Nau

•5.2.1.1 - Espessura

- A espessura do chapeamento do fundo para navios com comprimento de até 100 m não deve ser menor que:

$$t = n_1 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{p_B \cdot k}{16,5 + \frac{L}{50}}} \left(1 + \frac{L}{300} - \frac{P}{25}\right) + t_k \quad [\text{mm}]$$

- espessura do chapeamento do fundo para navios com comprimento acima de 100 m deve ser determinada de acordo com

$$t = n_2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot p_B}{\sigma_{adm} - \sigma_B}} + t_k \quad [\text{mm}]$$

$$\sigma_{adm} = 230/k \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$t_{min} = 1,26 \cdot a \cdot (p_B \cdot k)^{0,5} + t_k \quad [\text{mm}]$$

- A espessura não pode ser inferior à espessura crítica definida em 5.2.2, nem à espessura nas extremidades conforme 5.2.2.1.”

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

•5.9.4 – Regras Especiais

•Navios Tanques

•21.5.2 - *Análise de Tensões*

•21.5.2.1 - *Uma análise de tensões tridimensional deve ser feita para vigas e gigantes para as condições de carregamento resultantes do arranjo de tanques e dos calados. Os cálculos para longarinas e gigantes transversais devem ser executados, no mínimo, para as seguintes condições de carregamento:*

- a) *tanque central cheio, tanques laterais vazios, calado $H1 = D/4$ (ver Fig. 21.1.a)*
- b) *tanque central cheio, tanques laterais vazios, calado $H2 = HMAX$ (ver Fig. 21.1.b)*
- c) *tanque central cheio, tanques laterais vazios, pressão externa conforme banda de 20 graus, 1ado*
- do convés imerso.*
- d) *tanques laterais cheios, tanque central vazio, calado $H3 = Hmin$ na condição de lastro (ver Fig. 21.1.d);*
- d) *tanques laterais cheios, tanque central vazio, calado $H4 = HMAX$ na condição de lastro, $H4min = H/3$ (H = calado de verão)*
- As condições de carregamento, conforme Fig. 21.1, se aplicam analogamente para navios petroleiros com 3 e mais anteparas longitudinais e/ou casco duplo.*

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto Estrutural por Sociedades Classificadoras

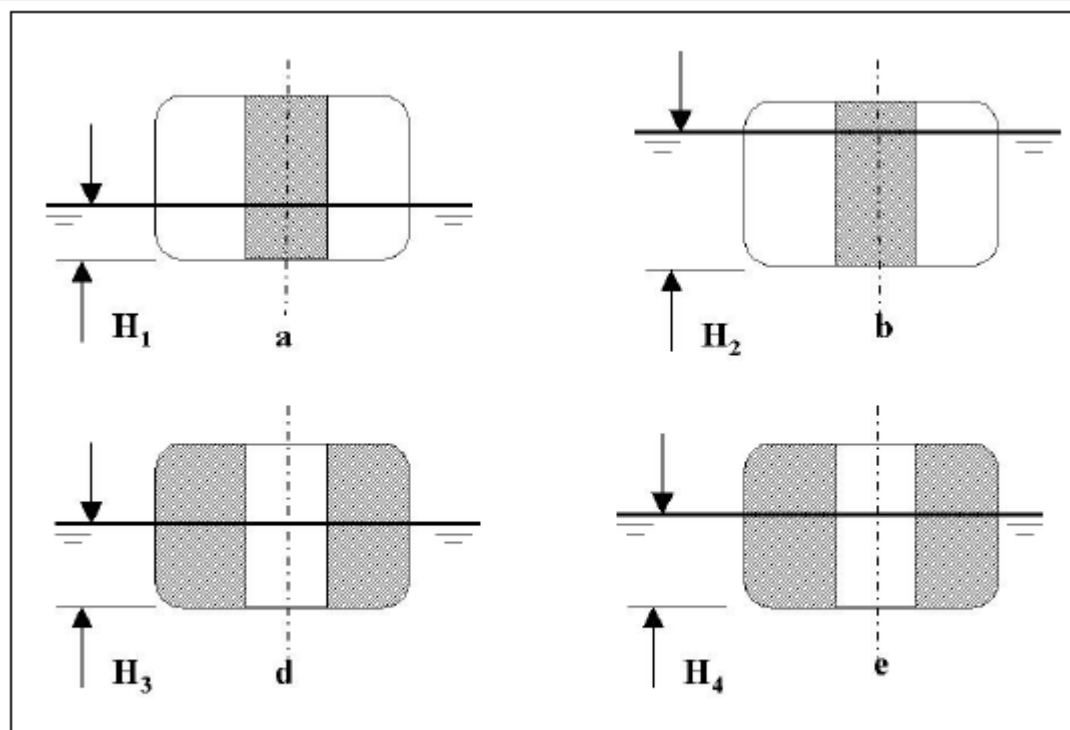


Figura 21.1

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

- A seção mestra de um navio é a seção principal resistente.
- Normalmente é a seção de maiores dimensões tanto globais (Pontal, Boca, etc.) como dos elementos estruturais (espessuras de chapeamento, alturas de elementos, etc.).
- O Projeto de Seção Mestra pode ser tanto racional ou por regulamento de Sociedades Classificadoras.
- No projeto racional, adota-se uma topologia inicial, com uma geometria da seção escolhida por algum critério válido (navio semelhante por exemplo), onde aplica-se as cargas conhecidas, determinando tensões e deformações na estrutura, verificando-se se as mesmas estão abaixo de um limite de aceitação (tensões admissíveis, deslocamentos máximos, etc.).
- Caso a estrutura inicial não atenda aos critérios de aceitação, procede-se alterações em parte ou na totalidade da topologia, recalcula-se e verifica-se novamente até que haja convergência.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

