

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

VINÍCIUS BOSCO TILLMANN

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE ELEMENTOS COMPÓSITOS COM A
UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Joinville, 2015

VINÍCIUS BOSCO TILLMANN

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE ELEMENTOS COMPÓSITOS COM A
UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Prof. Vitor Takashi Endo Me.
Eng

Joinville, 2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Nirton Luis Tillmann e Marli Clair Bosco Tillmann, pela motivação e confiança nos momentos mais difíceis dessa caminhada e principalmente por serem pais maravilhosos.

Ao meu irmão Guilherme Bosco Tillmann, por ser meu grande companheiro na estrada da vida, a quem eu busco orgulhar em todos os passos dados.

A todos os parentes e amigos que em algum momento contribuíram para a realização deste sonho.

Ao meu orientador Professor Vitor Takashi Endo mestre engenheiro, por toda ajuda e dedicação na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina representada pelo seu corpo docente e administrativo.

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, foi possível observar um grande crescimento do segmento náutico brasileiro. Em virtude desta crescente demanda, a competitividade gerada entre as empresas deste ramo tem contribuído para a evolução dos produtos e serviços oferecidos, uma vez que estes devem apresentar diferenciação no mercado por meio de inovação, qualidade e redução de custos. No presente trabalho, são apresentadas metodologias de análise estrutural para uma plataforma de popa da lancha de 32 pés (10 metros) de comprimento fabricadas pelo estaleiro Fibrafort, onde foi proposto um estudo envolvendo a análise de uma estrutura sanduíche com a utilização do método de elementos finitos. Após análise preliminar do projeto, identificou-se a necessidade de conhecer a real capacidade da peça e também a influência de alguns parâmetros de projeto, como direção dos reforços de fibra, posicionamento dos reforços, espessura e posicionamento do núcleo. O estudo consistiu na identificação de uma proposta de melhoria em termos estruturais, avaliando também possíveis reduções de massa e custos de produção do conjunto. Para tanto, foram propostas análises em um *software* comercial a fim de simular os esforços que a plataforma pode ser submetida e mapear a contribuição de cada camada (lâmina) no laminado final e assim propondo um plano de laminação alternativo e obter um comparativo entre o produto atual e a proposta, em termos de seu comportamento mecânico. Desta forma, o estudo envolvendo um problema real encontrado no dia-a-dia de um engenheiro naval serviu para aprimorar os conceitos estudados em sala de aula juntamente com o trabalho desenvolvido durante o estágio curricular. Finalmente, como resultado do estudo, conclui-se que com a adequação do plano de laminação a conceitos clássicos da engenharia de estruturas resultou em uma melhora no comportamento mecânico da peça estudada, sem necessitar de grandes investimentos, sem grandes alterações no material utilizado e nem alterações drásticas no processo de fabricação.

Palavras-chave: Estrutura sanduíche, plástico reforçado com fibra de vidro, elementos finitos, análise estrutural.

ABSTRACT

Over the past decades, we observed a large growth of the Brazilian nautical segment, because of this growing demand, competitiveness generated between the companies in this sector has contributed to the evolution of products and services, since they have to provide market differentiation through innovation, quality and cost reduction. In this paper, we present methods of structural analysis for aft deck of the boat 32 feet (10 meters) in length manufactured by Fibrafort shipyard where it was proposed a study involving the analysis of a sandwich structure using the method of elements Finite by. After preliminary analysis of the project, identified the need to know the real the capacity and also the influence of some design parameters, such as direction of fiber reinforcements, placement of reinforcements, thickness and positioning of the core. The study consisted in identifying a proposal for improvement in structural terms, evaluating also possible mass reductions and production costs. Therefore, it has been proposed analysis in commercial software to simulate the efforts that the platform can be submitted and map the contribution of each layer (blade) in the final laminate and so proposing an alternative rolling plan and get a comparison between the product current and the proposal in terms of their mechanical behavior. Thus, the study of a real problem encountered in day-to-day of a naval engineer served to enhance the concepts learned in the classroom with the work carried out during the traineeship. Finally, as a result of the study, it is concluded that the adequacy of the rolling plan to classical concepts of structural engineering resulted in an improvement in the mechanical behavior of the play studied without requiring large investments, without major changes in the material used and not drastic changes in the manufacturing process.

Keywords: Sandwich structure, plastic reinforced with fiberglass, finite element structural analysis

Sumário

Sumário	6
1. INTRODUÇÃO	8
1.2 Objetivo Principal	10
1.3 Objetivos Específicos	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 Materiais Compósitos	12
2.2 Fibras	13
2.3 Resinas	15
2.4 Teoria de Estrutura Sanduiche	16
2.5 Tipos de Núcleo.....	20
2.5.1 Núcleos de Madeira	20
2.5.2 Núcleos de Espuma.....	21
2.5.3 Núcleo Tipo Colmeia	23
2.6 Peso	24
3. MODELAMENTO MATEMÁTICO	25
3.1 Micromecânica Para Compósitos	25
3.1 Macromecânica Para Compósitos	29
3.1.1 Equações Constitutivas de Uma Lâmina	30
3.1.2 Relação Tensão-deformação Para Materiais Ortotrópicos no Estado Plano de Tensão. 32	
3.1.3 Transformação das Componentes de Tensão-deformação	33
3.1.4 Análise Macromecânica de um Laminado	35
3.1.5 Equação Constitutiva do Laminado	Erro! Indicador não definido.
4 METODOLOGIA.....	39
4.1 Validação do Modelo	40
4.2 Resolução do Problema	44
4.2.1 Modelamento Computacional	44
4.2.2 Propriedades dos Materiais	46
4.2.3 Condições de Contorno e Carregamento	50
4.2.4 Critérios de Aceitação	51

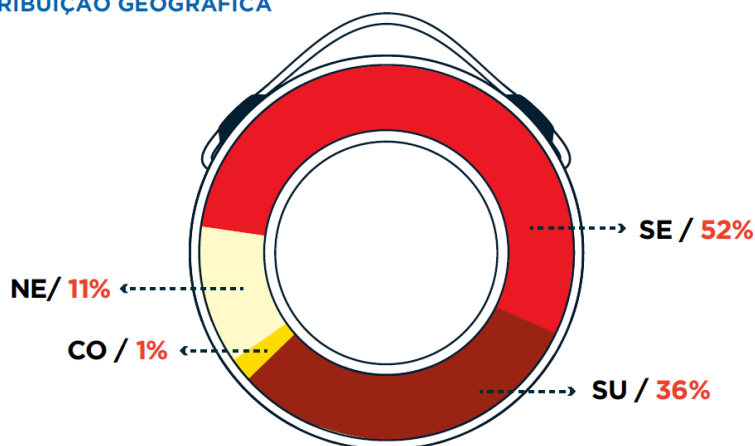
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	53
5.2 Resultado do Plano de Laminação Proposto.....	56
6 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, o segmento náutico brasileiro vem crescendo de forma acelerada, tendo sua consolidação no mercado nacional entre as décadas de 1970 e 1980. Segundo dados do SEBRAE (2012), a maioria dos estaleiros está localizada nas regiões sudeste e sul do país, conforme apresentado na Figura 1. O estado de Santa Catarina representa 21% do total de estaleiros, evidenciando a importância deste segmento no contexto naval.

Figura 1 - Distribuição geográfica dos estaleiros náuticos no Brasil

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA



Fonte: Fatos e Números (2012)

Ainda em conformidade com o SEBRAE (2012), os estaleiros participantes da pesquisa, 73% das empresas pretendiam ampliar sua estrutura física e a gama de produtos ofertados.

Com o crescimento da indústria náutica, espera-se um aumento na competitividade em todo o setor, o que contribui com a evolução dos produtos e serviços oferecidos. Este cenário impulsiona a melhoria de qualidade dos produtos,

inovação tecnológica e redução de custos, visando satisfazer as expectativas do mercado e do consumidor.

O crescimento deste mercado fez com que os materiais e processos de construção utilizados na indústria náutica fossem aprimorados, visando melhorias principalmente no peso, resistência, taxa de produção e custos.

Atualmente, os desafios envolvendo novos projetos em compósitos estão relacionados com a grande variedade de métodos e materiais disponíveis para o construtor profissional ou amador (NASSEH, 2007). Hoje no ramo náutico se utilizam muitas técnicas inovadoras desenvolvidas por construtores de barcos como também muitas técnicas de outros setores da indústria como o automobilístico e o aeroespacial, por exemplo, que são adaptadas para serem utilizadas na fabricação de embarcações.

Muitos estaleiros, além de lançar novos modelos buscam atualizar modelos já existentes, por meio de processos e materiais mais sofisticados visando melhorias de projeto: redução de peso, melhoria na resistência e durabilidade dos produtos, redução dos custos de produção.

Como toda esta evolução é de interesse do estaleiro Fibrafort estudar a viabilidade técnica e econômica da substituição da laminação em *single skin* pela laminação de painéis sanduiche na produção de embarcações de recreio. Objetiva-se uma redução de peso, garantindo que não haja perda de resistência, queda na qualidade final e também que não interfira negativamente na agilidade da produção.

Com essa finalidade será feito um estudo visando a utilização de painéis sanduiche, onde uma gama bastante grande de matérias de núcleo pode ser utilizada, e assim fazer o reprojeto da plataforma de popa para que alcance as características desejadas.

Neste caso específico de estudo, a plataforma de popa da Focker 320 GT já foi projetada utilizando o compensado naval como material de núcleo. A avaliação do plano de laminação existente deve atender aos requisitos sugeridos pela norma *Bureau Veritas* e pela ABNT NBR 14574, norma brasileira sobre embarcações de recreio em

plástico reforçado com fibra de vidro. Caso estes requisitos não sejam cumpridos será proposto um plano alternativo de laminação buscando o atendimento dos mesmos.

Na busca de uma proposta viável para a empresa, deve-se manter os mesmos materiais e processos de fabricação, uma vez que uma mudança radical de técnicas de construção naval implica em custos. Assim, pode-se facilitar a implantação das modificações propostas.

Para a realização dos cálculos e simulações, é fundamental o conhecimento acerca das propriedades mecânicas dos materiais, tendo em vista que são dados de entrada para a simulação numérica. Em situações em que não haja dificuldades para obtenção de tais dados, pode-se utilizar-se de teorias de micromecânica de compósitos para estimar as propriedades das lâminas. Neste sentido o presente trabalho buscou fazer a caracterização dos materiais fundamentada nas metodologias tratadas em dados bibliográficos de autores que abordaram o tema.

1.2 Objetivo Principal

Realizar a análise estrutural de laminados sanduiche utilizando o método de elementos finitos, tendo como alvo de estudo da plataforma de popa do modelo Focker 320 GT fabricado pela Fibrafort, e caso não atenda aos critérios de aprovação considerados, propor alterações no plano de laminação a modo de atender os requisitos.

