

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO DE COMPETIÇÃO MOVIDA A ENERGIA SOLAR

Thomaz Augusto Kraz Benatti

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Neste trabalho é apresentado e discutido o desenvolvimento do projeto estrutural de uma embarcação de competição de pequeno porte movida a energia solar, relacionando suas diversas peculiaridades com as etapas do processo de desenvolvimento do seu projeto estrutural, segundo requisitos de efetividade e eficiência da estrutura do casco.

Palavras-chave: Projeto estrutural; energia solar; materiais compósitos.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURAL DESIGN OF A COMPETITION VESSEL POWERED BY SOLAR ENERGY

ABSTRACT

This work presents and discusses the development of the structural design of a small competition vessel powered by solar energy, relating its various peculiarities to the stages of the development process of its structural design, according to the requirements of effectiveness and efficiency of the hull structure.

Keywords: Structural design, solar energy, composites.

I. INTRODUÇÃO

A energia solar representa uma das principais fontes de energia renovável existentes atualmente. Em países desenvolvidos, encontra-se com frequência sua utilização em residências, edifícios e indústrias. Na área náutica, porém, sua utilização ainda não é tão extensiva. Como estímulo, têm sido observadas diversas iniciativas de caráter tanto científico quanto tecnológico relacionadas ao desenvolvimento de soluções envolvendo a utilização da energia solar em embarcações. Dentro deste escopo, a realização de competições de cunho educacional e/ou tecnológico representa uma importante iniciativa dedicada ao desenvolvimento e à promoção do uso da energia solar em embarcações.

A Equipe Solar Brasil, vinculada ao Polo Náutico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, participa regularmente, desde 2008, de competições internacionais (Dutch Solar Challenge, Holanda) e nacionais (Desafio Solar Brasil) envolvendo embarcações movidas à energia solar (Figura 1). Desde o início de tais competições, o desenvolvimento das embarcações foi surpreendente. Em 2008, a velocidade média na categoria de entrada da competição (barcos até 6 metros, equipados com quatro painéis fotovoltaicos) era da ordem de 6 nós (11 km/h),

enquanto que neste ano de 2016 muitas embarcações já superaram facilmente os 14 nós (26 km/h). Isto demonstra a efetividade deste tipo de iniciativa na promoção do desenvolvimento tecnológico das embarcações movidas a energia solar.

As especificidades observadas no projeto, construção e operação de embarcações impõe uma série de desafios tecnológicos para o emprego da energia solar como fonte de energia, tanto principal quanto auxiliar. No caso de embarcações destinadas à competição, tais desafios tornam-se ainda mais relevantes, pois as questões relacionadas à maximização do desempenho constituem um aspecto central do projeto.

Devido às limitações relacionadas à produção e ao armazenamento de energia elétrica, o desempenho de embarcações de competição movidas à energia solar está estritamente vinculado à eficiência no consumo de energia. Assim sendo, tal como em demais aplicações de alto desempenho, o projeto estrutural de tais embarcações tem por objetivo a maximização da relação resistência/peso.

O presente trabalho apresenta uma discussão sobre os principais aspectos envolvidos no desenvolvimento do projeto estrutural de uma embarcação de competição de pequeno porte movida à energia solar. Questões

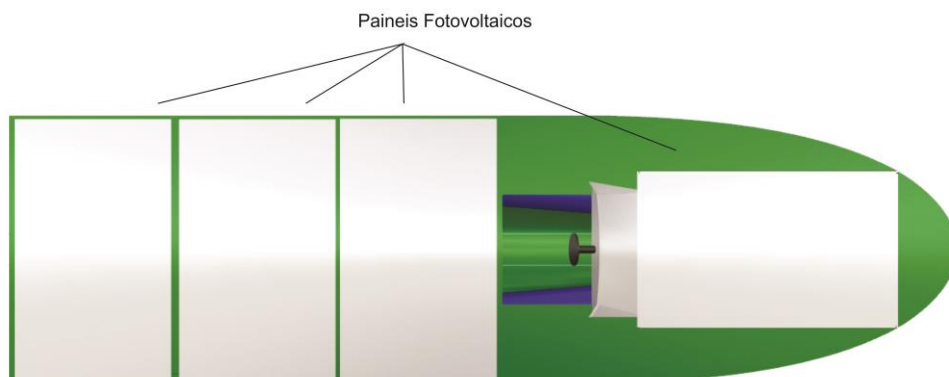
envolvendo a concepção a ser adotada, bem como a definição da topologia estrutural são abordadas segundo requisitos de efetividade e de eficiência da relação resistência/peso.

