

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO EM COMPÓSITO DA ESTRUTURA DE UM LEME DE UM VELEIRO DA CLASSE  
SNIPE

Por

Carlos Felipe Hermuth Hofstaetter

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO EM COMPÓSITO DA ESTRUTURA DE UM LEME DE UM VELEIRO DA CLASSE  
SNIPE

Por

Carlos Felipe Hermuth Hofstaetter

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ARNALDO RUBEN GONZALEZ  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Comissão de Avaliação:

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 04 de Julho de 2011.



HOFSTAETTER, C. F. H. **PROJETO EM COMPÓSITO DA ESTRUTURA DE UM LEME DE UM VELEIRO DA CLASSE SNIPE**. 2011. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **RESUMO**

O presente trabalho é o projeto estrutural de um leme de um veleiro da classe Snipe. Suas dimensões são definidas pela normatização da classe, mas os métodos de fabricação não. Sendo assim, as forças atuantes são estimadas através de simplificações e estes carregamentos são utilizados para o projeto estrutural do componente. Este projeto é simulado com um modelo de elementos finitos, analisando os pontos mais solicitados. Com estas informações o projeto do leme em compósito é refinado, com as regiões mais solicitadas reforçadas conforme magnitude e direção dos carregamentos, garantindo um leme mais resistente e com menor peso. Para isto, os materiais propostos para o laminado são espuma de PVC, fibra de vidro e resina epóxi sendo alterados conforme as verificações das análises. Também é feita a verificação de forma analítica dos esforços no laminado de forma que seja possível comparar com os resultados de elementos finitos.

**PALAVRAS-CHAVE:** compósito, laminado sanduíche, fibra de vidro, espuma.

HOFSTAETTER, C. F. H. **Design of structure composite of a snipe class sailboat rudder.** 2011. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **ABSTRACT**

This work presents the structural design of a snipe class sailboat rudder. Its dimensions are defined by class standards, but not the manufacturing methods. Thus, the acting forces are estimated through simplifications and these loads are used for the structural component design. This design is simulated as a finite element model for analysing the critical points. With this information the rudder project is thus refined, and the critical regions are reinforced according to the magnitude and direction of loads, ensuring a lighter and more durable rudder. For this goal, the proposed materials for the laminated structure are PVC foam, fiber glass and epoxy resin which are changed according to the results of analysis. Also an analytical estimation is conducted to check finite elements results.

**KEYWORDS:** composite, sandwich laminate, fiberglass, foam.

<b>RESUMO</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	3
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	3
2.1. Parâmetro para construção de um leme de um veleiro da classe snipe seguindo o livro de regras da classe SCIRA (2009-2012): .....	3
2.2. Estrutura sanduíche .....	4
2.2.1. Matriz .....	4
2.2.2. Fibras .....	4
2.2.3. Núcleo .....	5
2.3. Métodos construtivos .....	5
2.4. Falhas em laminados .....	6
2.4.1. Critério de Tsai-Wu .....	6
2.4.2. Critério de falha da máxima tensão normal .....	7
<b>3. ETAPA DE CÁLCULOS</b> .....	7
3.1. Verificação dos esforços atuantes em um leme. ....	7
3.2. Restrições de movimento .....	8
3.3. Estimar propriedades das lâminas .....	9
3.4. Análise dos esforços do leme de configuração igual ao existente .....	10
3.4.1. Verificação analítica .....	11
3.4.2. Análise por elementos finitos .....	11
3.4.2.1. Modelo em Placa plana .....	11
3.4.2.2. Modelo em três dimensões .....	11
3.5. Resultados para configuração já existente .....	13
3.6. Proposta de melhoria na seqüência de laminação .....	14
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	15
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	15
I. Anexo I – Geometria permitida pela SCIRA .....	16
I. Apêndice I – Análise de viga .....	17
II. Apêndice II – Análise de placa plana .....	18
III. Apêndice III - Estimativa do peso final .....	19
IV. Apêndice IV - Análise dos critérios de falha .....	20

## 1. INTRODUÇÃO

Um componente construído em compósito utiliza dois ou mais materiais com características distintas, de forma a se completarem. Fibras de vidro têm ótima capacidade de tração e uma resina enrijecida comporta-se muito bem à compressão, unindo estes dois materiais obtemos um “novo” material com propriedades bem específicas. Podemos ver na Figura 1.1, uma combinação de camadas de fibras e matrizes formando um laminado.

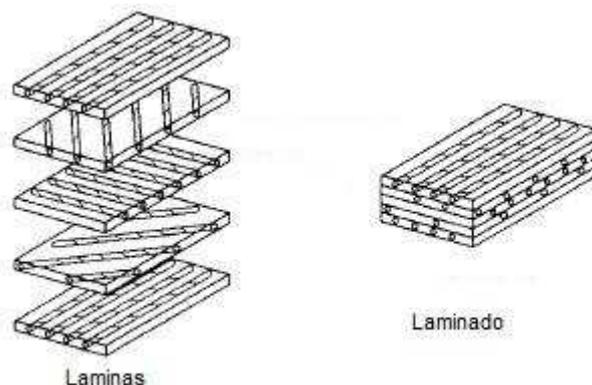


Figura 1.1 – Camadas de lâminas formando um laminado. Fonte: Jones (1991).

Segundo Jones (1991) as vantagens do material compósito se bem projetado oferece as melhores qualidades de cada material, podendo até eliminar alguma de suas propriedades negativas, Allen (1969).

Materiais compósitos vêm sendo empregados na construção de embarcações desde o início da história. A madeira, que é um material fibroso, sempre esteve presente na grande maioria dos projetos de embarcações, porém a construção utilizando madeira possui limitações quanto às formas que podemos obter. Com o passar do tempo foi evoluindo a tecnologia até que hoje podemos criar e montar os materiais fibrosos, moldando na forma desejada de forma a resistir melhor aos carregamentos.

Compósitos são materiais em formato de fibras envoltos por uma matriz que pode ser uma resina ou cola. Seu processo de montagem é bem simples, basta impregnar as fibras com a resina e dar a forma desejada à peça. Esta resina pode ser catalisada através de agentes químicos misturados no início do processo como também pode ser realizado aquecendo a resina para que esta cure atingindo a rigidez desejada.

Cada vez mais materiais compósitos vêm ganhando espaços na construção náutica devido sua facilidade de construção, alta resistência e durabilidade. Em um projeto desenvolvido para ser construído em fibra de vidro podemos verificar as zonas de esforços em sentido e intensidade, arranjando as propriedades específicas para cada parte do projeto, como mostra a Figura 1.2.

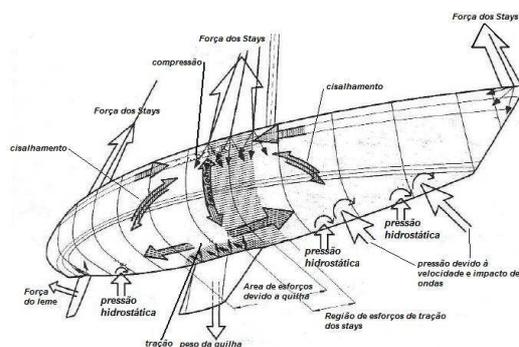


Figura 1.2 – Esforços atuantes no casco de um veleiro. Fonte: Larsson e Eliason (2000).