1.3 Objetivos Específicos

- Fazer levantamento dos materiais utilizados na indústria náutica;
- Levantamento bibliográfico de tais materiais;
- Estudo da teoria de estruturas sanduiche;
- Estudo do método de elementos finitos para materiais compósitos;
- Realizar análise estrutural da plataforma de popa da Focker 320 GT;

- Levantar os requisitos de aprovação para o caso;
- Se necessário sugerir um plano de laminação alternativo para a plataforma;
- Realizar análise estrutural dos planos sugeridos;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Materiais Compósitos

O desenvolvimento de novas tecnologias e o avanço das sociedades estão atrelados à capacidade dos seres humanos em produzir e manipular materiais para satisfazer suas necessidades. Através do estudo dos materiais é possível analisar suas propriedades para uma determinada aplicação estrutural. As propriedades mecânicas relacionam resposta do material em termos de deformação quando este é submetido a um esforço mecânico conhecido (CALLISTER, 2002).

Figura 2 – Propriedades comparativas para fibras de vidro, carbono e aramida

FIBRAS DE REFORÇO - PROPRIEDADES COMPARATIVAS			
	Aramida	Carbono	Vidro
Alta Resit. a Tração	B	A	B
Módulo de Tração	B	A	C
Resistência a Compressão	C	A	B
Módulo de Compressão	B	A	C
Resistência a Flexão	C	A	B
Módulo de Flexão	B	A	C
Resistência ao Impacto	A	C	B
Resist. Interlaminar ao Cisalhamento	B	A	A
Resistência ao Cisalhamento	B	A	A
Densidade	A	B	C
Resistência a Fadiga	B	A	C
Resistência ao Fogo	A	C	A
Isolamento Térmico	A	C	B
Expansão Térmica	A	A	A
Custo	C	C	A

A = Excelente B = Aceitável C = Baixo

Fonte: NASSE (2007)

Materiais compósitos caracterizam-se pela combinação das melhores características de cada um dos materiais que os compõem (SILVA, 2010). Muitas aplicações exigem do material um conjunto de propriedades que pode não ser encontrada em um único material. Assim, esta associação de mais de um material pode ser a solução para que se atinjam os requisitos para determinada aplicação. Esta

combinação de materiais pode ser feita entre vários metais, cerâmica e polímeros, tendo em vista a melhora de características mecânicas.

2.2 Fibras

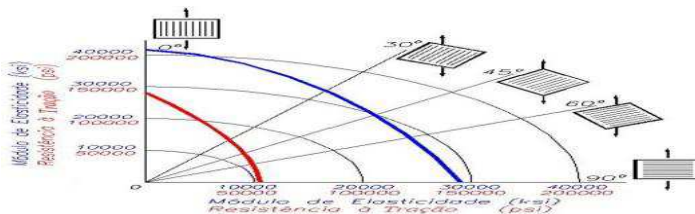
Nas últimos anos, a utilização de estruturas em material compósito com reforço em fibras tem proporcionado a obtenção de peças com resistência superior à maioria dos materiais de engenharia conhecidos em relação à massa final. Os compósitos reforçados com fibra apresentam excelentes relações resistência x peso e módulo de elasticidade x peso (CALLISTER, 2002).

Dentro da estrutura do material compósito, os esforços mecânicos são transferidos da matriz para as fibras, que responsáveis pelas elevadas propriedades mecânicas. Dentre as principais características das fibras de reforço, pode-se citar: tipo de filamento, a interação da sua superfície com a matriz de resina, a quantidade de resina e finalmente a orientação do reforço (NASSEH, 2007).

A grande diferença entre plásticos reforçados com fibra e outros tipos de materiais se deve à ortotropia, que significa que o material pode se comportar de forma diferente quando submetido a cargas em diferentes direções. É possível, então, construir uma embarcação mais leve e resistente posicionando as fibras nas direções de maiores esforços.

Os materiais compósitos possuem uma resistência muito maior no sentido longitudinal às fibras, conforme apresentado na Figura 3. Com isso a utilização de fibras alinhadas com a direção dos esforços reduz a quantidade de material sem função estrutural dentro do compósito.

Figura 3 - Propriedades do laminado em relação a orientação das fibras



Fonte: Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/397264/>

As fibras de vidro são produzidas a partir da liquefação do mesmo devido ao aumento da temperatura, e resfriado a alta velocidade voltando à forma sólida. A velocidade do escoamento do vidro e a temperatura são parâmetros que podem ser ajustados para produção de filamentos com diâmetros variados. Posteriormente esses filamentos devem ser tratados para melhorar a sua resistência a umidade e a abrasão.

As fibras de vidro são produzidas em uma variedade de composições químicas, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas, as quais são identificadas por uma letra do alfabeto. De todas essas variedades, as fibras de vidro do tipo E, C e S são as mais utilizadas. O interesse maior do construtor de barcos está no vidro tipo E, feito originalmente para isolamento elétrico. Grande parte da produção de laminados de fibra de vidro nas mais diversas aplicações é feita com esse tipo de material.

O vidro tipo E tem baixo teor de alcalinidade, boa resistência à tração e relativamente boa rigidez em relação à flexão. Os filamentos usados nos laminados são produzidos num diâmetro entre 10 e 21 microns. O vidro tipo E é, sem dúvida, a fibra mais popular entre os construtores de barcos e provavelmente 95% de todas as embarcações do mundo sejam feitas com esse tipo de material (NASSEH, 2011).

Além da fibra de vidro também podem ser encontrados barcos construídos com fibras de aramida, mais conhecidas como Kevlar®, marca registrada da empresa Dupont®, mas que na verdade representam um tipo de fibra poliamida, da família do nylon, e barcos construídos em fibra de carbono que, assim como as fibras de aramidas, são materiais que muitos construtores e projetistas tem usado para impressionar seus clientes.

O teor de fibra em qualquer tipo de laminado de material compósito exerce uma das maiores influências sobre a resistência e rigidez do laminado. Quanto maior a quantidade de fibra no laminado melhores serão as propriedades mecânicas, lembrando que isto é válido até um limite que visa atender as especificações de composição do material.

Cada tipo de reforço está associado a uma determinada fração em volume de resina, visto que existe uma quantidade mínima de resina necessária para impregná-lo e manter todas as fibras coladas umas às outras (NASSEH, 2007). Como a função da resina é de segurar as fibras no lugar para que elas por sua vez resistam aos esforços, um excesso de resina estaria associado a um aumento de peso desnecessário no laminado, o que faz com que a quantidade de resina utilizada seja bastante relevante no resultado final.

2.3 Resinas

As resinas de maneira geral são polímeros sintéticos que foram desenvolvidos nos últimos 60 anos e uma característica comum aos polímeros é ter cadeias muito longas, resultantes da união de muitos segmentos idênticos (NASSEH, 2007).

A parte reativa do polímero pode dar origem a uma resina que, misturada com um material de reforço tal como fibra de vidro, de carbono, de aramida, é transformada em um material compósito. Quando este polímero tem ligações cruzadas muito fortes para ser rompido por aquecimento moderado eles são chamados de termofixos, e podem gerar resinas do tipo poliéster, estervinílica, *epóxi* ou fenólica etc. Na prática, a resina tem a função de prender as fibras na posição desejada pelo construtor e prover uma barreira química contra a água.

A seleção do tipo de resina para determinada aplicação dependerá de vários fatores como: requerimento estrutural do laminado, do custo total da resina no preço final da peça, das facilidades para manuseio e cura, tipo de ambiente onde será usado o laminado, temperatura de operação e tempo de vida para que foi projetada a estrutura. Normalmente, todas as resinas utilizadas na laminação de estruturas em material compósito são a combinação de vários tipos de resina e aditivos. Por isso o termo sistemas de resina ou matriz de resina pode ser encontrado em literaturas de fabricantes desse material. Esses aditivos podem aumentar ou diminuir a viscosidade do material, modificar a resistência contra raios ultravioleta, adicionar cor ao laminado,

aumentar a resistência ao cisalhamento interlaminar e a flexibilidade do material, modificar a tensão superficial da resina durante o processo de impregnação etc.

As resinas de poliéster insaturado são produzidas pela reação de ácidos insaturados, onde os mais comuns são o ácido fumárico e o anidrido maleico, em combinações com um ácido saturado do tipo orto ou isoftálico, juntos com um glicol, como propileno-glicol ou etileno-glicol, e dissolvidos em um monômero reativo, normalmente estireno (NASSEH, 2011).

As resinas de poliéster são adotadas pela indústria como as mais simples para laminação geral. Existe uma grande quantidade de tipos disponíveis que apresentam as mais variadas combinações de propriedades, cada uma desenvolvida para uma aplicação específica.

O processo de cura da resina passa por duas etapas, a primeira é a gelificação que vai desde a hora em que se mistura o catalisador, substância que aumenta a velocidade da reação diminuindo a energia de ativação sem participar da reação, até o ponto em que a resina começa a se apresentar na forma de gel, a partir da gelificação não se consegue mais trabalhar com a resina e por isso deve se ter um bom controle da dosagem de catalisador.

O aumento da temperatura durante a cura da resina pode danificar ou mesmo comprometer a estrutura sanduíche, pois, devido à reação exotérmica, a temperatura da peça pode atingir 170°C (NASSEH, 2011).

O processo de cura da resina acontece através da liberação de radicais livres por parte do iniciador, usa-se um catalisador do tipo peróxido, esse iniciador se quebra formando radicais livres altamente energizados, acabando por atacar os pontos insaturados do polímero e do monômero. Assim a reação se propaga começando a juntar as partes através de uma reação de ligação cruzada tridimensional (NASSEH, 2007).

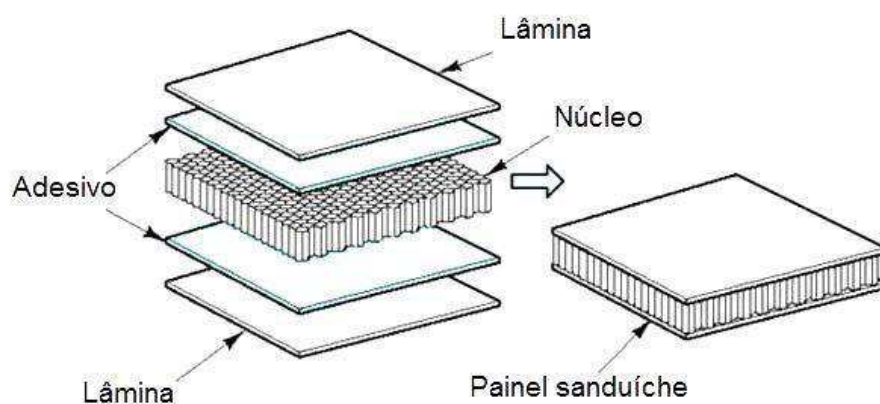
2.4 Teoria de Estrutura Sanduiche

Historicamente o conceito de estruturas sanduiche foi formulado em 1820 por franceses, mas somente 110 anos depois foi posto em prática com pequenos aviões

que utilizavam faces de asbesto e papelão prensado como material sanduiche. Durante a Segunda Guerra Mundial, o avião britânico Mosquito, foi provavelmente o primeiro projeto a usar comercialmente, e em serie, o conceito de estruturas sanduiche. Boa parte não estrutural do avião era fabricada em chapas sanduiche de laminados de madeira compensada fina e balsa, contudo a decisão de escolher este tipo de estrutura e estes materiais foi devido à falta de outras opções e pela escassez de materiais durante o esforço de guerra (NASSEH, 2011).