II-DESCRIÇÃO DA EMBARCAÇÃO

O objeto de estudo do presente trabalho consiste numa embarcação solar de pequeno porte, cujo valor de deslocamento situa-se entre 240 kg e 260 kg. Tripulada por um único piloto, a embarcação possui um comprimento máximo de 6,0 metros, sendo equipada com um sistema propulsivo elétrico, alimentado por um banco de baterias de, no máximo, 1.500 W.h (5,4 MJ). A geração de energia elétrica é realizada através de quatro painéis fotovoltaicos (placas solares) de uso residencial, com 250 W de potência máxima cada. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das características principais da embarcação.

As competições de embarcações solares são realizadas em águas abrigadas ou parcialmente abrigadas, localizadas em canais, lagos e/ou no interior de baías. Os percursos totais diários variam entre 5 e 30 milhas náuticas, sendo proibida a utilização de quaisquer fontes de energia, senão a solar, durante a competição.

Na Figura 1 é apresentada uma ilustração da embarcação de referência adotada para o desenvolvimento



do presente trabalho, a qual consiste no novo projeto da Equipe Solar Brasil. A embarcação em projeto foi batizada de eSB-Carine, em uma homenagem póstuma a aluna Carine Luterbach, membro da Equipe até 2015.

III –DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ESTRUTURAL

Embarcações de competição movidas à energia solar possuem características peculiares que influenciam diretamente o projeto dos vários sistemas de bordo. Especificamente em relação à estrutura do casco, entender a relação entre as linhas do casco, o tipo de material utilizado na sua fabricação e o arranjo dos vários componentes do sistema propulsivo é essencial para que se obtenha o desempenho desejado.

Tabela I – Características do eSB -Carine.

Comprimento total:	6,00 m
Boca máxima:	1,69 m
Calado de operação:	0,14 m
Deslocamento:	240 kgf
Potência Instalada:	3960 Watts
Velocidade máxima:	15,5 nós

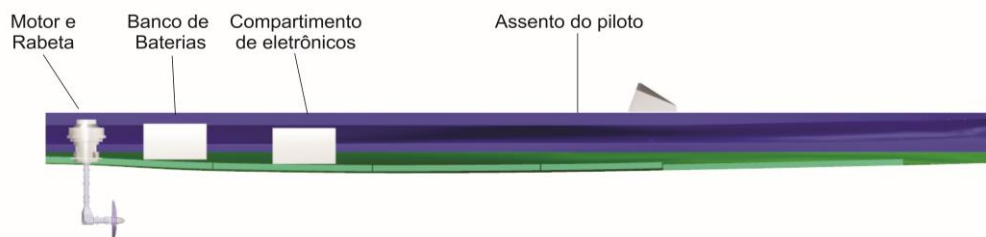


Figura 1 – Ilustração da embarcação solar eSB-Carine.

Assim sendo, faz-se necessária, preliminarmente, uma discussão relativa à concepção estrutural do casco, no que tange à definição da solução, não apenas efetiva, mas também eficiente para a maximização da relação resistência/peso. A correta seleção da concepção estrutural a ser adotada é de fundamental importância para a definição da topologia estrutural e respectivo dimensionamento do casco e de seus elementos estruturais. A metodologia de projeto adotada no desenvolvimento do presente trabalho é apresentada na Figura 2.

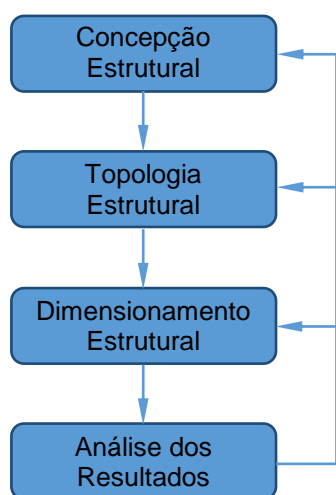


Figura 2 – Metodologia de projeto estrutural.