Em uma embarcação é através do leme que definimos seu rumo. O leme nada mais é que uma superfície de comando, um hidrofólio, em contato com a água que através do escoamento de água, Figura 1.3, gera uma diferença de pressão, Figura 1.4, fazendo assim o barco mudar a direção. Estas pressões acabam gerando esforços em toda a estrutura.

Pela definição de Molland e Turnock (2007) um leme tem que ser capaz de gerar uma força lateral que possa fazer com que a embarcação mantenha seu rumo correto e é de suma importância que este não falhe para que não ponha em risco tanto as pessoas como os equipamentos. Sendo assim é de extrema importância um leme de construção robusta, mas que também seja funcional e que não comprometa o rendimento da embarcação tanto em peso quanto em geometria.

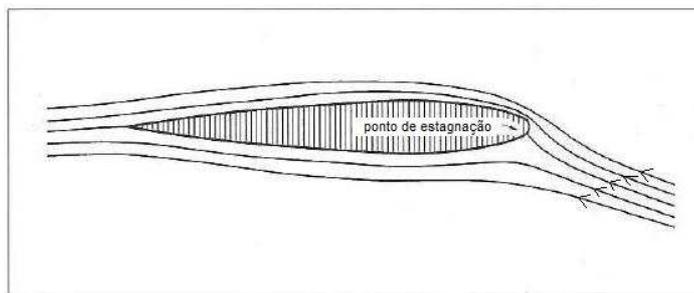


Figura 1.3 – Escoamento de um fluido através de um perfil com ângulo de ataque diferente de zero. Fonte: Larsson e Eliason (2000).

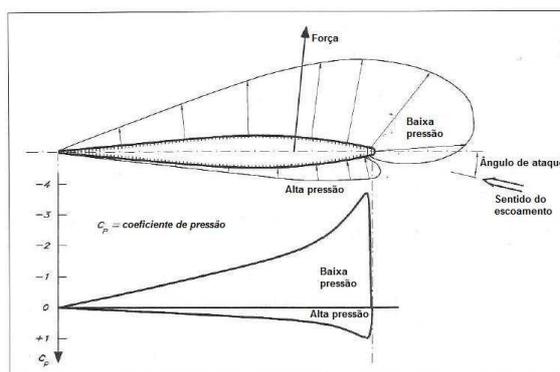


Figura 1.4 – Distribuição de pressão em um perfil hidrodinâmico. Fonte: Larsson e Eliason (2000).

O leme do veleiro da classe snipe é conectado no casco através de dois pinos em aço inox pertencentes às ferragens. Os pinos são inseridos em uma ferragem com um orifício, fixada no casco, formando uma junta articulada semelhante à dobradiça de uma porta. No topo é inserida a cana do leme, um tubo feito em alumínio ou material compósito, que é onde o velejador comanda a posição do leme como mostra a Figura 1.5. É possível visualizar o conjunto leme casco na Figura 1.6.



Figura 1.5 – Leme montado na popa do veleiro. Fonte: acervo do autor



Figura 1.6 – Veleiro Snipe. Fonte: SCIRA (2009)

Prever os esforços em um leme é muito complicado, pois este sofre variações de pressão devido ao escoamento com movimentos bruscos, impacto de ondas, algumas vezes batidas no fundo, em pedras e areia, e também algumas vezes batidas de outros barcos.

### 1.1. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo obter uma seqüência de laminação para um leme do veleiro da classe Snipe obtendo um leme mais leve e reforçado utilizando como referência um leme já existente melhorando assim sua resistência orientando as fibras no sentido dos carregamentos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Parâmetro para construção de um leme de um veleiro da classe snipe seguindo o livro de regras da classe SCIRA (2009-2012):

- Os materiais para construção permitidos pela regra são: madeira, madeira com fibra de vidro ou fibra de vidro com espuma.
- Sua espessura incluindo a área abaixo e acima da linha d'água não deve ser menor que 19 mm e não maior de 38 mm de espessura.
- O peso não deve ser menor que 2,73 kg e não ultrapassando 0,450 kg do peso mínimo.

- Geometria do leme em anexo I

## 2.2. Estrutura sanduíche

A construção de laminados sanduíches com espuma é uma boa técnica para obter uma estrutura rígida. Uma maneira de construir uma peça sem ter um molde. Segundo Larsson e Eliason (2000) esta estrutura se assemelha com uma viga de perfil I, onde a espuma representa a alma da viga e as lâminas suportam os esforços de tração e compressão da mesma forma que as mesas da viga.

Lâmina é uma combinação de fibras envoltas por uma matriz em forma de uma superfície fina comparando com a largura.

### 2.2.1. Matriz

A matriz de um compósito é o material que envolve as fibras. Uma propriedade desejável é o alto valor do módulo de elasticidade de compressão. A resina pode ser encontrada de duas formas, as resinas termofixas e as termoplásticas.

Resina termoplástica é aquela que ao ser alterada sua temperatura muda de estado físico, podendo amolecer e ser remodelada.

As resinas termofixas são encontradas na fase líquida em temperatura ambiente, que após aquecimento sofre processo de cura, este aquecimento pode tanto ser através de catalisadores químicos quanto em fornos, elevando sua temperatura. Estas são mais utilizadas devido sua estabilidade não dependendo da sua temperatura para faixas normais de temperatura.

Para construção náutica são utilizados basicamente dois tipos de resinas termofixas: a resina epóxi e a resina poliéster.

Resina poliéster tem a vantagem do baixo custo de aquisição, porém ela tem menor resistência mecânica, menor capacidade de aderência e maior capacidade de absorver água, o que não são desejáveis.

As resinas epóxi na sua maioria são semelhantes a poliéster na questão do manuseio, tem boa fluidez quando em temperatura ambiente, o que é muito bom para impregnar as fibras garantindo baixo índice de volume vazio e melhor resistência mecânica.

### 2.2.2. Fibras

São as fibras as principais responsáveis por suportarem os esforços de tração, estas podem ser encontradas na forma de:

- Fio ou também conhecido por "roving": são muitos utilizados para construção de tubos e vasos de pressão, e também para fazer reforço em peças muito solicitadas.
- Tecidos são fios tramados; têm a vantagem de serem fáceis de manusear. Estão todas as fibras interligadas e arranjadas podendo assim ter tecidos com diferentes características nas diferentes direções
- Manta de fibra de vidro é uma lâmina de fios cortados em tamanho médio, espalhados de forma aleatórios e depois compactados. Sua principal vantagem é a facilidade de moldar difíceis geometrias. Apesar de não suportar tão bem esforços de tração em comparação ao tecido, a manta tem boas características mecânicas na média em todos os sentidos.