O laminado sanduíche consiste de duas faces de um laminado de alta resistência e um núcleo de baixa densidade. O papel das faces na estrutura é suportar os momentos de flexão no painel, resistindo aos esforços de tração e compressão desenvolvidos nas camadas opostas quando o painel esta sob carregamento. Além de resistir às tensões de tração e compressão, as faces devem ter espessura suficiente para resistir a flambagem e avarias por impactos localizados.

Figura 4 - Visão expandida de um painel sanduiche.

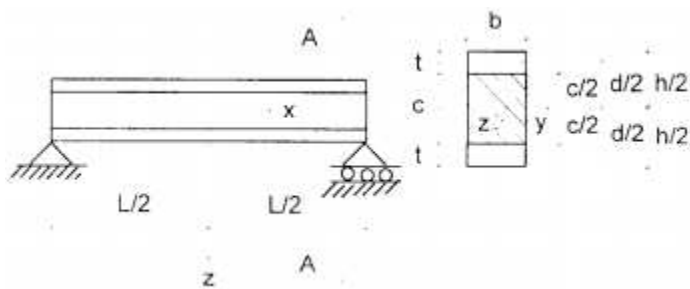


Fonte: Disponível em: <http://fabricacaodecompositos.com.br/2012/06/paineis-sanduiche.html>

A construção sanduíche em um laminado oferece as mesmas vantagens que uma viga "I" em uma estrutura metálica, mas ao invés de uma alma e dois flanges, a construção em sanduíche faz uso de um material de núcleo de baixa densidade, que é faceado por ambos os lados por laminados de fibra, metal ou mesmo de madeira.

Para um melhor entendimento da influência do núcleo na rigidez usou-se um exemplo de viga sanduíche em flexão composta por duas faces de espessura t intercalada por um núcleo de baixa densidade de espessura c , sendo a altura total da viga h e a largura b . figura 5 (BERTINI,1995).

Figura 5 - Características geométricas da viga sanduíche.



Fonte: (BERTINI,1995).

Considerando que as faces aderem ao núcleo perfeitamente, que os materiais são isotrópicos e que a viga é estreita de tal modo que as tensões na direção y podem ser consideradas desprezíveis.

Desta forma a relação do momento-curvatura fica:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{M_y}{EI} \quad (1)$$

Onde:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

Sendo:

P – Raio de curvatura;

k – Curvatura definida como o inverso do raio de curvatura;

M_y - Momento aplicado em torno do eixo y ;

E – Módulo de elasticidade;

I – Momento de Inercia;

b – Largura da viga;

h – Altura da viga.

Deste modo entende-se que o módulo elástico (E) do material multiplicado pelo momento de inércia (I) constitui a rigidez a flexão da viga (D), como a viga é de seção composta, a rigidez é obtida pela soma das rigidezes das faces e do núcleo separados calculadas em relação ao eixo central da seção inteira. Assim:

$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (3)$$

Sendo:

E_f – Módulo de elasticidade da face;

E_c – Módulo de elasticidade do núcleo.

d – Distância entre os eixos centrais das faces e do núcleo.

Onde na equação acima o primeiro termo se refere à rigidez à flexão das faces, o segundo termo faz associação desta rigidez à flexão em torno do eixo central da seção transversal da viga e o terceiro faz referência à rigidez do núcleo.

Na prática, o segundo termo é maior que os outros dois por se tratar de uma estrutura sanduíche onde a ideia é afastar as faces uma da outra, assim percebe-se que a espessura do núcleo é elevada ao cubo, sendo este o termo mais relevante da equação.

Para as faces suportarem os esforços já mencionados, devem ser mantidas na posição original em relação ao eixo neutro do painel e uma não deve se mover em relação à outra. Este é na verdade o trabalho realizado pelo material de núcleo, que deverá prover rigidez à compressão e também ser resistente ao cisalhamento.

Se o material tiver uma resistência baixa à compressão, as faces poderão se aproximar umas das outras quando a estrutura estiver em flexão. Se a tensão de cisalhamento do material de núcleo for insuficiente, as faces poderão escorregar uma contra a outra e a estrutura não trabalhará como um todo e a integridade global da estrutura dependerá somente da resistência individual de duas faces muito finas (NASSEH, 2011).

O material de núcleo ideal deve ser leve e ter boas propriedades mecânicas de compressão e cisalhamento, contudo existem outros requisitos que também devem ser considerados. O núcleo não deve ser friável, ou seja, não se esfarelar facilmente e nem quebradiço para não causar a delaminação das faces externas sob impacto. Deve ter a habilidade de produzir uma boa linha de colagem com a resina de laminação ou adesivo, possuir uma resistência à fadiga, resistir corrosão e à deterioração causada pelo meio ambiente, ter resistência à água, e o mais importante não deve absorver ou reter umidade (NASSEH, 2011).

Muitos tipos de material sanduíche são suscetíveis ao ataque químico por parte da própria resina, ou pela exposição demorada durante o tempo de cura ou mesmo à temperatura gerada durante o processo de cura da matriz de resina. Este tipo de ataque reduz consideravelmente a resistência global do laminado sanduíche.

Na indústria náutica principalmente pelo baixo custo, fácil obtenção e elevada resistência à compressão a madeira foi o precursor dos materiais de núcleo em estruturas sanduíche, sendo entre as elas os mais populares a madeira balsa e o compensado naval.

2.5 Tipos de Núcleo

2.5.1 Núcleos de Madeira

A madeira mais utilizada como núcleo para a construção sanduíche é a balsa. Sendo esta um dos materiais de núcleo mais baratos disponível para esse tipo de construção e como todo material possui vantagens e desvantagens (NASSEH, 2011).

Mesmo possuindo propriedades de resistência à compressão e ao cisalhamento, a utilização de madeira balsa é problemática em estruturas expostas ao ambiente marinho, pois uma rachadura é suficiente para que a madeira comece a absorver água, iniciando a saturação e o colapso da estrutura sanduíche.

Basicamente as duas grandes desvantagens desse material são o peso e a característica de alta absorção de água e umidade em relação aos outros materiais

citados a seguir. Ainda há o risco de o núcleo absorver água durante a vida útil do barco, levando ao aumento de peso e à possível delaminação, fenômeno onde as camadas do laminado se soltam umas das outras, fatores estes que podem ser mais facilmente controlados nos núcleos de espuma.

Figura 6 - Propriedades da madeira Balsa

PROPRIEDADES DE MATERIAL - Balsa				
		LD7	PB	FW
Densidade	kg/m ³	90	155	220
Resistência a Compressão	psi	783	1842	3176
Módulo de Compressão	psi	268250	594500	991800
Resistência a Tração	psi	1015	1958	2987
Resistência ao Cisalhamento	psi	232	435	653
Módulo de Cisalhamento	psi	13920	24070	34365

Fonte: NASSEH (2007)

2.5.2 Núcleos de Espuma

A espuma de PVC é provavelmente o tipo de núcleo mais utilizado na construção de barcos atualmente principalmente pelas últimas formulações de espuma de PVC disponíveis que tem oferecido quase o mesmo desempenho estrutural e o baixo peso que os *honeycombs*, com a facilidade de ser uma estrutura microscopicamente sólida, o que permite a laminação direta sobre a superfície, e o mais importante, o custo é menor que o dos *honeycombs*. Além das espumas de PVC, ainda podem ser encontradas em construções de barcos outras espumas como as de poliuretano, poliestireno e de poliéster (NASSEH, 2011).

Poliuretano, poliestireno e poliéster possuem pouco espaço na construção de barcos como núcleos estruturais, porque são pouco resistentes, se comparados com espumas fabricadas a partir de PVC (Cloreto de Polivinila), mas são comumente utilizados em pranchas de surf e também como formas ou moldes para laminação de longarinas e estruturas num casco de fibra. São também utilizados algumas vezes para

criar flutuabilidade adicional em pequenos barcos. Nesse último caso, não são usados como material de núcleo, mas simplesmente para preencher espaços e prover flutuação positiva em caso de avarias (NASSEH, 2011).

A espuma de PVC pode ser de dois tipos, o PVC flexível ou PVC semirrígido, ambos os tipos possuem aplicações no mercado, dependendo da importância que o construtor ou projetista busca em relação à flexibilidade ou resistência da estrutura.

Um dos maiores problemas associados à espuma de PVC flexível é que além de amolecer em presença da resina poliéster, a temperatura de exposição não pode ultrapassar os 45 °C o que o torna inviável para uso no convés, superestrutura e casarias. Em barcos construídos para ser utilizado em regiões tropicais, tal material, não encontra aplicação.

Por outro lado, as espumas de PVC semirrígidas, que em algumas densidades pode permitir uma deformação por cisalhamento em até 40%, conhecidas como Divinycell® e Klegecell®, possuem elevada resistência à compressão e ao cisalhamento, além de possuírem excelente resistência química e à temperatura de operação que varia entre -40 a 180°C. Além disso, sua formulação e produção fazem com que tenham 100% de células fechadas o que impede a absorção de água (NASSEH, 2011).

Essas espumas de PVC são fabricadas em diversas densidades, as mais comuns são: 30, 45, 60, 80, 100, 130, 160 200 a 250 kg/m³. As espessuras variam de 3 até 75 mm e podem ser adquiridas em chapas planas ou cortadas em blocos de 40 x 40 mm, 30 x 30 mm ou 20 x 20 mm, colocadas em uma tela de fios de vidro.

Devido ao fato de ser produzido em larga escala as espumas de PVC possuem preço competitivo, por mais que o processo de produção necessite de várias semanas para fabricação, expansão e cura. Atualmente 90% dos barcos construídos em sistemas sanduíche utilizam esse material (NASSEH, 2011).