- Uma das principais dificuldades do projeto racional é o conhecimento de todas as cargas e esforços a que a estrutura possa estar sendo submetida.
- Outra dificuldade importante é estabelecer quais os critérios de aceitação para tensões e deslocamentos.
- Uma outra dificuldade que nos dias de hoje está se tornando menos crítica devidos aos avanços computacionais, é a quantidade de cálculos e análises necessárias num estrutura hiperestática, autossustentável, que nem sempre permite utilizar as formulações mais simples da estática ou mecânica dos sólidos.
- É cada vez mais comum a análise por modelação estrutural, normalmente por análise por elementos finitos. No entanto ainda é uma tarefa trabalhosa que muitas vezes não se justifica nas fases muito iniciais dos projeto estrutural.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

- No dimensionamento de seção mestra por sociedade classificadora, utiliza-se o conjunto de formulações indicadas pela S.C. adotada, determinando-se uma série de escantilhões, com poucas decisões a serem tomadas por parte dos projetistas.

Espessura do Fundo Duplo

Segundo o item 9.1 das regras da ABS Seção 3.2-4, a espessura mínima da longarina do fundo para navios de comprimento menor que 427 metros é definido segundo a equação:

$$t = 37.0L \cdot 10^{-3} + 0.009s - c \quad \text{mm} \quad \text{for } L \leq 427 \text{ m}$$

Sendo $c = 1.5 \text{ mm}$;

Aplicando os valores do navio, obtém-se:

$$t = 18.18 \text{ mm}$$

Arredondando o valor obtido de espessura para o valor comercial mais próximo e acima do obtido, tem-se:

$$t = 19.05$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

- No dimensionamento por Sociedade Classificadora, após dimensionados os escantilhões, uma verificação dos critérios de resistência longitudinal se faz necessária.
- A análise da resistência longitudinal é feito por base nos critérios de viga navio e portanto devemos calcular o Módulo de Seção e a Inércia da Seção Mestra dimensionada, comparando-se com o estabelecido como limite pela S.C.

	Requerido [cm ² .m ²]	Calculado [cm ² .m]	Margem
Módulo de Seção	716562	921965	28.8%
Momento de Inércia	7032206	13440840	91.1%

- Por exemplo, na tabela acima, retirada de um trabalho acadêmico, o valor do Módulo de Seção Calculado, está acima do requerido em cerca de 29%, porém a Inercia da seção está cerca de 91% acima do limite, deixando claro que a seção poderia ser mais otimizada.

Projeto Estrutural 1

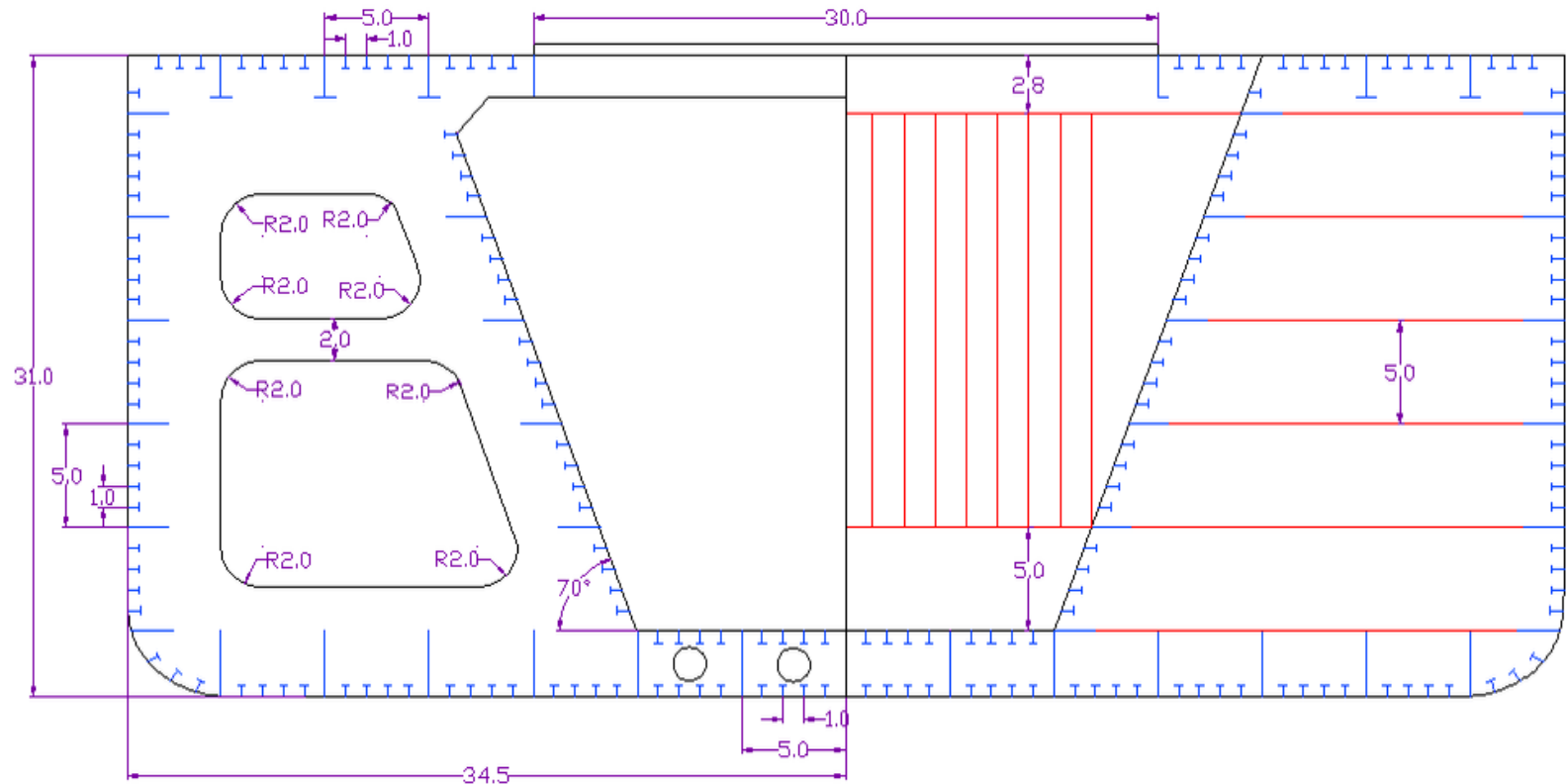
Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