### 2.2.3. Núcleo

A principal função do núcleo é aumentar o momento de inércia da seção sem agregar muito peso. Normalmente constitui de uma estrutura com vazios e com boa capacidade de resistir a esforços de compressão. O núcleo tem a mesma função que a alma em uma viga I mantendo o afastamento das placas. As formas mais habituais de encontrarmos os núcleos são:

- Espumas; bastantes utilizadas hoje em dia são as espumas de PVC. Estas, além de ter boa capacidade de resistir os esforços, possuem as células fechadas. Quer dizer que caso haja alguma infiltração de água no laminado, esta ficará apenas nas células rompidas e não passará para as outras células agregando peso ao laminado
- “Honeycomb” (colméia) são estruturas em formato de favos de mel que tem boa capacidade de compressão, porém não possuem boas propriedades para suportar esforços de cisalhamento, estas são muito utilizadas na construção aeronáutica.

É possível observar diferentes tipos de laminados sanduíche na Figura 2.1 variando o núcleo e também as lâminas.

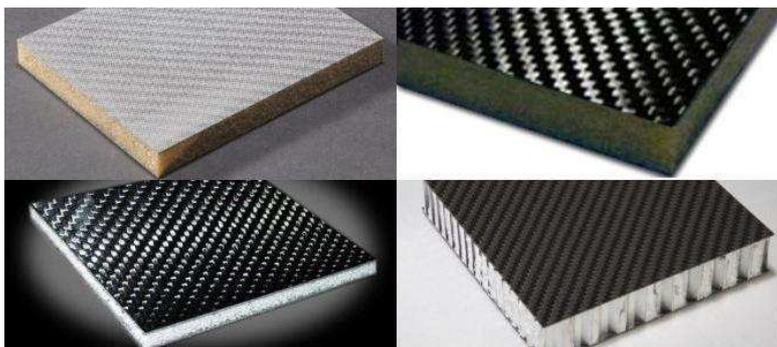


Figura 2.1–Laminados Sanduíche com espumas e “honeycomb”. Fonte: <http://www.rocarbon.com>.

### 2.3. Métodos construtivos

A fabricação de componentes em compósito na maioria dos casos ainda é um processo bastante artesanal. Quando o projeto contempla apenas uma peça ou muito poucas, podemos construir sem moldes. Montamos a estrutura, laminando cada parte, utilizado massa para preencher espaços e lixar para obter acabamento. Demanda muito trabalho e o desperdício com material é elevado. O resultado depende muito da habilidade do trabalhador, porém quando existe a necessidade de construir apenas uma peça, ou é a primeira, é necessário arcar com estes custos.

Quando existe a necessidade de fabricar um número elevado de peças é possível a utilização de moldes.

Primeiramente é necessário fabricar um modelo em tamanho real e com todas as geometrias desejadas. Em seguida é moldada uma fôrma em cima da peça modelo, depositando as fibras e embebendo-as em resina, após sua cura podemos então desmoldar da fôrma. Com esta nova peça é possível fazer a laminação e obter muitas peças com as mesmas características da primeira, sem o difícil processo de acabamento que foi empregado na primeira peça. É o sistema mais utilizado nos dias de hoje para fabricação em escala de componentes em compósito.

Uma técnica mais avançada utilizando moldes é a aplicação de vácuo para impregnar com resina as fibras.

Com o sistema de vácuo todas as mantas, tecidos e espumas são montados no molde e coberto com uma lona plástica e vedada. Em alguns pontos é aplicado sucção de ar gerando baixa pressão e em outros pontos são adicionado resina, impregnando assim todo o conjunto em uma só vez. Uma das grandes vantagens é que a pressão atmosférica age comprimindo o sanduíche garantido uma melhor adesão entre as partes. Tem menor índice de vazios no laminado. Utiliza menos porcentagem de resina garantido um laminado leve e resistente. Também tem menor produção de resíduos. Porém o custo inicial é alto devido à aquisição ou locação do sistema de bomba de vácuo.

## 2.4. Falhas em laminados

A falha em laminados pode ser de várias naturezas:

- Defeito na fabricação, como espaços vazios;
- Fratura adesiva, descolamento entre as fibras e a matriz;
- Fratura coesiva na matriz;
- Delaminação devido a esforços repetitivos e também onde existem furações no laminado para fixação de elementos.

### 2.4.1. Critério de Tsai-Wu

Quando as resistências à tração e compressão têm valores diferentes o recomendado é a utilização do critério de falha de Tsai-wu. Este tem resultados melhores quando a tensão transversal for menor que zero.

O critério de Tsai-Wu se aplica a cascas compostas, que é o caso da estrutura tratada no trabalho, levando em consideração a energia de esforço total (ambas as energias de distorção e de dilatação) para prever falhas. Garantindo um resultado mais geral do que o critério de falha de Tsai-Hill porque distingue entre as resistências a falhas de compressão e de tração. Para um estado plano de tensão, que é pressuposto para cascas compostas, o índice de falha é calculado como:

$$(F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2) + (F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_6^2) \leq 1 \quad (2.1)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_{t1}} - \frac{1}{X_{c1}} \quad (2.2)$$

$$F_2 = \frac{1}{X_{t2}} - \frac{1}{X_{c2}} \quad (2.3)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_{t1}X_{c1}} \quad (2.4)$$

$$F_{22} = \frac{1}{X_{t2}X_{c2}} \quad (2.5)$$

$$F_{66} = \frac{1}{(S_{12})^2} \quad (2.6)$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_{t1}X_{c1}X_{t2}X_{c2}}} \quad (2.7)$$

Onde:

$X_{t1}$  e  $X_{t2}$  são as resistências de ruptura à tração na direção um e dois do material;

$X_{c1}$  e  $X_{c2}$  são as resistências de ruptura à compressão na direção um e dois do material;

$S_{12}$  é a tensão de ruptura à cisalhamento;  
 $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões nas direções um e dois;  
 $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{66}$  e  $F_{12}$  Coeficientes utilizados nos cálculos.

Para casos onde a equação (2.1) satisfaz a igualdade significa que a lamina suporta o carregamento .

O critério de falha de Tsai-Wu não pode prever modos de falha diferentes, inclusive falha de fibra, de matriz e de interface entre fibra e matriz.

#### 2.4.2. Critério de falha da máxima tensão normal

Este critério consiste na comparação entre as tensões na peça com a tensão de ruptura do material.

- Para esforços de tração

$$\sigma_{t\max} < X_t \quad (2.8)$$

Onde:

$\sigma_{t\max}$  é a tensão máxima de tração;

$X_t$  é a resistência de ruptura à tração das fibras no mesmo sentido dos esforços.

- Para esforços de compressão

$$|\sigma_{c\max}| < |X_c| \quad (2.9)$$

Onde:

$\sigma_{c\max}$  é a tensão máxima de compressão;

$X_c$  é a resistência de ruptura à compressão da resina no mesmo sentido dos esforços.

### 3. ETAPA DE CÁLCULOS

#### 3.1. Verificação dos esforços atuantes em um leme.

Através do programa de computador "FOILSIM III" foi possível analisar forças causadas por um escoamento transversal a um perfil semelhante ao utilizado para construção do leme.