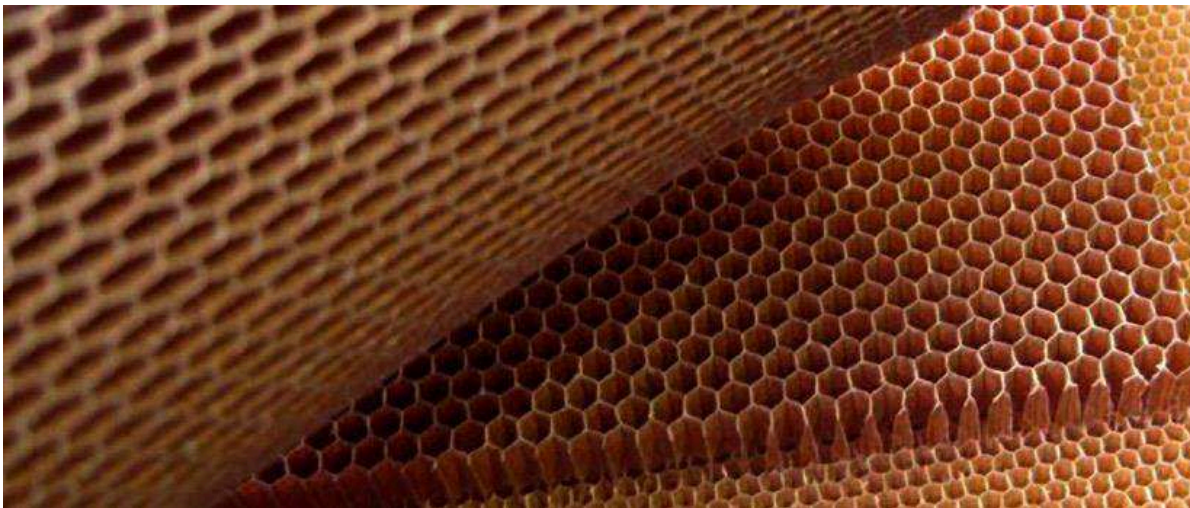
As espumas semirrígidas também podem ser encontradas para aplicações em altas temperaturas (HT – *High Temperature*) e para aplicações em profundidades, resistindo a altas pressões (HCP – *Hydraulic Crush Point*). Além destas, outro material

que possui resistência à compressão e ao cisalhamento é o honeycomb, porém, possui custo mais elevado, sendo justificada sua aplicação em embarcações de alto desempenho.

2.5.3 Núcleo Tipo Colmeia

Honeycombs, também conhecidos como colmeias, foram desenvolvidos principalmente para o uso na indústria aeronáutica e aeroespacial, embora exista hoje uma linha desses produtos destinados à construção de barcos. Os *honeycombs* podem ser construídos de papel impregnados com resina, fibra de vidro, carbono, fibras aramidas, polietileno e alumínio.

Figura 7 - Núcleo tipo colmeia.



Fonte: Disponível em: www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br

Materiais de núcleo tipo colmeia possuem uma maior capacidade de compressão e cisalhamento do que qualquer outro com densidade equivalente. Esta é a razão de seu uso em aplicações onde baixo peso e rigidez são importantes. As aplicações em construção de barcos com esse núcleo têm sido feitas, principalmente,

em barcos de regata, onde a despesa extra com o custo desses materiais pode ser justificada (NASSEH, 2011).

O tipo mais usado de colmeia para construção sanduiche em embarcações de regata com baixo peso é feito de fibras de aramida. As células dos *honeycombs* podem ter vários tipos de configurações, porém, as mais usuais são as células hexagonais, triangulares e quadradas (NASSEH, 2011).

A densidade deste material pode chegar a 100 kg/m^3 , apesar de não ser tão baixa quanto de espuma de PVC que pode chegar a 250 kg/m^3 , possuem relações entre resistência a compressão e densidade muito maiores que as espumas de PVC. Assim o *honeycomb* possui alta resistência à compressão mantendo seu baixo peso.

2.6 Peso

Em uma embarcação a motor a redução no peso pode levar a uma redução da potência instalada para alcançar uma determinada velocidade máxima, onde esta potência reduzida pode ocasionar redução ainda maior do peso e isso acaba se tornando um efeito cumulativo. Esta diminuição no peso total da embarcação oferece aumento na economia de combustível e conseqüentemente a maior autonomia.

Uma das variáveis que afeta diretamente a qualidade de navegação de um barco é a aceleração vertical gerada ao longo de seu comprimento. Esta aceleração é consequência do desenho do casco, comprimento, velocidade, deslocamento e distribuição de peso. Um barco mais leve tem a possibilidade de romper com mais velocidade as ondas que outro de massa maior.

3. MODELAMENTO MATEMÁTICO

3.1 Micromecânica Para Compósitos

A resistência e rigidez desejada de um determinado compósito podem ser alcançadas simplesmente pela variação da quantidade relativa de fibra e matriz.

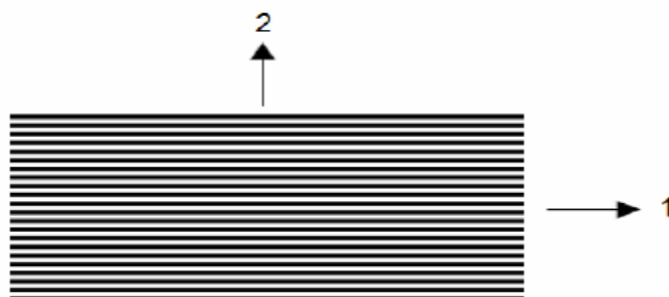
O principal objetivo da micromecânica é determinação das propriedades mecânicas em termos dos elementos constituintes do material, bem como as proporções relativas de reforço e matriz (AL-QURESHI,2002).

Para esta análise levou-se em consideração as seguintes hipóteses:

- A lâmina é elástica e livre de tensões internas e térmicas;
- As fibras são uniformes nas propriedades e diâmetro, contínuas, paralelas no compósito e regularmente espaçadas;
- A matriz é considerada homogênea, isotrópica e apresenta comportamento linear elástico;
- Há uma perfeita ligação entre fibra e matriz bem como ausência de vazios.

Para as seguintes demonstrações será adotado o seguinte sistema de coordenadas, direção 1 onde os eixos se posicionam paralelamente à direção das fibras e direção 2 onde os eixos se posicionam perpendicularmente a direção das fibras, como mostra a figura 8.

Figura 8 - Direções principais 1-2 em uma lâmina de compósito



Os cálculos das propriedades elásticas de um compósito podem ser feitos a partir das propriedades elásticas de seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas.

Em um compósito o volume total do material é dado por:

$$v_T = v_M + v_F + v_V \quad (4)$$

Onde:

v_T = volume total

v_M = volume de matriz

v_F = volume de fibra

v_V = volume de vazios

Sendo o volume de vazios correspondente ao volume de bolhas de ar e gases que exalam no processo de cura da resina.

A fração volumétrica é dada por:

$$V_F = \frac{v_F}{v_T}; V_M = \frac{v_M}{v_T}; V_V = \frac{v_V}{v_T} \quad (5)$$

Onde:

V_F = fração volumétrica de fibra;

V_M = fração volumétrica da matriz;

V_V = fração volumétrica de vazios.

Resultando:

$$V_F + V_M + V_V = 1 \quad (6)$$

A fração volumétrica de vazios está diretamente ligada à qualidade do compósito, idealmente inferior a 1% portanto despreza-se esta variável.

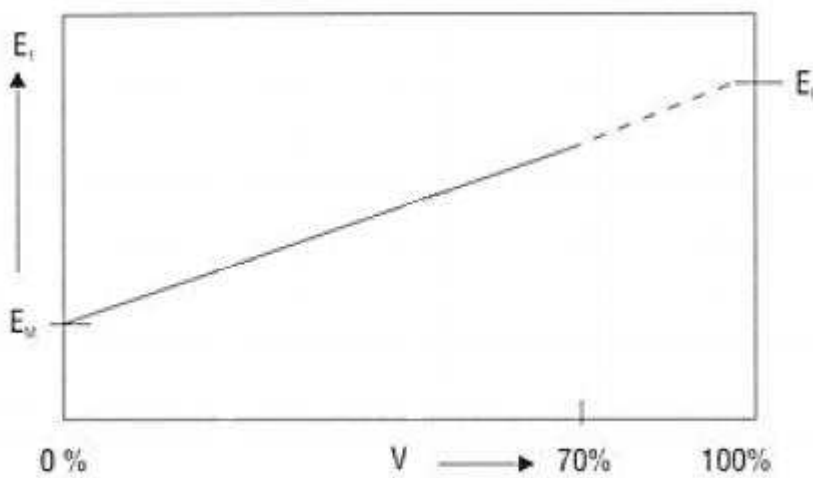
$$V_F + V_M = 1 \quad (7)$$

Para o caso em que os esforços ocorrem no eixo de coordenadas 1, paralelo às fibras, em um laminado com reforço unidirecional, pela regra das misturas tem-se que:

$$E_1 = E_F \times V_F + E_M \times V_M \quad (8)$$

Sendo assim o módulo de elasticidade do compósito se aproxima do módulo da fibra à medida que o teor de vidro aumenta, porém até certo limite em torno de 70%, onde passa a haver um risco quanto à presença de bolhas ou não impregnação completa do laminado como mostrada na figura 9.

Figura 9 – Módulo de elasticidade do laminado em relação ao teor de vidro (direção das fibras).



Fonte: Autor desconhecido. Notas de aula, Professor Dr. Gabriel Benedet Dutra Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC Centro de Engenharia da Mobilidade

Considerando que os esforços ocorram na direção 2, perpendicular às fibras, em um laminado com reforço unidirecional, pela lei de *Hooke* tem-se:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_F}{E_F} + \frac{V_M}{E_M} \quad (9)$$

Ou

$$E_2 = \frac{E_F \times E_M}{V_F \times E_M + V_M \times E_F} \quad (10)$$

Sendo:

E_1 = Módulo de elasticidade do laminado na direção 1;

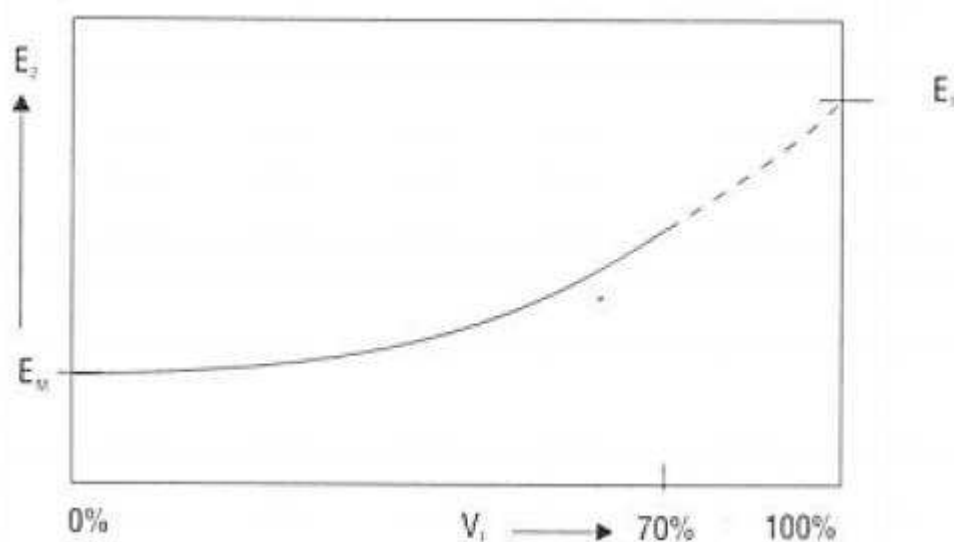
E_2 = Módulo de elasticidade do laminado na direção 2;

E_F = Módulo de elasticidade da fibra;

E_M = Módulo de elasticidade da matriz.