Topologia da Seção Mestra



Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

•No projeto de dimensionamento de Seção Mestra por S.C., deve-se iniciar com um arranjo preliminar da seção, onde deve-se tomar decisões iniciais sobre a topologia estrutural, tais como:

- Altura do fundo duplo
- Posição das longarinas de fundo
- Posição e quantidade de sicordas e escoas
- Posição e quantidade de anteparas longitudinais
- Espaçamento de reforçadores longitudinais (fundo, TFD, costado, convés, etc.)
- Espaçamento de cavernas
- Posição de aberturas e furos nos elementos transversais
- Tipo de antepara transversal (plana, corrugada, etc.) e suas características (quantidade de prumos, dimensões de corrugados, etc)

•Nesta fase ainda não se sabe nem espessuras nem seções dos reforçadores e vigas, apenas se localiza geometricamente os elementos estrutural na geometria da seção, conforme figura anterior

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

- Conforme dimensiona-se os elementos estruturais por S.C., teremos então os seguintes dimensionamentos mínimos
 - Espessuras de todos os chapeamentos existentes na seção
 - Módulos de seção dos elementos de viga, ou seja, reforçadores de painel, escoas, sicordas, cavernas, etc.
 - Dimensões de elementos especiais, tais como, furos de alívio, furos de passagem, borboletas, prumos, etc.
- A seguir deve-se determinar estes mesmos valores calculados, baseados na realidade existente no local de construção.
- Por exemplo, as espessuras de chapeamento tem que ser adequadas as chapas existentes no mercado ou aos padrões do estaleiro que irá construir. Da mesma forma os módulos de seções das vigas, tem que ser adequadas aos tipos de seções a serem utilizadas pelo estaleiro.
- Ou seja, o projeto por S.C., pode ser feito para qualquer situação, mas o valor final dos escantilhões deve ser adaptado a realidade da construção, mantidos os requisitos de resistência longitudinal e valores mínimos das S.C. utilizada.

Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Dimensionamento da Seção Mestra

ESPESSURAS PADRÃO (mm)		
6.30	19.00	44.50
8.00	22.40	50.00
9.50	25.00	63.00
12.50	31.50	75.00
16.00	37.50	100.00

LARGURAS PADRÃO (mm)		
1000	1500	2440
1200	2000	

COMPRIMENTOS PADRÃO (mm)	
6000	12000

- Exemplo de valores comerciais aplicados a um projeto

$$t_{ct} = 2,5 + \left(\frac{s}{828}\right) \sqrt{(L + 175) \left(\frac{d}{D}\right)} \text{ mm}, \quad 305 < L \leq 427 \text{ m}$$

$$\frac{d}{D} > 0,0433 \left(\frac{L}{D}\right)$$

Onde:

s – Espaçamento entre longitudinais de costado (mm)

L - Comprimento de Escantilhão (m)

d - Calado de verão (m)

D - Pontal de escantilhão (m)

$$s' = 601 \text{ mm}$$

Resultado:

$$t_{ct} = 28,72 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{D} = 0,85 \text{ (Atende)}$$

De acordo com o catálogo de espessuras comerciais:

$$t_{ct} = 31,5 \text{ mm}$$

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

•Objetivo:

•O trabalho consiste em realizar o dimensionamento da Seção Mestra de um navio fornecido, através do uso das regras de uma Sociedade Classificadora e determinar a primeira estimativa da resistência longitudinal da estrutura do navio utilizando o SMath.

•Metodologia:

•No trabalho, serão realizados através de algumas etapas, o dimensionamento dos escantilhões da Seção Mestra por Sociedade Classificadora, determinando os esforços longitudinais (cortante e fletor), calculados para algumas condições de carregamento solicitadas utilizando o Maxsurf e o Smath.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

•Elaboração do Projeto:

•**Parte 1:** Com base no tipo de navio fornecido, selecionar, através de pesquisa por navios semelhantes, as dimensões principais de seu navio.

•No mínimo devem ser obtidos:

- Comprimento total (Loa) e/ou Comprimento entre perpendiculares (Lpp)
- Boca (B)
- Pontal (D)
- Calado de projeto (T)
- Coeficiente de Bloco (CB) e/ou Deslocamento e/ou Porte Bruto
- Velocidade de serviço (VS)
- Número e posição das anteparas transversais da região de carga, piques de vante e ré e da praça de máquinas.