III/I – CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Os requisitos aplicados ao projeto estrutural da embarcação em estudo são atenuados pelas próprias condições de operação observadas durante as provas. Conforme descrito, as competições são realizadas em águas abrigadas e/ou parcialmente, cujas cargas ambientais são de pequena magnitude. Igualmente, a curta duração das provas, de no máximo 6 horas, resulta em um efeito

cumulativo de menor intensidade sobre a vida útil da estrutura. Sendo assim, é razoável assumir que as solicitações estruturais do casco são essencialmente de origem estática, tanto local quanto globalmente.

O arranjo geral da embarcação eSB-Carine é caracterizado por um significativo volume de obras mortas, resultante de uma ampla área de convés. Tal concepção de forma tem por objetivo satisfazer a dois requisitos distintos, a saber: disponibilizar o apoio necessário às placas solares e evitar o embarque de água no casco pelo cockpit.

Apesar de sua extensa área, em termos de cargas locais, o convés está submetido principalmente aos carregamentos de peso das placas solares. O sistema de fixação das placas solares ao convés resulta em cargas locais concentradas, localizadas próximas ao costado, tal como ilustrado na Figura 3.

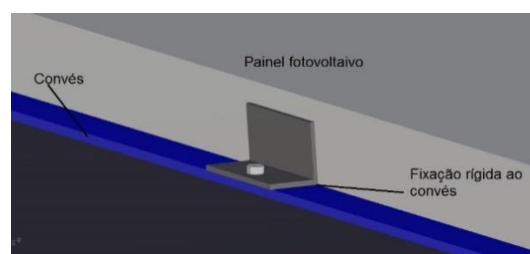


Figura 3 – Fixação das placas solares.

A região das obras mortas, caracterizada pelo casco lateralmente lançado, conforme Figura 5, não sofre esforços locais significativos. Portanto, a menos dos reforços locais nos pontos de fixação das placas solares, é razoável assumir como referência para o dimensionamento do convés apenas os carregamentos de origem global.

As obras vivas, por sua vez, estão sujeitas tanto a carregamentos distribuídos (empuxo hidrostático), bem como a intensos carregamentos locais. Os principais itens de peso da embarcação, além das placas solares (≈ 18 kg cada), são diretamente aplicados como cargas distribuídas ao fundo do casco: peso do piloto (≈ 70 kg), caixa da bateria (≈ 20 kg), caixa dos componentes eletrônicos (≈ 15 kg) e sistema propulsivo (≈ 12 kg), tal como ilustrado na Figura 4.

A configuração de carregamentos no casco demanda, portanto, a adoção de uma concepção estrutural que privilegie a resposta a solicitações globais primordialmente estáticas e de baixa magnitude, aliada a utilização de reforços locais (pontos duros) para a fixação dos principais itens de peso. A concepção estrutural adotada para o casco da embarcação eSB-Carine foi, então, baseada no conceito de casca, reforçada localmente em pontos específicos.

No projeto de embarcações destinadas à competição, o desenvolvimento da forma do casco e o projeto estrutural estão intimamente relacionados. O emprego de materiais na construção que permitam o desenvolvimento de formas complexas é particularmente interessante quanto ao desenho de cascos hidrodinamicamente eficientes. Igualmente, é possível utilizar a geometria do casco em benefício do projeto estrutural. A adoção de painéis curvos ao invés de painéis planos contribui para a redução do peso da estrutura e, conseqüentemente, sua eficiência.

No projeto de forma da embarcação eSB-Carine, a contribuição da geometria no projeto estrutural é nítida. Na Figura 5, é possível observar a utilização extensiva de superfícies curvas em diferentes seções das linhas casco. Tais soluções de forma possibilitam a redução da quantidade de material utilizado na fabricação do casco, minimizando, assim, seu peso estrutural.