Percebe-se assim que na direção perpendicular, as fibras pouco influenciam no módulo elástico do laminado, como mostrado na figura 10, começando a fazer diferença com teor de vidro acima de 50%, lembrando que acima de 70% há os mesmos riscos citados anteriormente.

Figura 10 – Módulo de elasticidade do laminado em relação ao teor de vidro (direção perpendicular às fibras).



Fonte: Autor desconhecido. Notas de aula, Professor Dr. Gabriel Benedet Dutra Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC Centro de Engenharia da Mobilidade

O coeficiente de Poisson de um laminado pode ser relacionado com o módulo de elasticidade linearmente:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{21}} \quad (11)$$

E

$$\nu_{12} = \nu_M \times V_M + \nu_F \times V_F \quad (12)$$

Sendo:

ν_{12} = Coeficiente de Poisson devido à tensão atuando na direção 1;

ν_{21} = Coeficiente de Poisson devido à tensão atuando na direção 2;

ν_m = Coeficiente de Poisson da matriz;

ν_f = Coeficiente de Poisson da fibra.

Já o módulo de cisalhamento tem seu comportamento descrito análogo ao módulo de elasticidade na direção 2, perpendicular à orientação da fibra:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_F}{G_F} + \frac{V_M}{G_M} \quad (13)$$

Assim:

$$G_{12} = \frac{G_F \times G_M}{V_F \times G_M + V_M \times G_F} \quad (14)$$

Sendo:

G_{12} = Módulo de cisalhamento associado ao plano;

G_M = Módulo de cisalhamento da matriz;

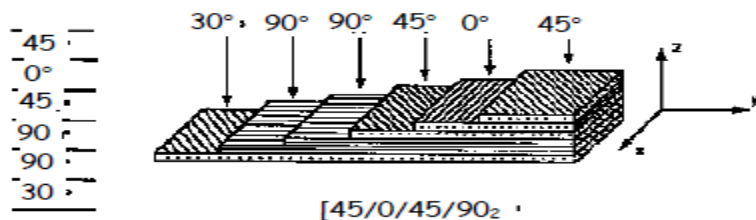
G_F = Módulo de cisalhamento da fibra.

3.1 Macromecânica Para Compósitos

Na macromecânica a análise de uma lâmina é feita de modo que as tensões nas fibras e na resina não agem individualmente como supunha a micromecânica, levando em conta as interações entre os elementos constituintes, mas apresentando um valor médio aparente (AL-QURESHI,2002).

Uma peça ou componente fabricado de material compósito é formado pela sobreposição de lâminas e assim recebe o nome de laminado, as propriedades deste podem ser antecipadas quando se conhece as propriedades das lâminas que o compõem, assim o comportamento do laminado também é governado pelo comportamento das lâminas individuais (AL-QURESHI,2002).

Figura 11 - Designação de um laminado



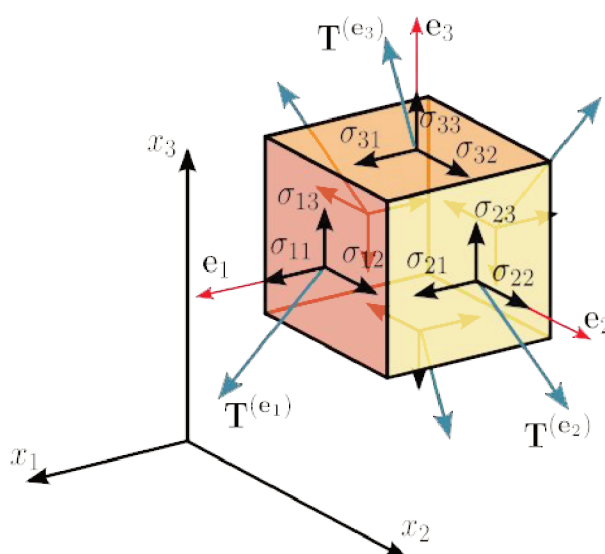
Fonte: (PEREIRA, 2005)

3.1.1 Equações Constitutivas de Uma Lâmina

Um estado de tensão em um ponto no domínio de um material na configuração deformada pode ser definido pela tensão de *Cauchy*, composto por nove componentes de tensão como segue:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Figura 12 - Componentes de tensões em três dimensões



Fonte: FRIDTJOV (2008)

A Lei de Hooke generalizada relaciona as nove componentes de tensão de Cauchy com as nove componentes de deformação da seguinte forma:

$$\sigma_{ij} = Q_{ijkl} \times \varepsilon_{kl} \text{ e } \varepsilon_{kl} = S_{ijkl} \times \sigma_{ij} \quad (16)$$

$$[S] = [Q]^{-1} \quad (17)$$

Assim as componentes de tensão são representadas por σ_{ij} e as componentes de deformação infinitesimal representada por ε_{kl} , onde Q_{ijkl} representa a matriz de rigidez e S_{ijkl} a matriz de flexibilidade do material, sendo $[S]=[Q]^{-1}$. Este sistema é constituído por uma matriz 9 x 9 resultando em 81 coeficientes elásticos. No entanto,

devido à simetria existente entre σ_{ij} e σ_{ji} assim como entre ε_{kl} e ε_{lk} passam a existir apenas 36 coeficientes elásticos (AL-QURESHI,2002), como segue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Onde:

$$\sigma_1 = \sigma_{11} = \sigma_x; \sigma_2 = \sigma_{22} = \sigma_y; \sigma_3 = \sigma_{33} = \sigma_z; \sigma_4 = \sigma_{23} = \tau_{yz}; \sigma_5 = \sigma_{13} = \tau_{xz} \text{ e } \sigma_6 = \sigma_{12} = \tau_{xy} \quad (19)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{11} = \varepsilon_x; \varepsilon_2 = \varepsilon_{22} = \varepsilon_y; \varepsilon_3 = \varepsilon_{33} = \varepsilon_z; \varepsilon_4 = \gamma_{23} = \gamma_{yz}; \varepsilon_5 = \gamma_{13} = \gamma_{xz} \text{ e } \varepsilon_6 = \gamma_{12} = \gamma_{xy} \quad (20)$$

Para materiais anisotrópicos são válidas as relações $Q_{ij} = Q_{ji}$ o que reduz a matriz de 36 para 21 coeficientes elásticos, como a análise é desenvolvida considerando ortotropia, ou seja, há dois planos de simetria de propriedades no material havendo necessariamente simetria em relação ao terceiro, implica que o número de constantes é reduzido para 9 coeficientes elásticos na matriz (AL-QURESHI,2002).

Assim a relação tensão-deformação pode ser representada da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & Q_{44} & 0 & 0 \\ & & & & Q_{55} & 0 \\ & & & & & Q_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

(21)

Os termos Q_{ij} não nulos são diretamente relacionados com as constantes elásticas E_{ij} , ν_{ij} e G_{ij} da seguinte forma:

$$Q_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta};$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta};$$

$$\begin{aligned}
Q_{13} &= \frac{v_{31} + v_{21}v_{32}}{E_2 E_3 \Delta}; \\
Q_{22} &= \frac{1 - v_{13}v_{31}}{E_1 E_3 \Delta}; \\
Q_{23} &= \frac{v_{32} + v_{12}v_{31}}{E_1 E_3 \Delta}; \\
Q_{33} &= \frac{1 - v_{12}v_{21}}{E_1 E_2}; \\
Q_{44} &= G_{23}; \\
Q_{55} &= G_{31}; \\
Q_{66} &= G_{12}.
\end{aligned} \tag{22}$$

Onde:

$$\Delta = \frac{1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - v_{31}v_{13} - 2v_{21}v_{32}v_{13}}{E_1 E_2 E_3} \tag{23}$$

Adicionalmente pode-se verificar que com $i, j = 1, 2, 3$ tem-se que:

$$\frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j} \tag{24}$$

3.1.2 Relação Tensão-deformação Para Materiais Ortotrópicos no Estado Plano de Tensão.

Considerando-se uma lâmina reforçada com fibras unidirecionais, tratada como material ortotrópico, cujos planos de simetria do material são paralelos e transversais à direção das fibras. Para situações onde a espessura do material é bem menor em relação às outras dimensões, situação que representa a maioria dos trabalhos desenvolvidos empregando-se material compósito, o estudo é feito para uma lâmina, levando-se em consideração estado plano de tensão segundo a seguinte hipóteses (AL-QURESHI,2002):

$$\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0 \tag{25}$$

Reduzindo a matriz de flexibilidade de modo a formar as seguintes relações tensão-deformação (HAZIM):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \tag{26}$$

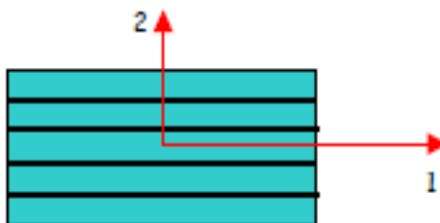
Sendo que os elementos da matriz de rigidez reduzida Q_{ij} são dados como (AL-QURESHI,2002):

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{E_1^2}{E_1-\nu_{12}^2 E_2} \\
 Q_{12} = Q_{21} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_1E_2}{E_1-\nu_{12}^2 E_2} \\
 Q_{22} &= \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{E_1E_2}{E_1-\nu_{12}^2 E_2} \\
 Q_{66} &= G_{12}
 \end{aligned} \tag{27}$$

3.1.3 Transformação das Componentes de Tensão-deformação

As propriedades mecânicas das lâminas são quase sempre fornecidas em valores tomando-se como referência as direções principais das mesmas denominadas de 1-2, conforme indicado na figura 13, assim ao definir-se um sentido global x-y para o laminado teremos as várias lâminas formando um ângulo θ com as direções principais 1-2 tornando interessante assim conhecer as propriedades da lâmina nesse sistema de modo a obter as propriedades do laminado.