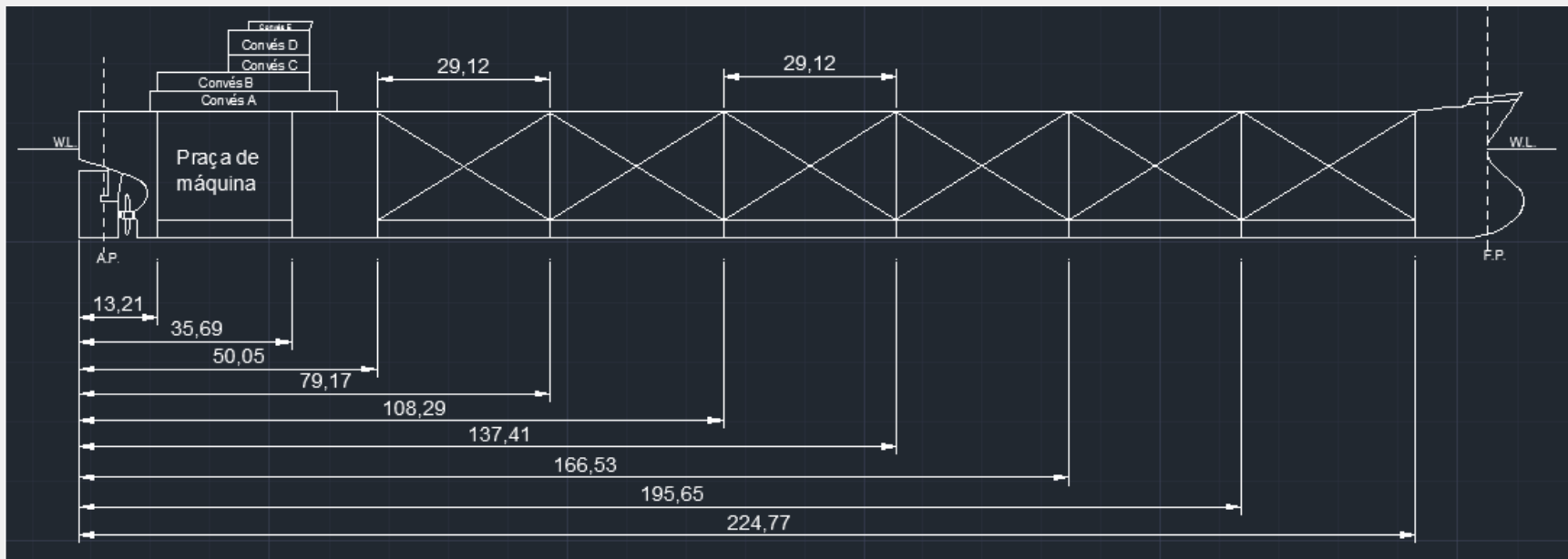
Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso



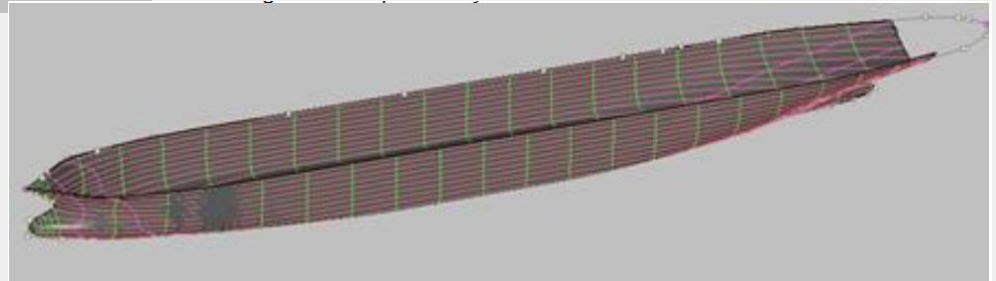
- Exemplo de posicionamento de anteparas e tamanho de porões

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

- **Parte 2:** Com base nos dados principais e no tipo de navio, obter, através do uso do software MaxSurf (ou outro similar), uma forma padrão para o seu casco, determinando assim a curva de áreas seccionais do navio, calculadas até o pontal.