Parâmetros utilizados:

- Densidade do fluido considerando água
- Velocidade: 10 nós equivalente a 18,5 km/h;
- Profundidade 0,230 m;
- A corda da asa com valor de 0,260 m;
- Envergadura: 0,460m
- Área da superfície de comando 0,115m<sup>2</sup> ;
- Camber igual a zero, por ser simétrico;
- Relação entre a corda e a espessura do leme igual a 14,6%
- Ângulo de ataque 15,5 graus selecionado devido a maior combinação entre força de arrasto e força de sustentação somando 1827 Newton.

Esta condição foi julgada extremamente adversa e provavelmente a qual o leme nunca seja submetido, adicionalmente, o software não considera descolamento da camada limite, que provavelmente aconteça para esta condição e por conseqüência as forças sejam menores.

Outra maneira de calcular esta reação causada pela sustentação no leme é seguindo a fórmula para a força no leme pode ser simplificada como mostra RCD (2006). Foi esta formulação a utilizada no trabalho.

$$P = 110 * A * V^2 [N] \quad (3.1)$$

Onde:

A é a área da superfície do leme [m<sup>2</sup>];

V é a maior velocidade do barco [nós].

Assim obtemos uma força no valor de 1545 [N] sendo este o valor utilizado para os cálculos.

Larsson e Eliason (2000) recomendam aplicar Esta força a uma distância da borda de ataque de um quarto da corda. Porém para que haja uma melhor distribuição de tensão foi aplicada uma pressão na área da metade dianteira equivalendo a força pontual de 1545N (Figura 1.4). Este carregamento foi imposto na forma de pressão sob a metade da face na borda de ataque (na casca) como nos mostra a Figura 3.1.

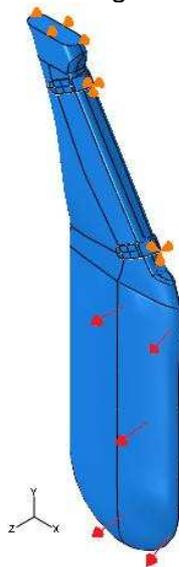


Figura 3.1 – Condições de restrições e carregamentos impostas no leme

### 3.2. Restrições de movimento

Na Figura 3.1 podemos ver as restrições de movimento no leme decorrentes das ferragens de fixação e da cana do leme.

Nas ferragens restringimos os deslocamentos de um ponto próximo ao pino de fixação. Deixando livres todos os eixos de rotação, supondo que exista pequena folga entre o pino e o furo da ferragem de fixação e que as deformações do leme sejam muito pequenas.

No topo do leme restringimos o movimento na direção do eixo Z, representando o comando que o velejador tem no ângulo do leme em relação ao casco.

### 3.3. Estimar propriedades das lâminas

Provavelmente a parte mais difícil do trabalho é estimar as propriedades mecânicas do laminado, isto se deve ao fato que depende muito do processo utilizado na laminação, também das condições de umidade e temperatura no momento da laminação que influenciam muito na qualidade do laminado. Também existe a falta de dados por parte dos fabricantes variando muito entre as fontes bibliográficas quando se refere a laminados com dois ou mais sentidos de distribuição das fibras.

Segundo American Bureau of Shipping (1994), o fabricante de veleiros deve realizar testes das propriedades do laminado utilizados na fabricação com certa periodicidade. Para embarcações maiores de 70 pés devem-se realizar ensaios das propriedades mecânicas do laminado para todos os barcos, para barco de até 30 pés a cada doze barcos produzidos deverão ser realizado ensaios mecânicos para caracterização do laminado.

Partindo que Khan (2009) determinou analiticamente e verificou através de ensaios mecânicos as propriedades para laminados de tecido bi-direcional de fibra de vidro e resina epóxi. Iremos utilizar os resultados para uma lâmina com o mesmo número de fibras perpendiculares entre si como mostra a Figura 3.2.

Khan (2009) define que as fibras de vidro tipo E quando orientadas todas no mesmo sentido possui:

$$E_f = 72 \text{ G Pa}$$

$$G_f = 27 \text{ Gpa}$$

$$\nu_f = 0$$

Para resina epóxi

$$E_M = 3,5 \text{ Gpa}$$

$$G_M = 1,3 \text{ Gpa}$$

$$\nu_M = 0,35$$

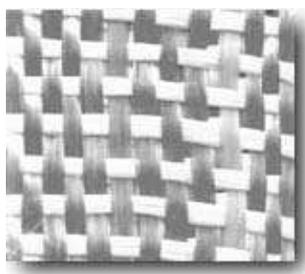


Figura 3.2 – Tecido de fibra de vidro com a mesma quantidade de fibras nos dois sentidos.  
Fonte: [www.nauticursos.com.br](http://www.nauticursos.com.br)

Foi utilizado um tecido com mesmas propriedades no sentido longitudinal e transversal, espessura de 0.18mm possui  $E_x = 21,5 \text{ Gpa}$ ,  $G = 2,9 \text{ Gpa}$  e coeficiente de Poisson maior que 0,15 segundo Khan (2009). Estes serão os dados para calcular os tecidos.

Para a manta de fibra de vidro será utilizado o modelo de Tsai-Pagano (1968) que é recomendado para lâminas com as fibras orientadas de forma aleatórias.



Figura 3.3 – Manta de fibra de vidro. Fonte: [www.fazfacil.com.br](http://www.fazfacil.com.br)

Tsai-Pagano (1968) desenvolveu:

$$E_1^* = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.2)$$

$$E_2^* = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)} \quad (3.3)$$

$$E = \frac{3}{8} E_1^* + \frac{5}{8} E_2^* \quad (3.4)$$

$$G = \frac{1}{8} E_1^* + \frac{1}{4} E_2^* \quad (3.5)$$

$$\nu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \quad (3.6)$$

Sendo:  $E_f$  e  $E_m$  módulo de elasticidade das fibras e da matriz;  $V_f$  e  $V_m$  fração do volume das fibras e matriz considerada a proporção de fibra 65% e matriz 35%.  $E$ , módulo de elasticidade da manta;  $G$  o modo de cisalhamento da secção e  $\nu$  o coeficiente de Poisson obtendo assim as propriedades para o laminado de manta de fibra de vidro-epóxi que será utilizado para cálculos

O módulo de elasticidade da manta não varia com o ângulo de orientação.

$E=27,38$  GPa

$G=9,75$  GPa

$\nu=0,4$

Para a espuma de PVC utilizou-se os dados do catálogo “Divinycell”

$E=45$  MPa

$G= 12$  MPa

$\nu=0,1$

### 3.4. Análise dos esforços do leme de configuração igual ao existente

Para o efeito de comparação, realizamos os cálculos verificando os esforços no leme utilizando a configuração semelhante à existente no leme já existente.

A configuração do laminado utilizado para as verificações dos modelos representando o leme existente foram as mostradas na Figura 3.4. Duas lâminas de manta de fibra de vidro com epóxi com espessura de três milímetros e meio separadas por uma lâmina de espuma de baixa densidade.