Figura 13 - Orientação local



Fonte: PEREIRA (2005)

A relação que expressa as tensões nas coordenadas 1-2 em termos das tensões nas coordenadas x-y é dada abaixo e recebe o nome de matriz de transformação denominada por $[T]$ (AL-QURESHI,2002):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

Podendo as mesmas relações ser aplicadas para obtenção das componentes de deformação:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

Onde:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (30)$$

A relação tensão-deformação em x-y pode ser então ser manipulada de modo que resulte em:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1}[Q][T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

Para que a uniformidade da relação $[\sigma]=[Q][\varepsilon]$ a matriz $[\bar{Q}]$, que é similar a $[Q]$, será definida em termos das deformações de modo a obter-se as tensões na lâminas quando orientadas de maneira arbitrária.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (32)$$

Sendo $[\bar{Q}]$, chamada de matriz de rigidez reduzida transformada, onde os elementos \bar{Q}_{ij} são dados pelas equações abaixo:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= U_1 + U_2\cos(2\theta) + U_3\cos(4\theta) \\ \bar{Q}_{12} &= U_4 - U_3\cos(4\theta) \\ \bar{Q}_{22} &= U_1 - U_2\cos(2\theta) + U_3\cos(4\theta) \\ \bar{Q}_{16} &= \frac{-1}{2}U_2\sin(2\theta) - U_3\sin(4\theta) \\ \bar{Q}_{26} &= \frac{-1}{2}U_2\sin(2\theta) + U_3\sin(4\theta) \\ \bar{Q}_{66} &= U_5 - U_3\cos(4\theta) \end{aligned} \quad (33)$$

Onde:

$$U_1 = \frac{1}{8}(3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66})$$

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \frac{1}{2}(Q_{11} - Q_{22}) \\
 U_3 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 4Q_{66}) \\
 U_4 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66}) \\
 U_5 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66})
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

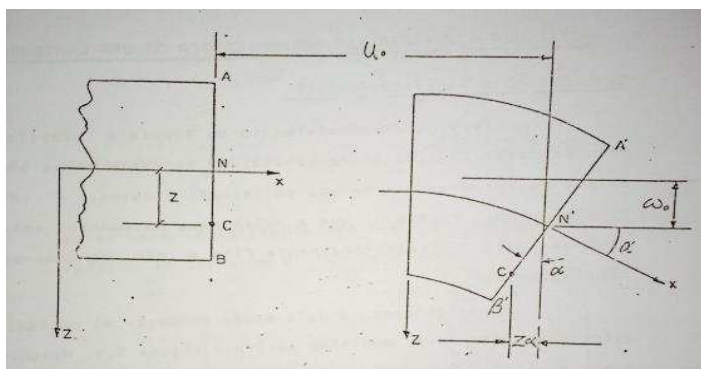
3.1.4 Análise Macromecânica de um Laminado

Para o desenvolvimento da relação tensão-deformação de um laminado é admitido as seguintes hipóteses (AL-QURESHI,2002):

- ✓ Perfeita ligação entre as lâminas;
- ✓ Não existe escorregamento de uma em relação à outra;
- ✓ A matriz que permanece entre as lâminas seja infinitesimalmente fina e não deformável por cisalhamento;

A figura a seguir representa a deformação da seção de um laminado delgado no plano x-y, assumindo-se que a linha ANB originalmente reta e perpendicular à superfície média permaneça nessa mesma situação após o mesmo sofrer deformação mantendo o comprimento. Esta é uma das principais hipóteses estabelecidas pela teoria clássica de laminados.

Figura 14 - Geometria de deformação no plano x-z.



Fonte: (AL-QURESHI,2002).

Nos quais os deslocamentos podem ser expressos por:

$$u = u^0 - z \frac{\partial w^0}{\partial x} \quad (35)$$

$$v = v^0 - z \frac{\partial w^0}{\partial y} \quad (36)$$

Definindo $\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u^0}{\partial x}$, $-k_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ e $\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_x$ onde $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \varepsilon_{xy}^0$ representam as deformações do plano médio e k_x, k_y e k_{xy} as curvaturas do laminado. Pode-se então representar as deformações da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (37)$$

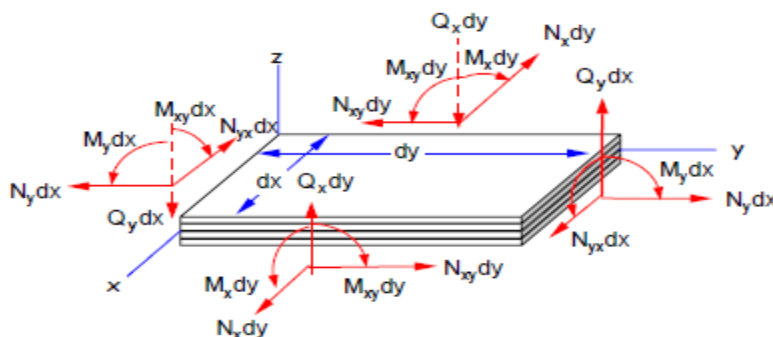
De forma compacta:

$$[\varepsilon] = [\varepsilon^0] + z[k] \quad (38)$$

3.1.5 Equação Constitutiva do Laminado

As equações constitutivas podem ser obtidas relacionado as forças e momentos resultantes que agem no laminado com as deformações no plano médio e curvaturas. Estas forças e momentos podem ser obtidos através da integração das correspondentes tensões pela espessura do laminado (t), sabendo que a distribuição de tensão varia a cada camada ao longo da espessura (AL-QURESHI,2002).

Figura 15 - Esforços internos em um elemento de placa



FONTE: PEREIRA (2005)

Considerando-se um laminado constituído de n lâminas ortotrópicas, a contribuição de cada lamina k para formar a força e o momento resultante atuando no plano médio do laminado é dado por (AL-QURESHI,2002):

$$[N] = \left[\sum_{k=1}^n ([\bar{Q}_{ij}]_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} dz) \right] [\varepsilon^0] + \left[\sum_{k=1}^n ([\bar{Q}_{ij}]_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} z dz) \right] [K] \quad (39)$$

$$[M] = \left[\sum_{k=1}^n ([\bar{Q}_{ij}]_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} z dz) \right] [\varepsilon^0] + \left[\sum_{k=1}^n ([\bar{Q}_{ij}]_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} z^2 dz) \right] [K] \quad (40)$$

Como $[\bar{Q}]$, é função apenas do ângulo θ (relacionando o eixo de coordenadas globais com o eixo de coordenadas locais), e da matriz $[\bar{Q}]$, (que por sua vez depende somente das propriedades mecânicas dos constituintes da lâmina) a matriz $[\bar{Q}]$, é uma constante na integração. Também percebe-se que a deformação no plano médio e a curvatura se mantem constantes para cada lâmina, também sendo constante na integração, assim simplificando as equações (AL-QURESHI,2002). Com o intuito de facilitar a interpretação das equações introduziu-se o conceito de três novas matrizes, denominadas por $[A]$, $[B]$ e $[D]$, de modo que:

$$[N] = [A][\varepsilon^0] + [B][k] \quad (41)$$

$$[M] = [B][\varepsilon^0] + [D][k] \quad (42)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} [A_{ij}] &= \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (t_k - t_{k-1}) \\ [B_{ij}] &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (t_k^2 - t_{k-1}^2) \\ [D_{ij}] &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (t_k^3 - t_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (43)$$

As equações 41 e 42 reunidas permitem uma melhor visualização das equações constitutivas do laminado, como apresentado a seguir:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A|B \\ B|D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} \quad (44)$$

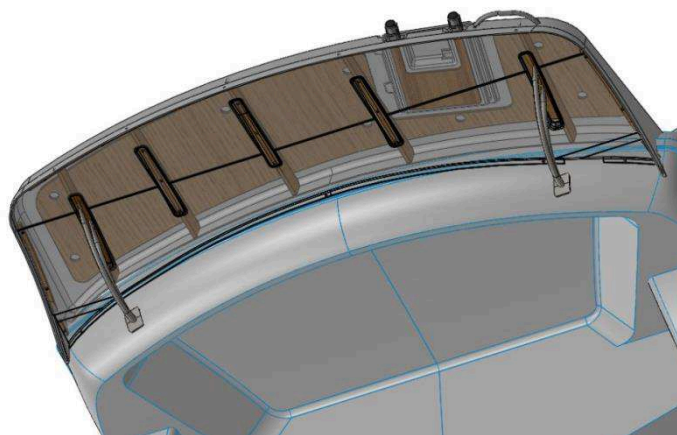
A matriz $[B]$ chamada de matriz de acoplamento aparece nas duas equações é responsável por estabelecer ligação entre força e momento resultantes com curvatura $[k]$ e deformações $[\varepsilon^0]$ respectivamente. Isto implica que as forças normais N_x, N_y e a força cisalhante N_{xy} agindo no plano médio do laminado resultam não apenas em deformações extensionais ε^0 e cisalhantes γ_{xy} , mas ainda em flexão e torção produzindo as curvaturas k_x, k_y e k_{xy} respectivamente, do mesmo modo os momentos fletores M_x e M_y e do torçor M_{xy} provocam deformações no plano médio além das curvaturas (AL-QURESHI,2002).

4 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido consiste na aplicação do método de elementos finitos, tomando como ponto de partida a necessidade do estaleiro Fibrafort em conhecer as limitações do projeto da plataforma de popa do modelo de embarcação Focker 320 GT, onde se pretende buscar melhora do desempenho estrutural, em termos dos esforços máximos suportados pela estrutura, rigidez e o peso final da peça.

A partir da análise da geometria atual da plataforma, foram aplicados conceitos da Teoria Clássica de laminados e teorias de elasticidade da mecânica dos sólidos para avaliação de estruturas sanduiche. A partir deste embasamento, pôde-se sugerir um plano de laminação alternativo que atenda aos requisitos e melhore o desempenho estrutural.

Figura 16 - Plataforma de popa *Focker 320 GT*



Fonte: Disponível em: <http://www.fibrafort.com.br/>

O software de elementos finitos utilizado para o modelamento numérico do problema foi o *Abaqus/CAE Student Edition 6.12-2*, disponível no site da fabricante *Dassault Systèmes Simulia Corp.*

Os elementos utilizados no *Abaqus* foram os de casca (SHELL) e de viga (BEAM), que apresentam 6 graus de liberdade por nó, sendo 3 para translação e 3

para rotação. Esta estratégia adotou uma simplificação da geometria da placa laminada, pois foi empregada apenas a sua superfície média.

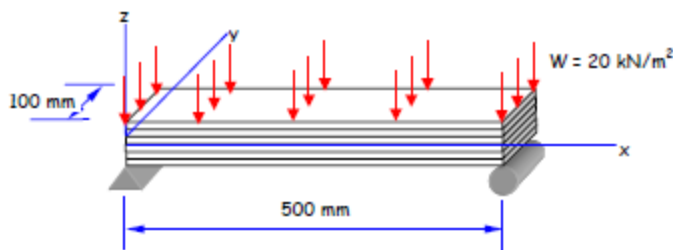
O custo computacional em relação a um modelo numérico com elementos sólidos é menor e permite atingirmos os objetivos desejados no contexto deste trabalho: determinação da distribuição das tensões em cada camada do laminado e compreensão dos fatores de influência diversos (tais como o posicionamento das camadas, a orientação do material, o posicionamento do núcleo) na cinemática da deformação.

4.1 Validação do Modelo

Para a validação do modelo foram realizados os cálculos analíticos, equações constitutivas do laminado, já apresentadas anteriormente, e o modelamento no software *Abaqus*. Referenciou-se em um problema de um laminado simétrico sujeito a esforços de flexão proposto pelo professor José Carlos Pereira no livro “Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compósitos”, assim podemos comparar os resultados.

O Problema considera um laminado simétrico $(0^\circ/-45^\circ/+45^\circ)_s$ em kevlar/epóxi com espessura de 0,5 mm para cada lâmina. Considerando carregamento uniforme de $W = 20 \text{ kN/m}^2$ e $E_1 = 76,0 \text{ GPa}$, $E_2 = 5,5 \text{ GPa}$, $G_{12} = 2,0 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0,35$.