Cabe ressaltar ainda, um aspecto particular quanto à concepção estrutural de embarcações solares. As placas solares utilizadas na categoria a qual pertence a embarcação eSb-Carine consistem em placas comerciais, cujas células fotovoltaicas são montadas em um chassi de alumínio. Tal configuração tem por finalidade garantir a resistência e a rigidez necessárias à instalação das placas solares.

A concepção estrutural do casco pode se beneficiar desta característica. O sistema de fixação das placas solares ao casco foi, então, concebido de forma a incorporar a sua contribuição à resistência estrutural do casco. Tal contribuição é particularmente observada na resposta em torção da estrutura. De fato, os painéis solares atuam como elementos enrijecedores do convés, ao serem rigidamente fixados ao casco.

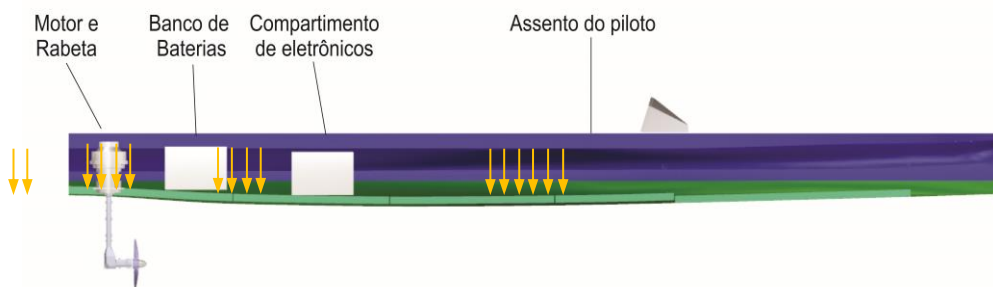


Figura 4 – Carregamentos aplicados ao fundo do casco.

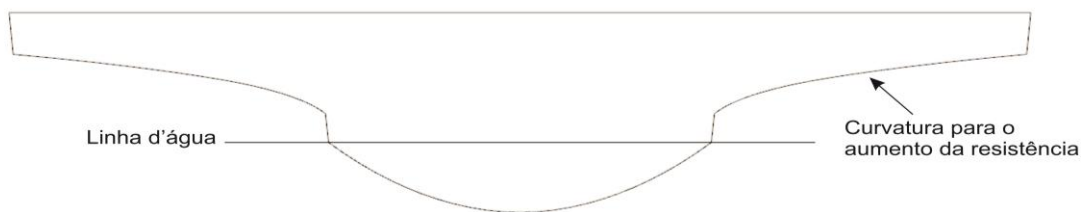


Figura 5 – Seção típica do casco.

III/II – SELEÇÃO DO MATERIAL

A escolha do material a ser utilizado na construção do casco é fundamental para o desenvolvimento do projeto estrutural. Tradicionalmente, as embarcações modernas de alto desempenho são construídas com materiais compósitos poliméricos, os quais proporcionam estruturas leves e resistentes, características ideais para o tipo de embarcação objeto deste trabalho. Assim, a seleção do material para a fabricação da estrutura do casco deve considerar as diversas possibilidades oferecidas pelos materiais compósitos.

Os materiais compósitos podem ser aplicados de várias formas na configuração estrutural de embarcações, o que proporciona certa flexibilidade para o projetista. Entretanto, cada tipo de aplicação deve ter suas características observadas em relação ao comportamento do material.

Destaca-se a particular adequação dos laminados sanduíche para maximização da relação resistência/peso em estruturas de alto desempenho. Tais laminados consistem em estruturas formadas por faces resistentes separadas por um material de núcleo de baixa densidade, cuja função é proporcionar um aumento da rigidez à flexão da estrutura sem elevar proporcionalmente seu peso (Figura 6).



Figura 6 – Laminado sanduíche.

Em Marinucci (2011), é apresentada uma demonstração dessa relação para painéis sanduíche simétricos (com faces semelhantes), de seção retangular e espessura constante. Considerando uma distância entre o centro das faces superior a 6 vezes a espessura do laminado, a rigidez a flexão, D , pode ser obtida pela expressão:

$$D = EI = E \left(\frac{bth^2}{2} \right) \quad (1)$$

onde E representa o módulo de elasticidade, I o momento de inércia, b a largura do painel, t a espessura das faces e h a distância entre o centro das faces. Assim, pode-se observar claramente que a presença do núcleo aumenta significativamente a rigidez à flexão da placa ao elevar o valor de h .