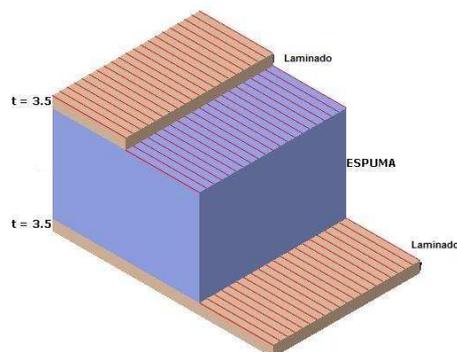


Figura 3.4 – Configuração do laminado sanduíche para o modelo

### 3.4.1. Verificação analítica

Considerando uma viga bi-apoiada calculou-se o momento fletor e suas tensões causadas nas fibras externa do laminado levando em consideração a geometria do leme dissecado pelo autor. Cálculo encontra-se no Apêndice I.

### 3.4.2. Análise por elementos finitos

Para simulação foi utilizado o software comercial para desenhos para obtermos as geometrias e um software para realizar análise numérica. Primeiramente utilizando um modelo de placa plana e por fim um modelo em três dimensões.

#### 3.4.2.1. Modelo em placa plana

O modelo em placa plana para laminados, onde a espessura é pequena em relação à largura e o comprimento, podemos obter bons resultados. Porém para o caso do leme onde a espessura é 38 mm e a largura mínima é 90 mm acaba acarretando erros nas bordas visto que o modelo real é coberto totalmente com laminado de fibra de vidro e resina, o modelo em placa plana possui as bordas abertas.

Os resultados da análise em placa plana mostrando a distribuição de tensões em cada uma das superfícies das lâminas do sanduíche esta no Apêndice II.

#### 3.4.2.2. Modelo em três dimensões

Foi obtido o modelo em três dimensões do leme através do software de desenho assistido por computador. Obtendo um corpo sólido e um corpo em casca com mesma geometria, também a ferragem de fixação em casca. Como mostrado na Figura 3.5.

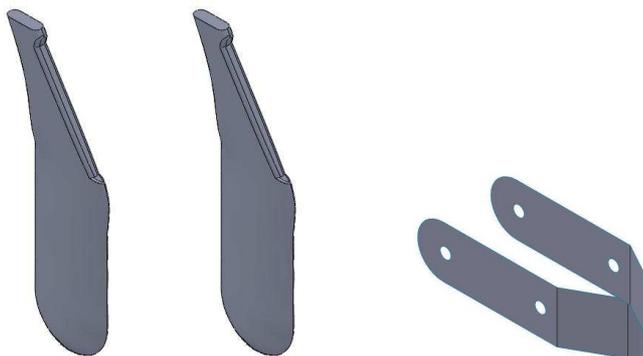


Figura 3.5 – geometrias do leme e da ferragem de fixação importadas para o software ABAQUS criada no SolidWorks 2009

O corpo sólido representa o núcleo do laminado sanduíche, logo atribuindo propriedades isotrópicas devido ser uma espuma.

Ao modelo em casca foram atribuídas as propriedades do laminado. A casca está interagindo com o núcleo de forma que exista igualdade de deslocamentos entre as superfícies da casca e do núcleo, sem a necessidade de coincidência dos nós das superfícies. Sendo assim as lâminas são submetidas principalmente a esforços de tração e compressão.

O mesmo tipo de interação foi utilizado para que as ferragens estejam fixas na casca que representa o laminado.

#### 3.4.2.3. Dados de entrada

- Laminado de manta de fibra de vidro com epóxi

$$E_1=E_2=27,38 \text{ Gpa}$$

$$\nu_{12}=0,4$$

$$G_{12}=9,75 \text{ Gpa}$$

$$G_{13}=G_{23}=1,3 \text{ Mpa}$$

- Tipos de elementos utilizados para a casca (ferragem e laminado)

S4R – Elemento quadrilátero que aceita dupla curvatura e é um elemento que permite mudança de espessura e deformações de membrana. Linear do tipo casca com integração reduzida empregado na região analisada com maior nível de tensão. Também é indicado pelo software para soluções de laminados.

S3 – Elemento triangular de casca com três nós compatível com o elemento S4R. Foi empregado sua utilização em partes com geometria complexa.

- Tipos de elementos sólidos utilizados

C3D4- elemento tetraédrico, 4 nós linear.

C3D8R- elemento de 8 nós linear , integração reduzida.

- Carregamento

Foi imposta uma pressão negativa na metade anterior de uma das faces do leme que fica em contato com a água. Da mesma forma que a Figura 3.1 mostra.

Como restrições foram utilizadas restrições de deslocamentos na localização das ferragens simulando o pino deixando as rotações livres admitindo folga devido ao pequeno deslocamento (Figura 3.1).

### 3.5. Resultados para configuração já existente

Para o caso do modelo representando o modelo atual

No modelo analítico bi-apoiado observamos tensões de compressão na lâmina externa no valor de 35 MPa. Este modelo considerou uma lâmina homogênea para o laminado de fibra de vidro-epóxi, também não levou em consideração a torção devido ao desalinhamento entre o ponto de aplicação da carga e os pontos de fixação do leme.

No modelo de placa plana existe um aumento das tensões, o que já era esperado, pois este considera torção e flexão em dois sentidos no laminado. Também estas tensões ocorrem nas bordas do modelo devido ao efeito de borda.

Para o modelo em três dimensões podemos ver na Figura 3.6 uma distribuição de tensões de forma homogênea e duas zonas mais solicitadas. Nos pontos próximos das ferragens onde existe uma diminuição de secção. Verificou-se a orientação das máximas e mínimas tensões nestes pontos.

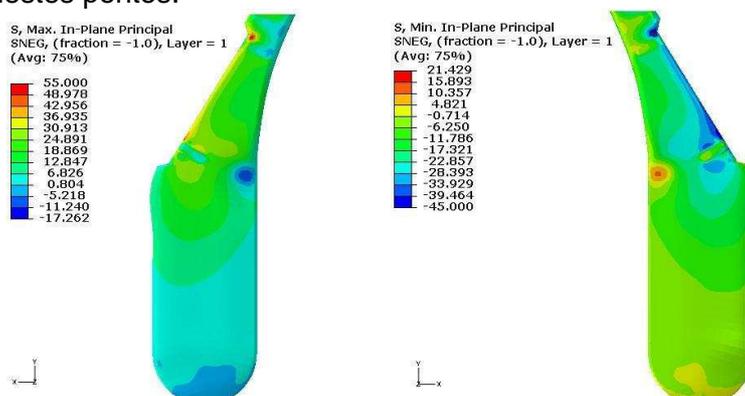


Figura 3.6 – máximas tensões na face em tração na figura da esquerda e mínimas tensões no plano na face em compressão na direita, unidade [MPa].

Para a zona em tração mais solicitada podemos observar que existe um concentrador de tensões em cima e embaixo do recuo das ferragens, como mostra a Figura 3.6. As tensões na lâmina externa, Figura 3.7, estão na faixa de 55 MPa. Na Figura 3.7 podemos observar também o sentido das tensões principais agindo na superfície do laminado nos pontos mais solicitados.