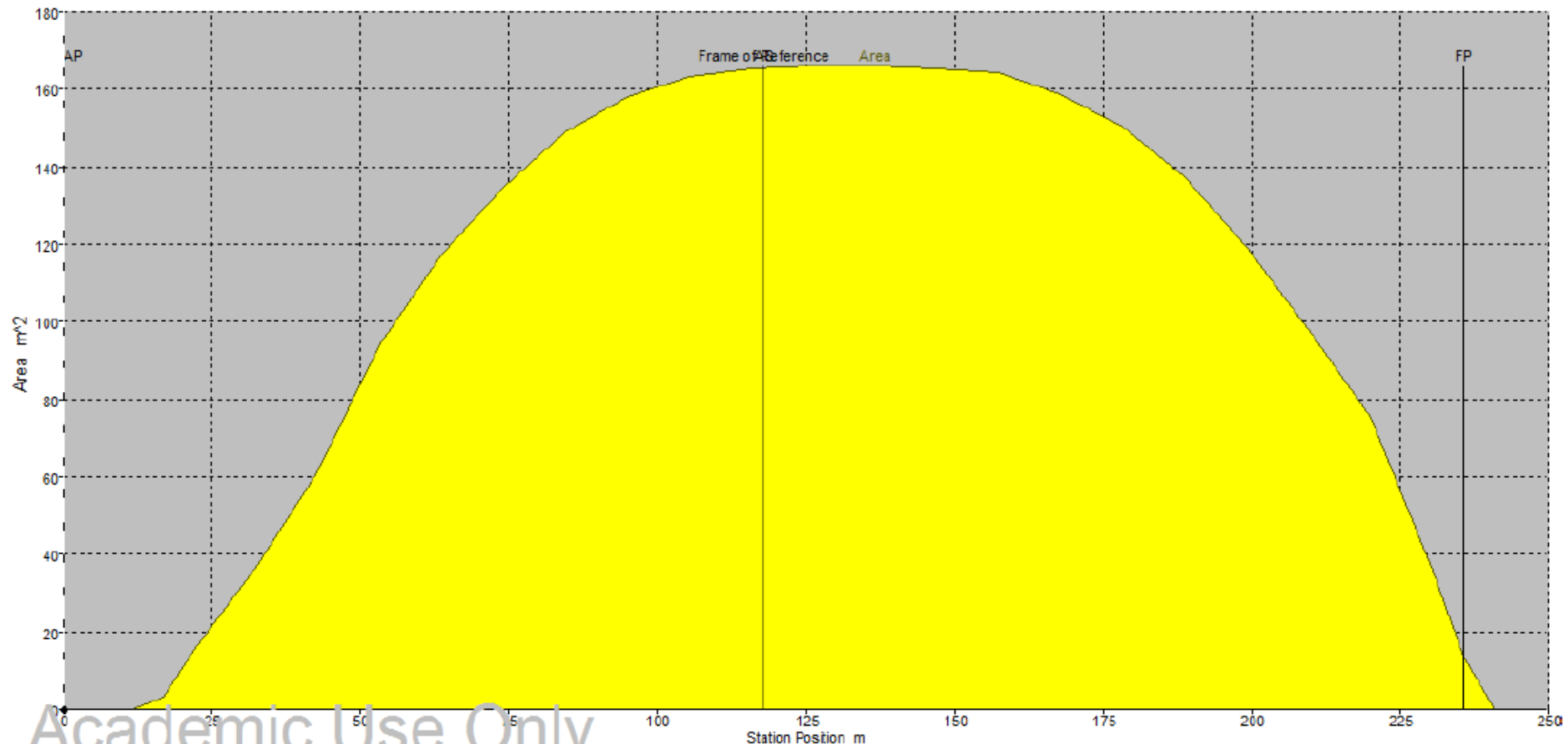


- Deverá ser apresentado um desenho simplificado do arranjo geral, em escala, em papel A3, aproveitando o máximo possível de área do papel, seguindo as normas técnicas para apresentação de trabalhos acadêmicos, contendo além do perfil do casco, a posição das anteparas transversais e do fundo duplo.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso



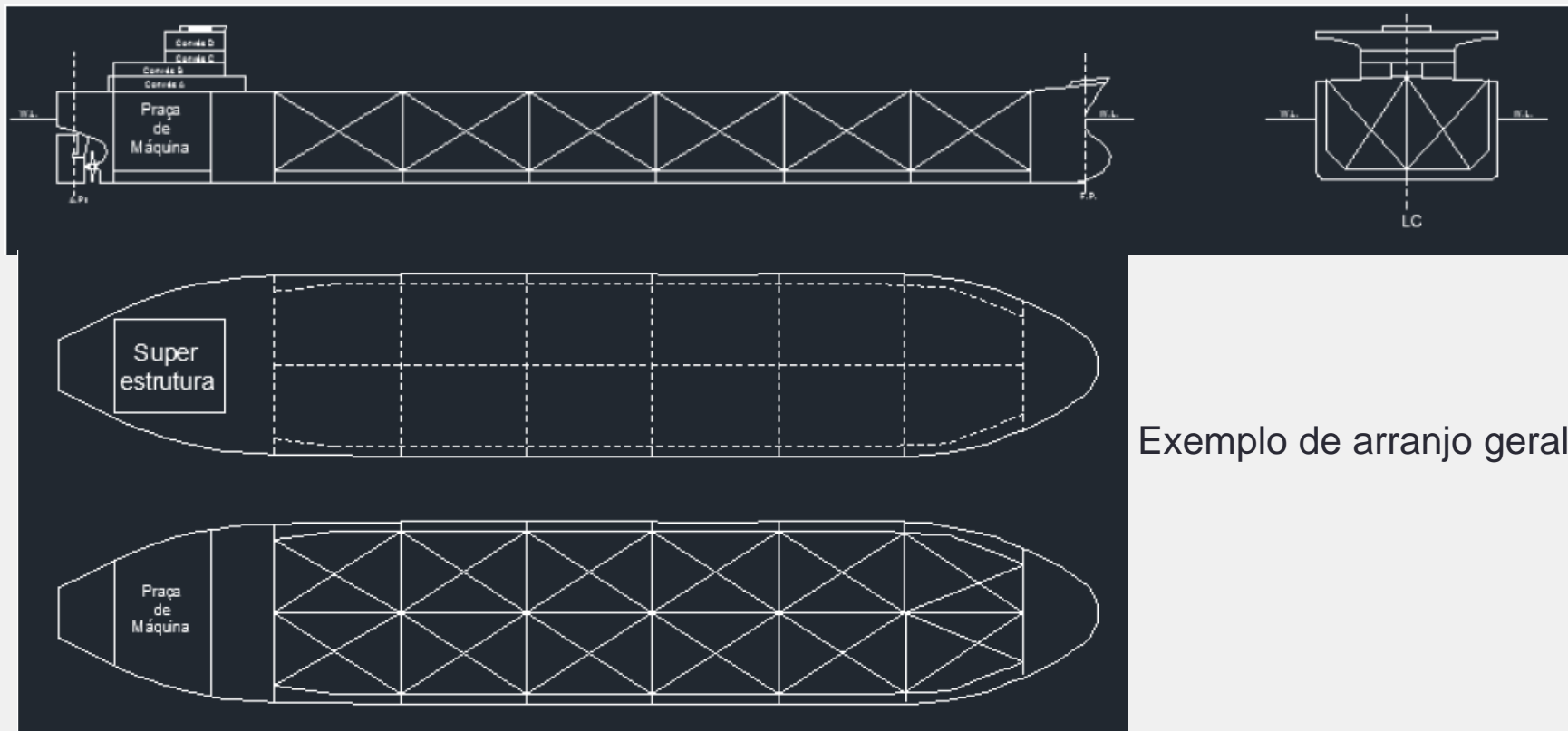
Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso



Exemplo de arranjo geral

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



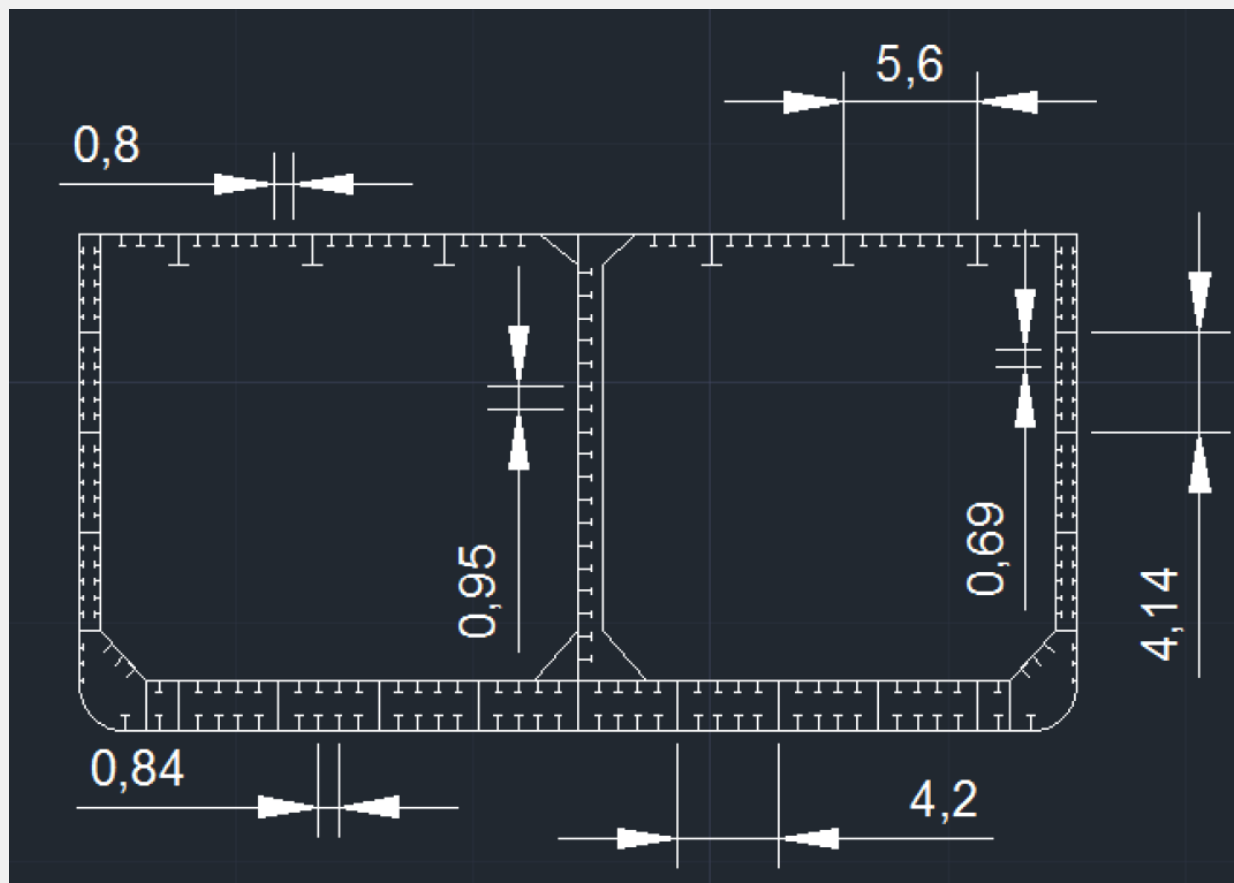
Projeto de Curso

- **Parte 3:** Realizar o dimensionamento dos escantilhões da seção mestra, usando a regra da Sociedade Classificadora ABS. Devem ser dimensionados todos os elementos longitudinais e os elementos transversais gigante que houverem (hastilhas de fundo, cavernas gigantes, vaus gigantes).
- Ao final do dimensionamento, determinar o peso (por metro) da Seção Mestra (em ton), considerando os gigantes transversais. Considerar a densidade do Aço como sendo $7,85 \text{ t/m}^3$, para todos os elementos estruturais. Determinar o Momento de inércia (I) de sua Seção Mestra.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso



Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

•**Parte 4:** Com o peso da Seção Mestra e com a Curva de Áreas Seccionais, determinar a curva de peso leve do navio, com as seguintes considerações:

- A curva de peso do casco é proporcional à curva de peso leve, onde o peso máximo será o da Seção Mestra nos gigantes.
- As anteparas transversais serão pesos distribuídos ao longo da largura da base da antepara (geralmente dois espaçamentos de gigantes) e terão seu peso calculado pela seguinte formula: , onde A_{AT} é o valor da curva de áreas seccionais na posição da antepara transversal. Opcionalmente, pode-se determinar o peso real da antepara transversal (dimensionada pela regra da Soc. Classificadora) na região de corpo paralelo e considerar as demais proporcionais em relação a curva de áreas seccionais.
- O peso da superestrutura será calculado pela seguinte fórmula (sendo considerada carga distribuída ao longo do comprimento da superestrutura):
 - , onde: n_c é o número de conveses da superestrutura, e L_{SE} é o comprimento da superestrutura. Opcionalmente, pode-se estimar o peso de aço de cada convés de superestrutura, apresentando os devidos cálculos comprobatórios.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

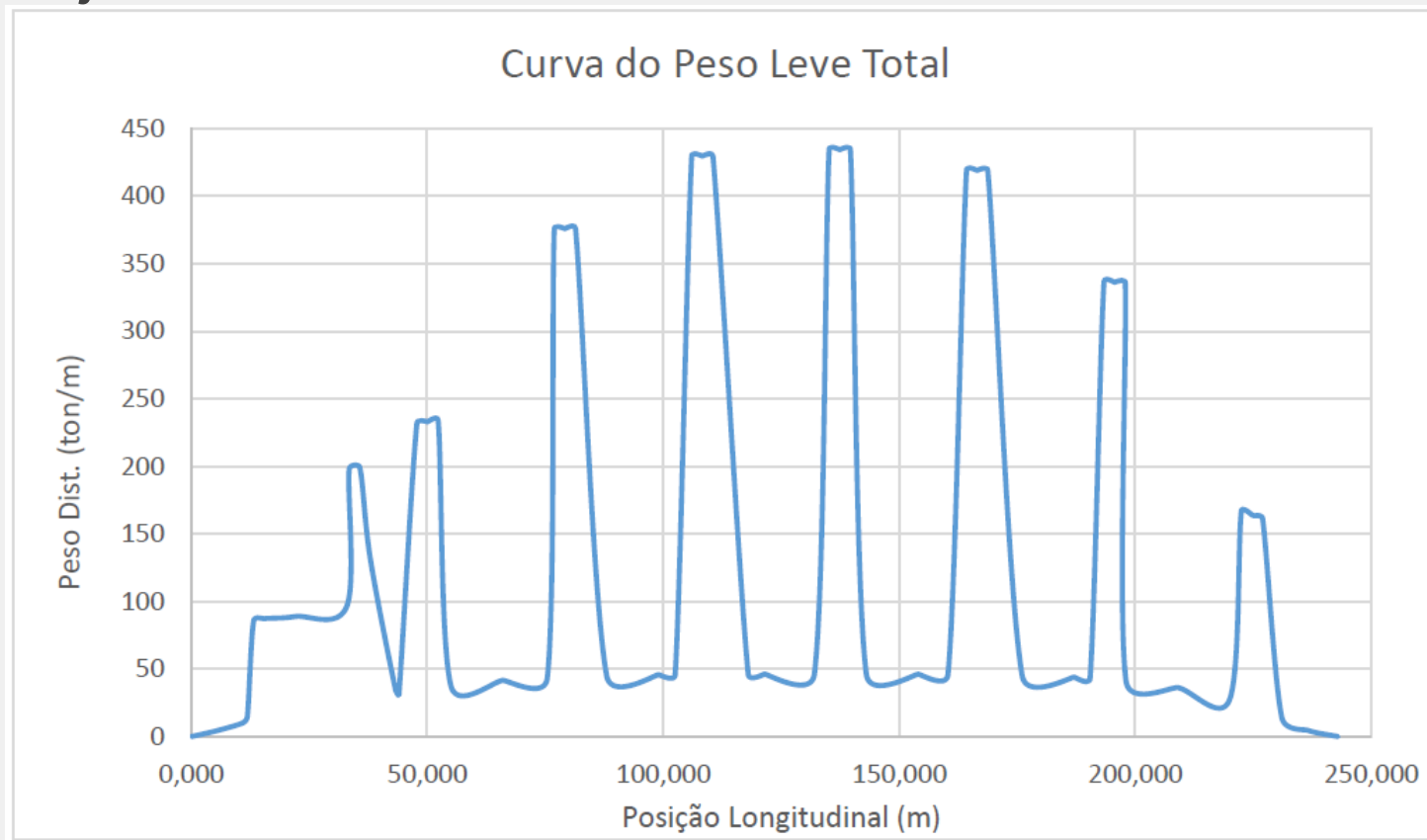
•**Parte 4:** Com o peso da Seção Mestra e com a Curva de Áreas Seccionais, determinar a curva de peso leve do navio, com as seguintes considerações:

- Os pesos de equipamentos de convés são considerados desprezíveis, a não ser no caso de guindastes (se houver), que devem ter seu peso considerado como carga concentrada.
- Os pesos do equipamento da praça de máquinas serão obtidos pela seguinte fórmula (considerado como carga distribuída ao longo do comprimento da praça de máquinas): , onde L_{PM} é o comprimento da Praça de máquinas.

Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso



Projeto Estrutural 1

Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

•**Parte 5:** Determinar os limites de resistência longitudinal da Sociedade adotada, plotando seus valores para águas calmas e ondas. Determinar os módulos de seção mínimos requeridos. Comparar com o módulo de seção de sua Seção Mestra, se não atender, redimensionar a mesma.

$$SM = M_t / f_p \text{ cm}^2.m$$

$$M_t = M_s + M_w$$

$$I = \frac{L * SM}{33,33} \text{ cm}^2.m^2$$

Propriedades	Valor Calculado	Valor Requerido	Unidades
I =	344,275	169,544	m ⁴
Zfundo =	38,052	24,66	m ³
Zconvés =	29,545	24,66	m ³

Projeto Estrutural 1

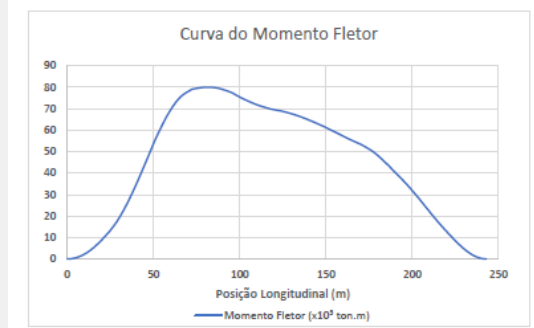
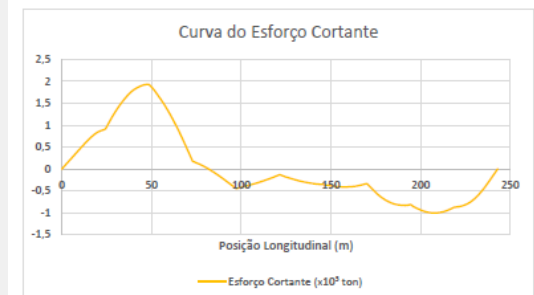
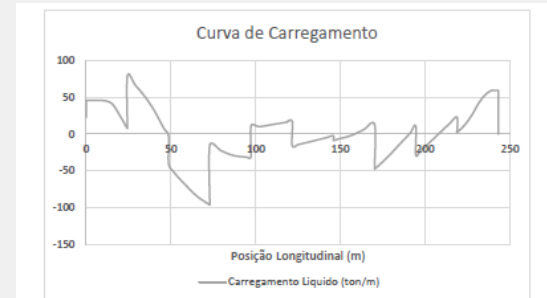
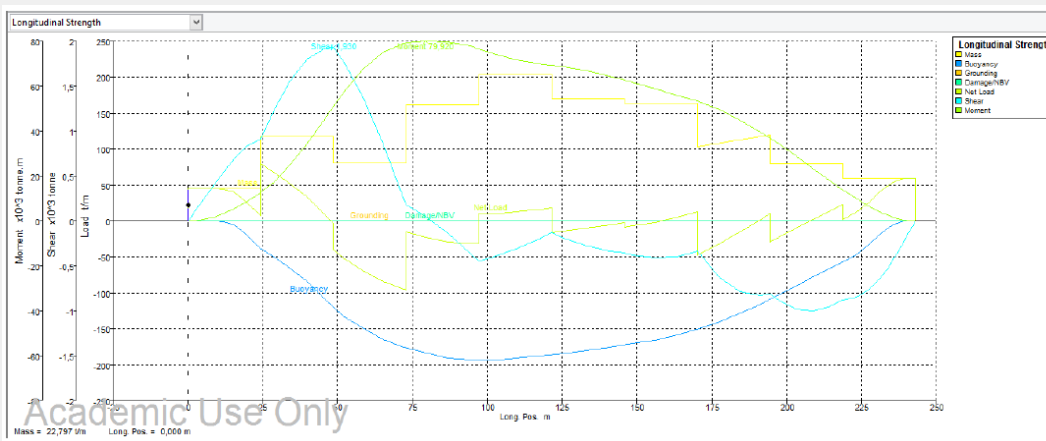
Curso de Engenharia Naval

Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

•**Parte 6:** Determinar as curvas de Esforços Cortantes e Momentos Fletores, para a condições de carregamento. Nesta fase a curva se Peso e Empuxo deve ser importa da do Maxsurf para o Smath onde devem ser realizadas as integrações numéricas para a obtenção do Esforço Cortante e Momento Fletor.



Projeto Estrutural 1
Curso de Engenharia Naval
Universidade Federal de Pernambuco



Projeto de Curso

- Devem ser entregues os arquivos do Maxsurf, Autocad e Smath onde devem constar os seguintes itens:
 1. Dados completos do Navio;
 2. Desenho com o Arranjo Geral simplificado (só necessário o perfil);
 3. Todos os valores dos escantilhões, indicando qual foi a formulação da Classificadora utilizada para seu dimensionamento (fórmula, tabela etc.);
 4. Desenho da Seção Mestra, com a geometria definida;
 5. Valores calculados para a curva de peso leve e suas respectivas posições
 6. Desenho da Curva Peso leve
 7. Valores limites para a resistência longitudinal pela Classificadora (cortante, Fletor, Módulo de seção)
 8. Desenho das curvas de carregamento, esforço cortante e momento fletor, para cada uma das três condições de carregamento fornecidas, dentro das respectivas envoltórias.