Esse tipo de estrutura é ideal para aplicações nas quais a rigidez se faz tão importante quanto a resistência da estrutura, o que se aplica às embarcações solares de competição. Nesse caso específico, a rigidez local do laminado que compõem as obras vivas da embarcação é fundamental para que o carregamento da estrutura, caracterizado por cargas locais, não altere a forma do

casco. Os laminados sólidos, por apresentarem menor inércia em comparação aos laminados sanduíche, são menos indicados para aplicação em regiões onde a rigidez da estrutura é característica importante.

A tecnologia dos processos de fabricação em materiais compósitos tem avançado consideravelmente nas últimas décadas. Esse aspecto tem sido um instrumento importante para o desenvolvimento de estruturas mais leves e resistentes. Processos de fabricação baseados em bolsa de vácuo, nos quais o laminado é compactado durante o processo de cura, têm proporcionado ganhos significativos no tocante ao desempenho de estruturas em compósitos, de uma forma geral.

Em vista das suas características no que se refere à obtenção de estruturas leves e resistentes, optou-se pela utilização de laminados do tipo sanduíche nas obras vivas e convés e laminados sólidos nas demais regiões do casco, ambos fabricados em bolsa de vácuo.

III/III – TOPOLOGIA ESTRUTURAL

Definida em função da concepção estrutural adotada, a topologia estrutural descreve o arranjo e a função dos elementos estruturais do casco da embarcação. A concepção estrutural em casca resulta em uma topologia estrutural simples, composta por superfícies externas e um número reduzido de elementos estruturais destinados, basicamente, ao suporte de carregamentos locais e/ou a transmissão de esforços entre regiões específicas do casco.

Em função dos carregamentos locais observados, a superfície do fundo do casco deve ser reforçada de modo a evitar tensões excessivas nestas regiões. Uma alternativa eficiente ao aumento da espessura do laminado para o reforço de tais regiões consiste na instalação de longitudinais alinhadas com o plano dos carregamentos verticais, tal como ilustrado na Figura 8. A redução de peso alcançada por esta solução é da ordem de 30%.

As longitudinais instaladas nas regiões de carregamentos locais no fundo do casco são apoiadas em

cavernas gigantes, alinhadas com os apoios das placas solares instaladas no convés. Além do apoio aos longitudinais do fundo, tal arranjo possibilita uma transmissão de esforços eficiente entre o fundo e o convés da embarcação. Esta configuração permite a agregação efetiva da inércia dos chassis das placas solares à estrutura do casco, proporcionando, em particular, um aumento significativo da sua rigidez torcional. A incorporação das placas solares como parte integrante da estrutura do casco resulta em um ganho expressivo em termos de redução de peso, ao proporcionar uma redução significativa da área do convés. De fato, ao se adotar tal concepção, a estrutura do convés pode ser restringida apenas às regiões expostas no entorno das placas solares e do cockpit do piloto (Figura 2).

III/IV – DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

A estrutura de embarcações é usualmente dimensionada considerando-se a hipótese simplificadora de uma viga-navio autossustentada. Todavia, não se dispõe de uma metodologia específica para o dimensionamento da estrutura de embarcações com as características observadas no protótipo objeto deste trabalho. Julgou-se, então, ser adequada a adoção de uma abordagem racional para o dimensionamento estrutural da embarcação eSB-Carine.

O processo de dimensionamento de estruturas em materiais compósitos é conduzido de forma a definir os tipos de laminados a serem construídos e sua composição para cada região da embarcação. Entretanto, a literatura especializada no dimensionamento de estruturas em materiais compósitos não oferece modelos aplicados ao projeto de laminados sanduíche em condições de contorno típicas de painéis autossustentados. Como forma de contornar tal limitação, optou-se pela adoção de uma condição de carregamento do casco conservadora para o dimensionamento da sua estrutura. A condição adotada supõe o apoio do casco pelas extremidades, tal como a configuração de uma viga biapoiada.