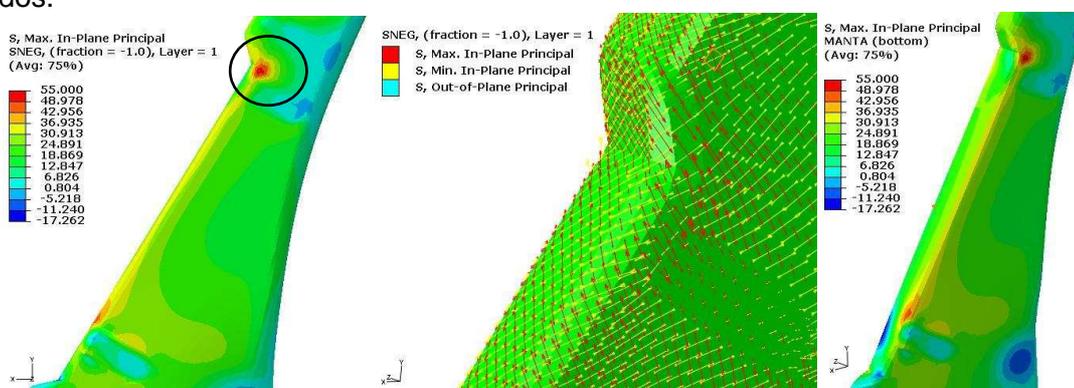


Figura 3.7 – Máximas tensões de trações na face em tração à esquerda, no centro o sentido e direção das tensões máximas e mínimas no plano e na direita as tensões na face externa da lâmina

As tensões de compressão e seu sentido estão sendo mostradas na Figura 3.8.

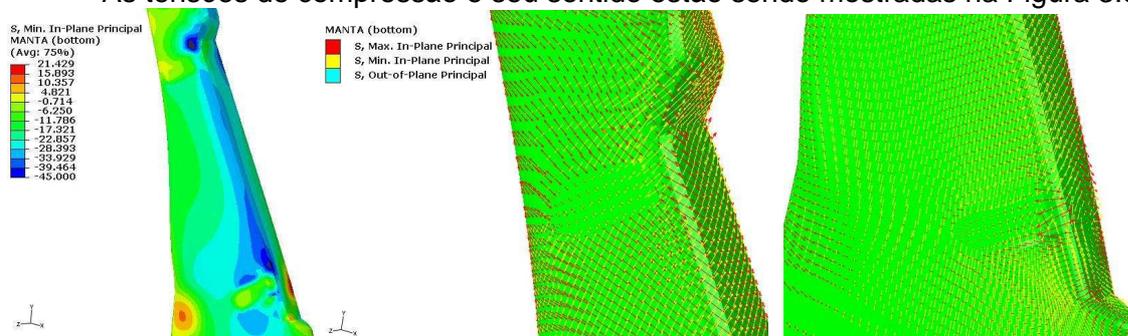


Figura 3.8 – Mínimas tensões no plano na face em compressão, no detalhe os sentidos e direções das tensões localizado próximo a ferragem inferior.

### 3.6. Proposta de melhoria na seqüência de laminação

Podemos ver que os sentidos das máximas e mínimas tensões principais estão orientados tendendo a quarenta e cinco graus na parte superior tanto na face de tração quanto a de compressão do leme, o que motivou a substituição da parte mais externa em manta para um tecido orientado a quarenta e cinco graus como nos mostra a Figura 3.9. Na parte inferior observaram-se esforços no sentido horizontal e de menor magnitude. Logo uma fina lâmina de tecido substituiu parte da lâmina de manta de fibra, e houve uma diminuição na espessura da manta para dois milímetros.

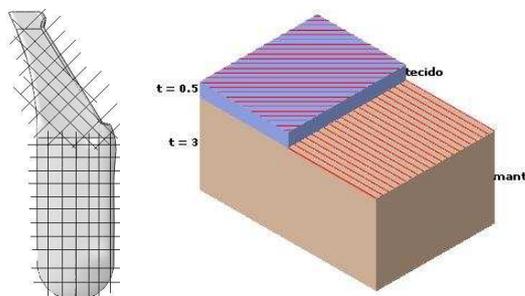


Figura 3.9 – Orientação do tecido utilizado para melhorar o laminado.

Com estas mudanças podemos observar uma melhora significativa na distribuição das tensões, Figura 3.10, sem aumento da espessura das lâminas neste área.

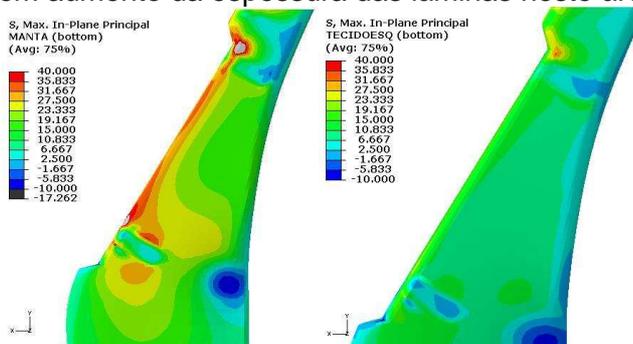


Figura 3.10 – Tensões no modelo sem alteração e no modelo com alterações.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram verificadas as tensões em um leme existente. Sabendo como estas se comportam foi proposto uma nova configuração das lâminas melhorando assim a estrutura do leme. Obtendo assim um melhor aproveitamento do material.

Substituiu-se a camada externa do sanduíche por uma lâmina de tecido de fibra de vidro orientada no sentido dos esforços, as fibras orientadas no sentido do carregamento suportam os esforços não permitindo a falha do leme. Com esta mudança no processo de fabricação obtemos um leme mais resistente explorando melhor as qualidades dos materiais compósitos.

Em comparação com os critérios de falhas adotados, verificou-se nos pontos críticos (Apêndice IV) que o laminado suporta os esforços.

A diminuição da espessura das lâminas em locais onde as solicitações são menores, permitiu uma redução do peso final do leme sem comprometer a resistência durante navegação. Com estas melhorias obtivemos um leme para competição, com menor peso e capaz desistir ao carregamento

Ao longo do trabalho verificou-se a necessidade de desenvolver melhor as características para laminado utilizando manta de fibra de vidro com resina epóxi. Para isso será realizado ensaios para definir melhor as propriedades podendo alimentar o modelo para melhor refino do projeto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, H. G.; **“Analysis and design of structural sandwich panels”**, Pergamon Press, Oxford, 1969.

American Bureau of Shipping, **“Guide for Building and Classing Offshore Racing Yachts”**, New York, N.Y., 1994.

Barracuda Advanced Composites, **“DIVINYCELL H”**, <http://www.barracudacomposites.com.br>. Acessado em 19/04/2011.

Jones, R. M.; **“Mechanics of Composite materials”**, Philadelphia, Taylor & Francis, INC., Second edition, 1999.

Khan, I. A.; **“PREDICTION OF ELASTIC PROP 2D ORTHOGONAL”**, 2009. 56f. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Orissa, India

Larsson, L.; Eliasson, R. E., **“Principles of Yacht Design”**, Adlard Coles Nautical, London, Second Edition, 2000.