Figura 17 - Problema proposto para validação do método

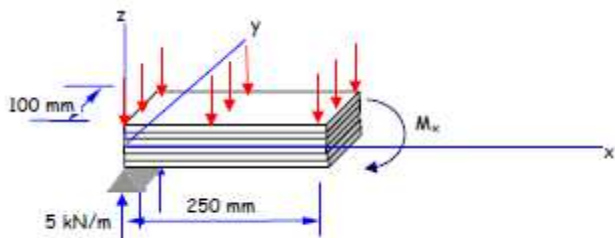


Fonte: PEREIRA (2005)

Considerando que o carregamento W pode ser substituído por uma força distribuída em $x=250 \text{ mm}$ de intensidade 10 kN/m , as reações nos apoios são iguais e

de intensidade 5 kN/m. Assim o momento máximo situado em $x=250$ mm pode ser obtido impondo equilíbrio estático com relação aos momentos em torno do eixo Y como mostra a figura 19:

Figura 18 - Impondo equilíbrio estático



FONTE: PEREIRA (2005)

Assim:

$$M_x = -5000 \times 150 + 5000 \times 250 = 0 \quad (45)$$

$$M_x = -625 \text{ Nmm/mm}$$

Portanto o comportamento do laminado pode ser modelado pelo seguinte sistema:

$$\begin{cases} N_X = 0 \\ N_Y = 0 \\ N_{XY} = 0 \\ M_X = -625 \\ M_Y = 0 \\ M_{XY} = 0 \end{cases} = \begin{bmatrix} 123,7 & 41,00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 41,00 & 52,64 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 41,17 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 137,1 & 16,09 & 8,89 \\ 0 & 0 & 0 & 16,09 & 24,48 & 8,89 \\ 0 & 0 & 0 & 8,89 & 8,9 & 16,22 \end{bmatrix} \times \begin{cases} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{cases} \times 10^3 \quad (46)$$

Observa-se que o segundo e o terceiro quadrantes da matriz constitutiva correspondem à matriz [B], chamada de matriz de acoplamento pois relaciona as forças normais e os momentos com eventuais curvaturas e deformações lineares respectivamente. O fato de o laminado ser simétrico, as forças normais só resultam em deformações lineares e os momentos resultam somente em curvaturas.

Resolvendo o sistema de equações as deformações e curvaturas resultam em:

$$\varepsilon_x^0 = \varepsilon_y^0 = \gamma_{xy}^0 = 0, k_x = -0,00497, k_y = 0,00284, k_{xy} = 0,00116 \quad (47)$$

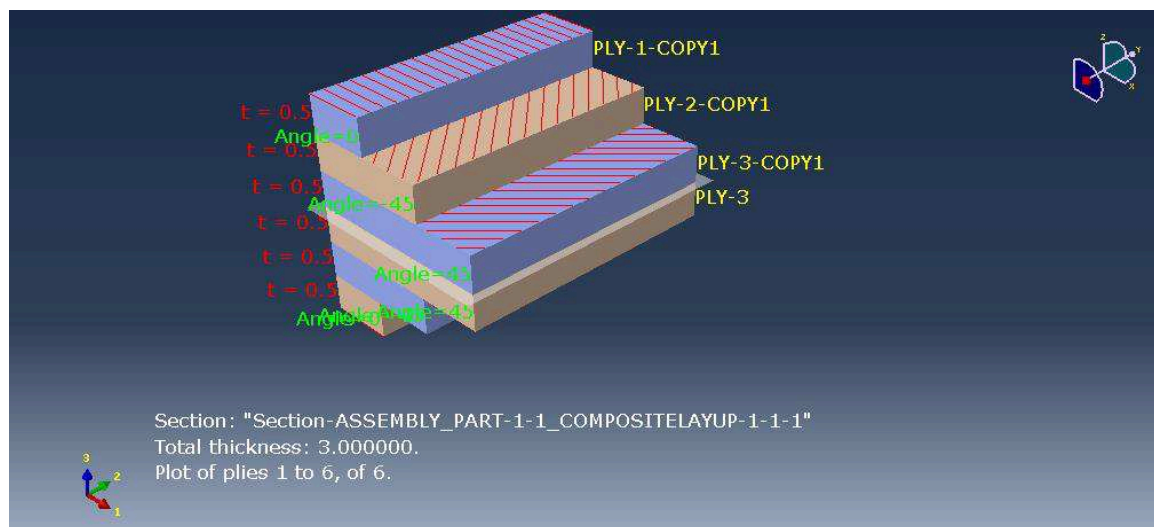
Para a primeira lâmina do laminado, com orientação 0° localizada na superfície:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 76,7 & 1,94 & 0 \\ 1,94 & 5,55 & 0 \\ 0 & 0 & 2,0 \end{bmatrix} \times 10^3 \begin{Bmatrix} 0,0 + 1,5 \times -4,97 \\ 0,0 + 1,5 \times 2,84 \\ 0,0 + 1,5 \times 1,16 \end{Bmatrix} \times 10^{-3} \quad (48)$$

$$\sigma_x = -563,53 \text{MPa} \quad (49)$$

Ao construir o modelo numérico no *Abaqus*, foram utilizados como dados do material os mesmos descritos acima no problema: $E_1 = 76,0 \text{GPa}$, $E_2 = 5,5 \text{GPa}$, $G_{12} = 2,0 \text{GPa}$, $\nu_{12} = 0,35$. O tipo de elemento utilizado foi o de casca (SHELL) de geometria quadrilateral quadráticos de oito nós, podendo assim representar melhor o gradiente de tensão ao longo da superfície, com uma quantidade final de 85 nós ou 104 elementos.

Figura 19 - Plot da ordenação das lâminas

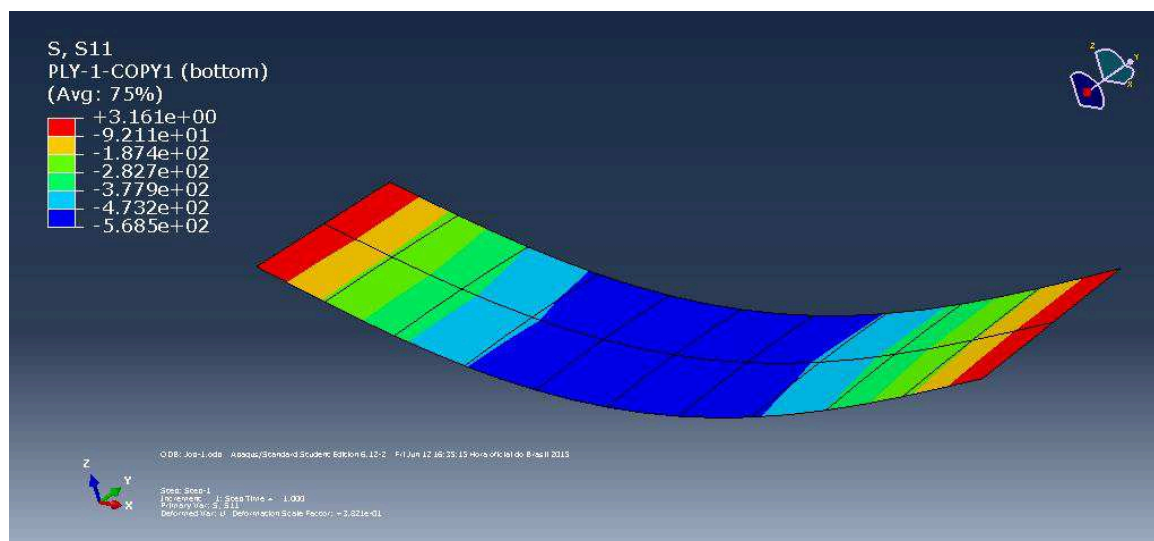


Fonte: Produzido pelo autor

Foram aplicadas restrições em um dos lados quanto ao movimento axial nos três graus de liberdade, porém mantendo o giro livre (condição de contorno referente ao apoio fixo) e no outro extremo foi travado o movimento axial no sentido transversal e

perpendicular mantendo o movimento axial longitudinal livre (condição de contorno referente ao rolete). Por fim foi aplicada uma distribuição de pressão uniforme no valor de 20 kN/m². Os resultados são mostrados abaixo:

Figura 20 - Plot das tensões na direção principal da primeira lâmina



Fonte: Produzido pelo autor

Analisando o resultado de tensão máxima para a primeira camada do laminado (orientada a 0°), obteve-se um valor de tensão compressiva de 568,5 MPa. Segue abaixo uma tabela com a comparação dos resultados onde percebe-se que a diferença entre os métodos é menor que 1%, podendo ser atribuída devido ao arredondamento dos cálculos manuais. Com esta comparação podemos validar a adoção do software para modelamento de laminas compósitas por casca (SHELL).

Tabela 1 - Comparativo dos resultados

	Resultado	Diferença
Analítico	563,53 MPa	-
Abaqus	568,5 MPa	0,887%

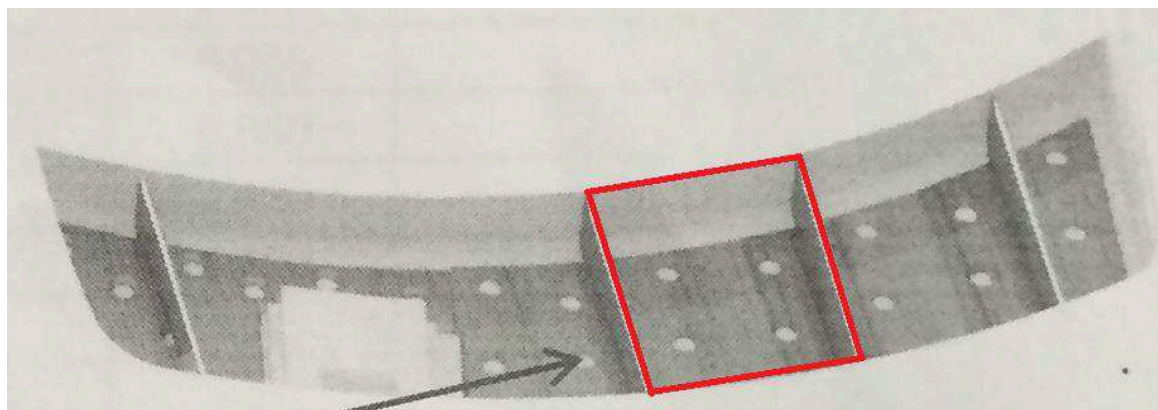
Fonte: Produzido pelo autor

4.2 Resolução do Problema

Para o modelamento da plataforma de popa da Focker 320, foram realizadas algumas simplificações a ponto de facilitar o modelamento e diminuir os custos computacionais. Além disso, o planejamento de testes, incluindo os virtuais, deve ser baseado numa metodologia sequencial, em que a os aprendizados são adquiridos inicialmente em modelos simples.