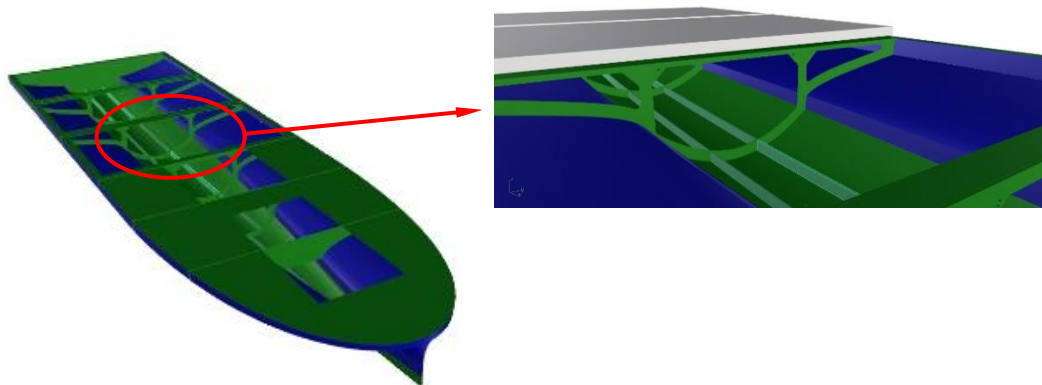


Figura 7 – Detalhe da topologia estrutural.

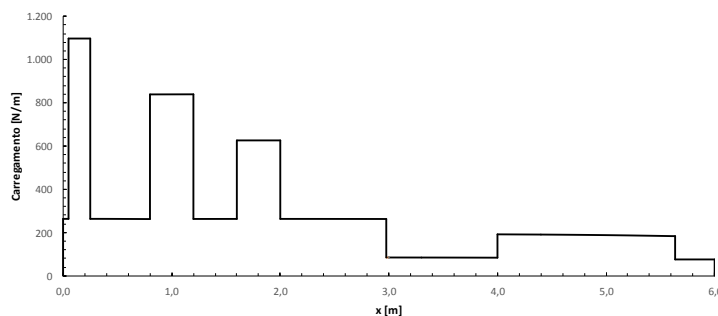


Figura 8: Curva de carregamento da estrutura (Distribuição de pesos, sem piloto).

Obviamente, tal condição de carregamento submete o casco da embarcação a níveis de tensão mais elevados do que aqueles verificados em uma condição de apoio autossustentado. A adoção de tal hipótese resultará, possivelmente, em certo nível de superdimensionamento estrutural. No entanto, é importante citar que tal condição de carregamento do casco não configura uma situação improvável, já que durante seu manuseio em operações de lançamento e retirada da água são observadas condições nas quais o casco é sustentado apenas em suas extremidades. Cabe ressaltar que no dimensionamento estrutural da embarcação objeto deste trabalho, as obras vivas são, essencialmente, o único elemento que colabora na resistência global da estrutura. Na Figura 8 é apresentada a curva de carregamento da estrutura adotada para o dimensionamento estrutural.

Assumindo tal condição de carregamento, fez-se o dimensionamento do laminado sanduíche, tendo por base o método analítico proposto por Cauchois (2008), o qual avalia as deformações e tensões atuantes nos laminados

sanduíche considerando-os como elementos de viga simétricos de espessura constante.

No método proposto por Cauchois (2011) inicialmente é obtido o valor de rigidez à flexão, D , tal como segue:

$$D = E_p I \quad (2)$$

Onde E_p representa o módulo de elasticidade das faces e I o momento de inércia.

Em razão das cargas aplicadas e do espaçamento entre os apoios é calculada a deflexão total, Δ_T , equivalente à soma das deflexões decorrentes das tensões normais de flexão, Δ_1 , e das deflexões decorrentes das tensões de cisalhamento, Δ_2 :

$$\Delta_T = \Delta_1 + \Delta_2; \quad (3)$$

$$\Delta_1 = K_s \frac{PL^3}{D}; \quad (4)$$

$$\Delta_2 = K_c \frac{PLc}{bd^2 E_c}. \quad (5)$$

Onde K_s e K_c representam constantes dependes do tipo de carregamento, P a carga aplicada, L a distância entre os apoios, c a espessura do núcleo, E_c o módulo de

cisalhamento do núcleo, b a largura do painel e d a distância entre os centros das faces.