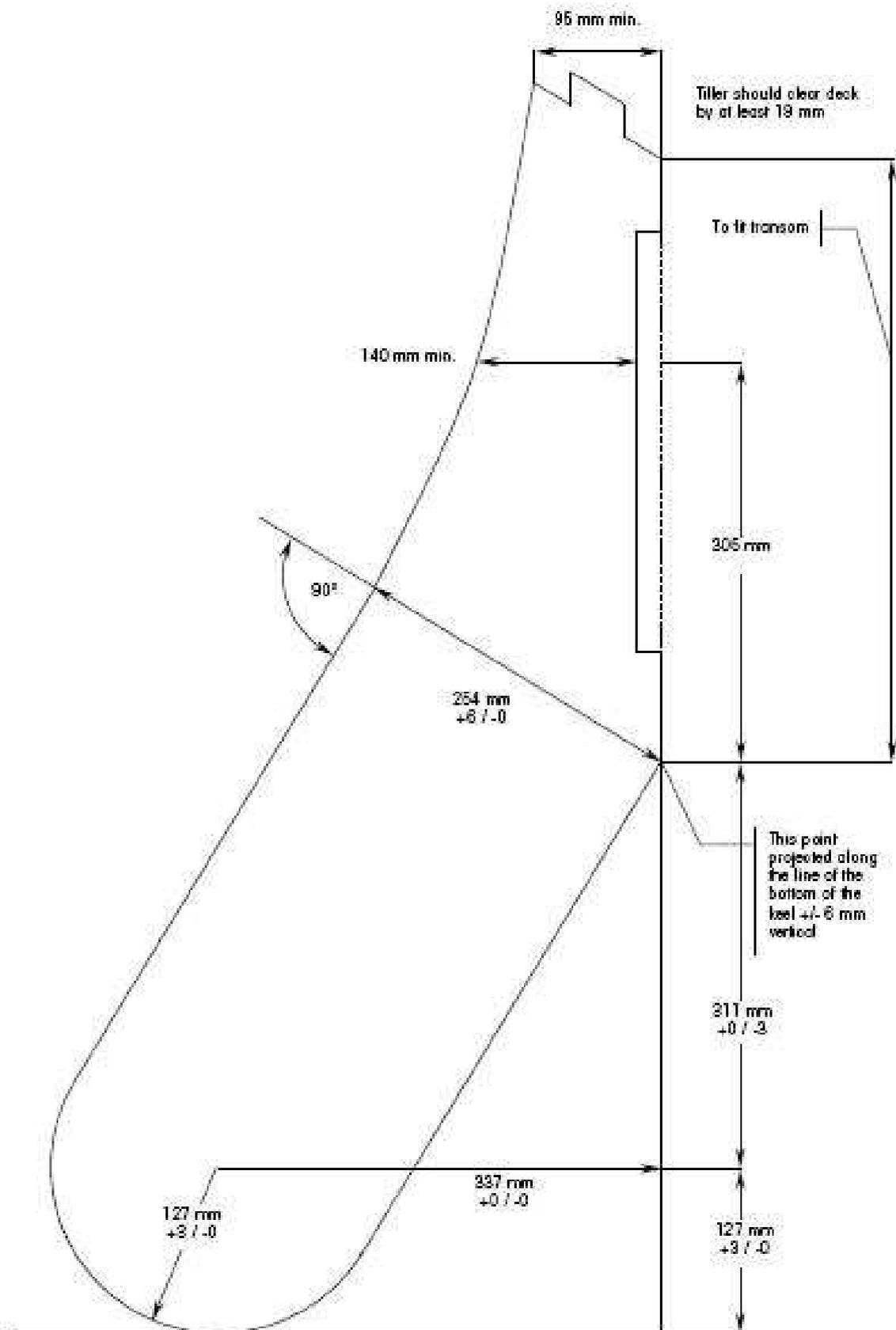
Molland, A. F. ; Turnock, S. R.; **“Marine Rudders and Control Surfaces”**, Elsevier, first edition, 2007.

NASA, **“Software FOILSIM III Student Version 1.4d”**, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/foil3.html>. Acessado em 10/05/2011

ROYAL YACHTING ASSOCIATION, **“RECREATIONA CRAFT DIRECTIVE”** <http://www.rya.org.uk> Acessado em 22/05/2011.

SCIRA, **“SNIPE CLASS INTERNATIONAL RACING ASSOCIATION 2009-2012 OFFICIAL RULEBOOK”**, [www.myvirtualpaper.com](http://www.myvirtualpaper.com). Acessado em 20/03/2011.

I. Anexo I – Geometria permitida pela SCIRA



## I. Apêndice I – Análise de viga

Cálculo analítico das tensões devido a flexão no leme (simplificação 2D)

Considerando uma viga bi-apoiada com a mostrada na calculamos o momento fletor no ponto mais solicitado.

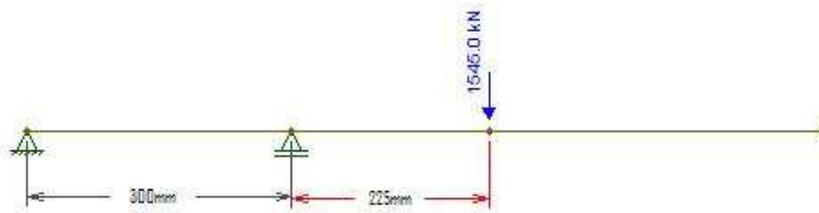


Figura I.1 – modelo viga bi-apoiada utilizada para verificação analítica Fonte: Ftool.

Ponto mais solicitado é no apoio localizado no centro da viga com um momento fletor igual:

$$M_{zz} = 1545[N] * 225[mm] = 347625[N * mm]$$

Considerando uma secção retangular com três camadas como mostra a Figura I.2 com as espessuras definidas e com largura igual a noventa milímetros podemos calcular os esforços no laminado de manta de fibra de vidro-epóxi.

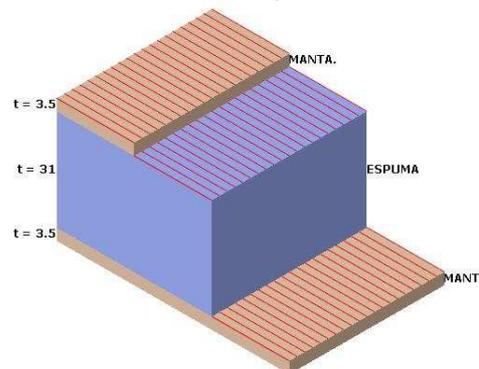


Figura I.2 – laminado utilizado para calcular as tensões analiticamente. Fonte: ABAQUS

$$I_{zzf} = \frac{90 * 38^3}{12} - \frac{90 * 31^3}{12} = 188107,5 mm^4$$

$$I_{zzm} = \frac{90 * 31^3}{12} = 2234332,5 mm^4$$

Considerando  $E_f = 27,38 \text{ GPa}$  e  $E_{espuma} = 49 \text{ MPa}$

$$\sum E_i I_i = 5161331543 [Nmm^2]$$

$$\sigma_{fibra} = \frac{M_{zz} * E_{fibra} * C_{fibra}}{\sum E_i I_i} = 35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{manta} = \frac{M_{zz} * E_{manta} * C_{manta}}{\sum E_i I_i} = 51 \text{ Pa}$$

Este método possui muitas simplificações, porém nos mostra valores próximos ao modelo em três dimensões analisado em elementos finitos.

## II. Apêndice II – Análise de placa plana

Distribuição de tensões nas superfícies superiores e inferiores das lâminas de um leme modelado em placa plana.

Na região onde existe a ferragem fixada o laminado considera uma lâmina de aço representando a ferragem, como podemos ver na Figura II.1, nas demais regiões o laminado utiliza somente as lâminas de fibra e de espuma.

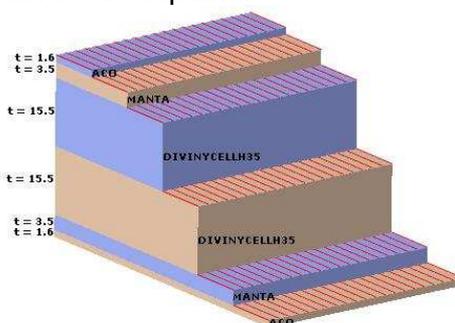


Figura II.1 - Disposição das lâminas no leme dissecado.

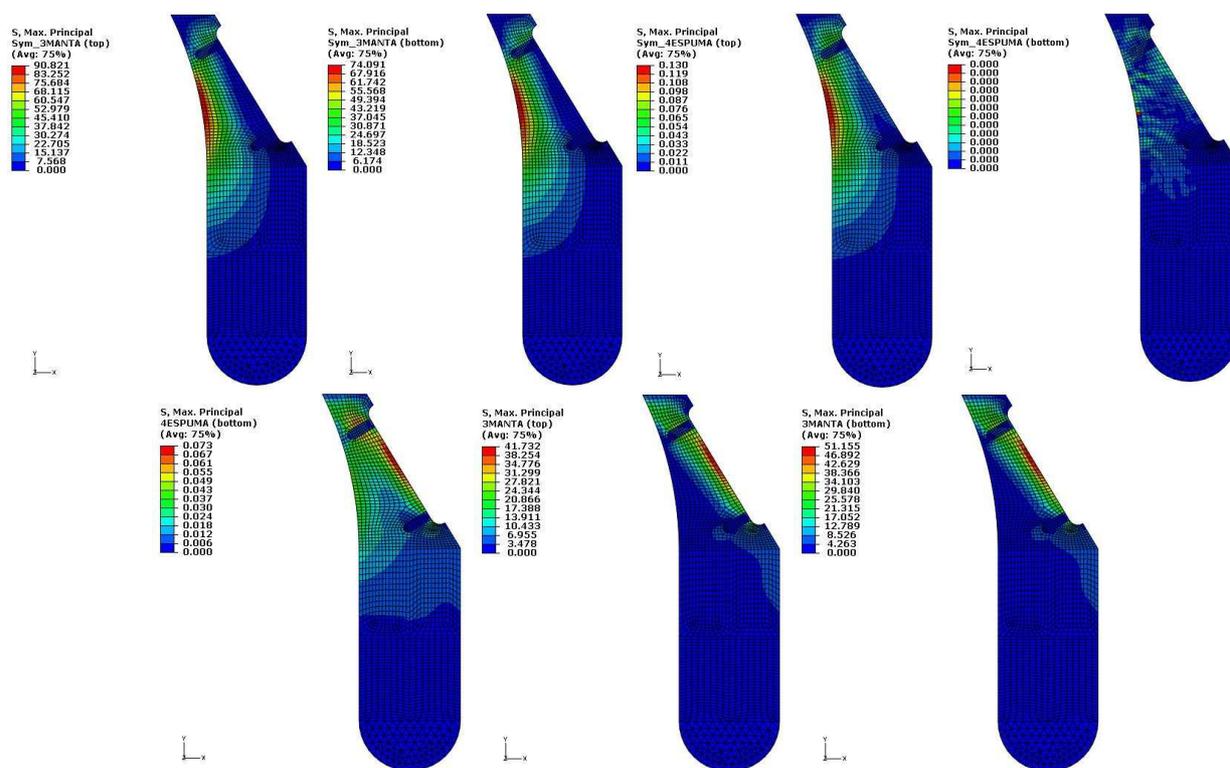


Figura II.2 - Distribuição de tensões em cada lâmina do laminado. Na seqüência da esquerda para a direita: Superior manta/ inferior manta/ superior espuma/ meio espuma / inferior espuma / superior manta/ inferior manta

### III. Apêndice III - Estimativa do peso final

#### Cálculo do peso

O procedimento para estimar o peso final do leme consiste em obter a área do laminado através do software SolidWorks 2009 e atribuir as espessuras consideradas na análise e através da densidade das fibras e resina obtemos o peso do laminado que somamos com o peso da espuma e o peso das ferragens.

Peso das ferragens mais parafusos 300 g.

Volume da espuma=0,00591151 m<sup>3</sup>

Densidade da espuma=38 kg/m<sup>3</sup>

Peso<sub>espuma</sub> = 0,224 kg

$\rho_{\text{resinaepoxi}}=1,2 \text{ g/cm}^3$

$\rho_{\text{fibraE}}=2,5 \text{ g/cm}^3$

$\rho_{\text{laminadomanta}}=1,2*0,35+2,5*0,65=2,04 \text{ g/cm}^3$

Área da lâmina de manta de fibra de vidro parte inferior do leme=2680,2 cm<sup>2</sup>

$t_{\text{laminainferior}}$  varia de 2 até 3,5mm

Logo valor médio=0,275cm

Volume manta inferior= 737,05 cm<sup>3</sup>

Peso<sub>parteinferior</sub>=1500g

Área da lâmina parte superior=1974,16 cm<sup>2</sup>

$t_{\text{laminasuperior}}=0,35 \text{ cm}$

Volume<sub>sup</sub>=690,95cm<sup>3</sup>

Peso<sub>partesuperior</sub>=1409g

Peso total=2,9kg

Peso estimado do leme atual = 3,76kg

Peso verificado = 4,5kg provavelmente devido à infiltração de água no laminado.

#### IV. Apêndice IV - Análise dos critérios de falha

##### Critério de falha de Tsai-wu

Utilizando as tensões na face externa do laminado do tecido de 35MPa em tração, 20 MPa em compressão e 0.25 MPa de cisalhamento no elemento mais solicitado. As propriedades de resistências segundo Hull (1981)  $X_t=278$  MPa,  $X_c=295$ MPa e  $S_{12}=53,3$ MPa para um tecido bidimensional encontrou-se um valor para o critério de tsai-wu no valor de 0,34 o que valida o componente.

##### Critério de Falha da máxima tensão (ou tensão máxima)

Para o critério de falha da máxima tensão normal foi considerado a resistência das fibras igual à 3 GPa porém sua quantidade em volume é 35% fazendo a resistência da seção ser igual a 0.35 da resistência da fibra sendo 1,05 GPa e as quais metade das fibras estão no sentido do carregamento e a outra está a noventa graus, sendo assim a resistência da lâmina é 525 MPa. A solicitação observada na análise numérica é 35 MPa.

Sendo assim a tensão de resistência e a solicitação satisfazem a equação abaixo:

$$\sigma_{t \max} < X_t \quad \text{e} \quad \sigma_{c \max} < X_c$$