É considerado aceitável como deflexão total máxima o limite de 0,5% da distância entre os apoios, de acordo com Cauchois (2008), ou seja:

$$\Delta_T \leq 0,5\%L. \quad (6)$$

Considerando que o momento fletor, M , no painel é dado por:

$$M = \frac{PL}{8}; \quad (7)$$

a tensão de flexão máxima, σ_s , é dada por:

$$\sigma_s = \frac{M d}{I}; \quad (8)$$

Tabela II – Resultados obtidos para o dimensionamento estrutural.

Região	Tipo de laminado	Gramatura (kg/m ²)	Área correspondente (m ²)	Massa total (kg)
Convés	Tipo 1	2,4	3,4	8,0
Obras vivas	Tipo 1	2,4	3,4	8,0
Obras mortas	Tipo 2	1,1	8,4	9,1
Cavernas	Tipo 1	2,4	0,8	1,8
Longarinas	Tipo 1	2,4	0,9	2,0
Espelho de popa	Tipo 1	2,4	0,4	0,8
Somatório				29,7

No método de Cauchois (2011), é assumida a hipótese de que tensões de flexão são suportadas unicamente pelas faces. Desse modo, no dimensionamento do laminado sanduíche, o valor de tensão de flexão máxima, σ_s , é adotado para o cálculo da composição das faces.

Por questões de simplicidade construtiva, os valores máximos referentes aos esforços cortantes e momento fletor foram usados como referência para dimensionar os painéis sanduíche de toda a obra viva da embarcação. Igualmente, os laminados das cavernas, das longitudinais e do convés foram definidos com as mesmas configurações das obras vivas. Os resultados obtidos para o dimensionamento estrutural são apresentados na Tabela 2.

Os laminados indicados na Tabela 2 apresentam as seguintes características:

- Laminado “Tipo 1”: Laminado sanduíche simétrico, núcleo estrutural de espuma de PVC (H80) com 6 milímetros de espessura, faces compostas por laminados de tecido bidirecional de fibra de vidro com matriz polimérica do tipo epóxi;
- Laminado “Tipo 2”: Laminado sólido composto por duas camadas de tecidos de fibra de vidro e matriz polimérica do tipo epóxi.

Os resultados obtidos para o laminado Tipo 1 indicam um valor de espessura da ordem de 6 mm, o que representa um valor típico para embarcações desse porte. De fato, no dimensionamento da estrutura foi observado que o critério

relativo ao limite de deflexão revelou-se mais restritivo do que o critério de tensão máxima de flexão. Cabe lembrar que tal resultado foi obtido considerando-se uma hipótese para o dimensionamento de caráter conservador, ao assumir um carregamento extremo da estrutura. Tal resultado sugere ser o método racional para o dimensionamento de painéis biapoiados uma alternativa simples e efetiva para o projeto estrutural do casco de embarcações com características típicas semelhantes às apresentadas pela embarcação objeto deste trabalho.

IV – COMENTÁRIOS FINAIS

Desde as concepções iniciais, até a seleção dos materiais utilizados, pode-se notar que para o desenvolvimento consistente e eficaz do projeto estrutural de uma embarcação de competição movida a energia solar é fundamental considerar as relações estabelecidas entre os diferentes componentes e aspectos desse tipo de embarcação.

Da mesma forma em que outros tipos de embarcações de alto desempenho, o projeto estrutural abordado nesse trabalho é um desafio que consiste em aliar alta resistência e baixo peso estrutural.

Dessa forma, pode-se concluir que pela ausência de metodologia específica para o dimensionamento da estrutura de embarcações com as características observadas no protótipo objeto deste trabalho, os resultados obtidos satisfazem os requisitos propostos de eficácia e eficiência da estrutura do casco.

V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Marinucci, G. Materiais Compósitos Poliméricos – Fundamentos e Tecnologia, Artliber Editora, 2011, 333p.;

Cauchois, J. P., Compósitos I – Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências, Capítulo 5, Abmaco, 2008, 623p.