O projeto existente consiste em um laminado sanduíche sustentado por reforçadores longitudinais na face inferior do laminado (figura 21). Nota-se que não há necessidade de modelar a plataforma como um todo, portanto foi modelada apenas uma seção entre dois reforçadores, de modo que os resultados possam ser projetados para o restante da plataforma.

Figura 21 - Vista inferior da plataforma



Fonte: Disponível em: <http://www.fibrafort.com.br/>

4.2.1 Modelamento Computacional

Como demonstrado, pode-se modelar o laminado como uma casca deformável tridimensional, introduzindo elementos de viga nas extremidades laterais da casca. Estes reforçadores longitudinais da plataforma devem ser considerados para garantir a fidelidade do problema.

O projeto atual da plataforma apresenta um plano de laminação com 6 camadas de manta de fibra de vidro tipo E com 450 g/m^2 , duas camadas de tecido de fibra de vidro tipo E com trama biaxial orientadas a -45° e $+45^\circ$ contendo 800 g/m^2 , compensado naval de 10 milímetros de espessura utilizado como material de núcleo (colocado na posição horizontal entre camadas de laminação) e compensado naval de 18 milímetros como reforço longitudinal (colocado na posição vertical), sendo o empilhamento demonstrado na figura 22.

Sendo necessário no modelamento de lâminas do *Abaqus* informar uma direção de fibra, caracterizaremos o tecido biaxial de 800 g/m^2 como dois tecidos unidirecionais de 400 g/m^2 sobrepostos.

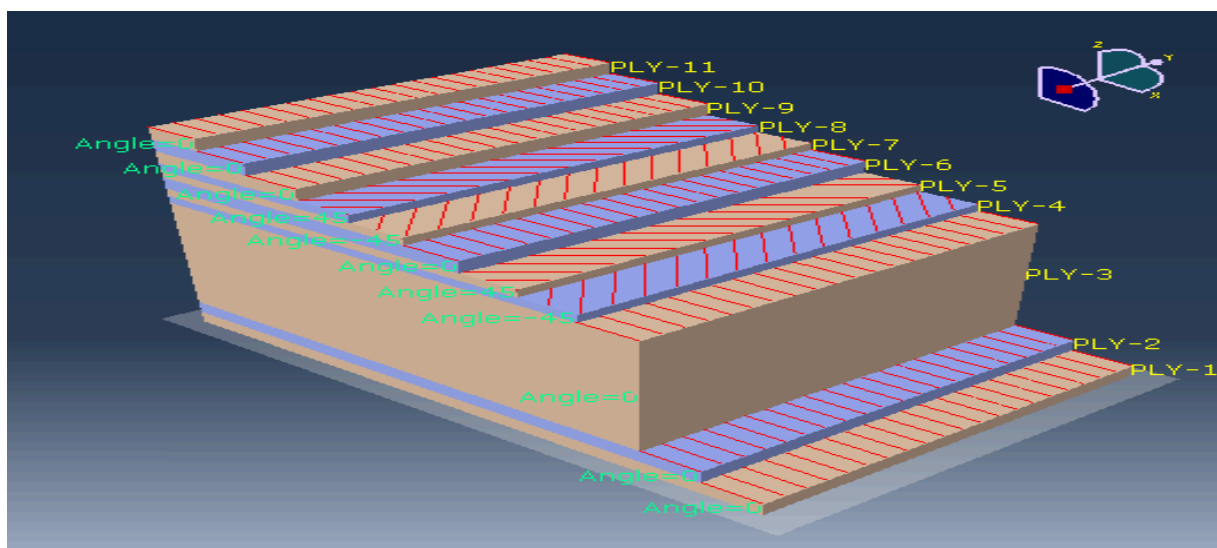
Empilhamento das camadas:

Figura 22 - empilhamento do plano de laminação atual

	Layer Label	Angle(deg)	Th(mm)
1	M450	0,00	1,05
2	M450	0,00	1,05
3	Compensado naval	0,00	10,00
4	T400	-45,00	0,66
5	T400	45,00	0,66
6	M450	0,00	1,05
7	T400	-45,00	0,66
8	T400	45,00	0,66
9	M450	0,00	1,05
10	M450	0,00	1,05
11	M450	0,00	1,05

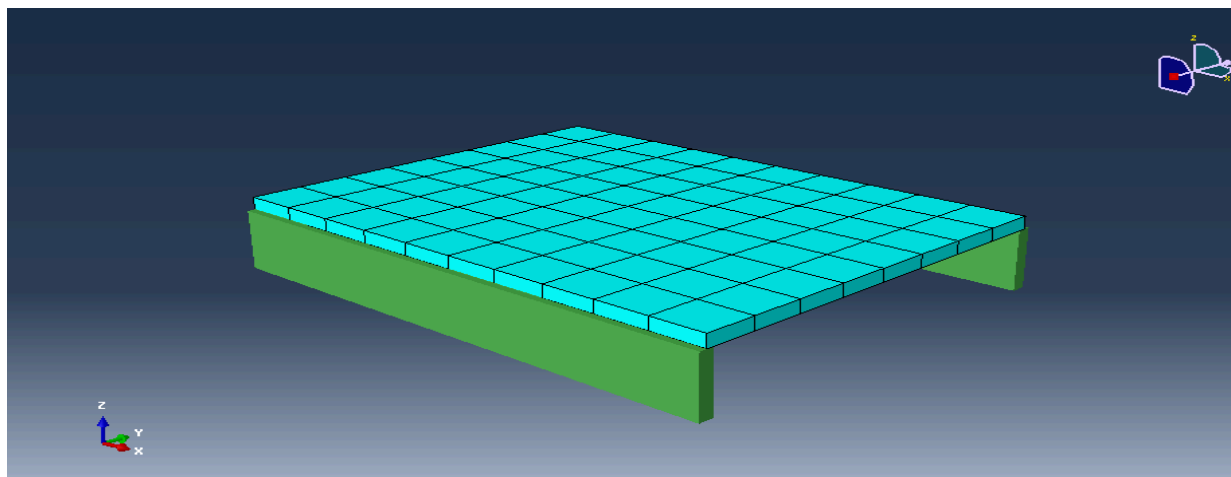
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 23 - Empilhamento do laminado



Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 24 - Modelo adotado, considerando a renderização tridimensional dos elementos.



Fonte: Produzido pelo Autor

4.2.2 Propriedades dos Materiais

As propriedades dos materiais citados foram obtidas com o auxílio do programa ComosIT fornecido gratuitamente por meio do site da sociedade classificadora *Bureau*

Veritas, que fornece valores de referência para alguns tipos de resina e fibra, e a partir da teoria da micromecânica pode-se obter as propriedades das lâminas.

Para isso deve-se indicar qual a resina utilizada, podendo ser dos tipos polyester, vinylica ou epoxy, qual o tipo de vidro contido na manta e no tecido, podendo ser fibras de vidro tipo E, R, fibra de carbono aramida. Outro fator influente na propriedade mecânica do laminado é o teor de vidro, já comentado na revisão bibliográfica, o teor de vidro contido no laminado é principalmente influenciado pelo tipo de processo de fabricação utilizado como spray-up, laminação manual, laminação a vácuo, infusão, RTM entre outros.

A Fibrafort utiliza o método de laminação manual para laminar tanto casco e convés quanto peças constituintes do barco como é o caso da plataforma de popa, para este tipo de processo considera-se um teor de vidro de 30% para a manta e 40% para o tecido, esta diferença acontece por conta da manta, por ser constituída de fibras curtas unidas por um ligante, necessita de mais resina para ser molhada a ponto de facilitar a extração das bolhas de ar que por ventura estejam sob as camadas.

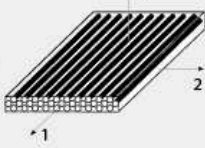
Com isso chega-se às seguintes propriedades mecânicas dos materiais:

Figura 25 - Propriedades mecânicas Manta 450 g/m²

MAT INDIVIDUAL LAYER INPUT			
INPUT		MECHANICAL CHARACTERISTICS	
Label:	M450	Thickness:	1,050 mm
Fibre:	E Glass	Density:	1,428
Resin:	Polyester	Elastic Coefficients	
Percentage of fibre:	30,00 % given in: Mass	E1:	8.316 Mpa
Mass/m ² of fibre (Pf):	450,00 g/m ²	E2:	8.316 Mpa
Mass/m ² of resin:	1.050,00 g/m ²	Nu12:	0,300
Mass/m ² total:	1.500,00 g/m ²	Nu21:	0,300
		G12:	3.199 Mpa
		G13:	1.156 Mpa
		G23:	1.156 Mpa
		Breaking Stresses	
		Sig1 T:	103 Mpa
		Sig1 C:	103 Mpa
		Sig2 T:	103 Mpa
		Sig2 C:	103 Mpa
		Tau12:	51,18 Mpa
		Tau1L1:	19,89 Mpa
		Tau1L2:	19,89 Mpa

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 26 - Propriedades mecânica tecido unidirecional 400 g/m²

UNIDIRECTIONAL INDIVIDUAL LAYER INPUT			
INPUT			
Label:	T400		
Fibre:	E Glass		
Resin:	Polyester		
Percentage of fibre:	40,00 % given in: Mass		
Mass/m2 of fibre (Pf):	400,00 g/m2		
Mass/m2 of resin:	600,00 g/m2		
Mass/m2 total:	1.000,00 g/m2		
			
MECHANICAL CHARACTERISTICS			
Thickness:	0,656 mm	Density:	1,525
Elastic Coefficients		Breaking Stresses	
E1:	20.060 Mpa	Sig1 T:	433 Mpa
E2:	4.790 Mpa	Sig1 C:	289 Mpa
Nu12:	0,312	Sig2 T:	16 Mpa
Nu21:	0,074	Sig2 C:	59 Mpa
G12:	1.888 Mpa	Tau12:	27,19 Mpa
G13:	1.888 Mpa	TauL1:	26,44 Mpa
G23:	1.322 Mpa	TauL2:	27,19 Mpa

Fonte: Produzido pelo Autor

O compensado analisado separadamente também é um material composto, pois é constituído por lâminas de madeira unidas por cola, sendo assim as propriedades elásticas são diretamente dependentes do material que o compõem e seu comportamento é regido pela mesma teoria da macromecânica utilizada neste trabalho.

Devido a dificuldades para a obtenção das propriedades mecânicas do compensado naval utilizado pela empresa, foi consultado o artigo “Determinação de propriedades elásticas e de resistência em compensados de *Pinus elliottii*” publicado por Hernando Alfonso Lara Palma. Neste trabalho, são apresentados dados de ensaios de flexão com placas de 10 mm de espessura, cujos resultados são apresentados na figura 27.

Os reforçadores por serem modelados como elementos de viga devem ser caracterizados como material isotrópico (restrição do Abaqus) e possuem um sentido de deflexão preferencial (longitudinal) utilizou-se como aproximação o módulo de elasticidade paralelo às fibras.

Já a placa de compensado utilizada como material de núcleo irá defletir em mais de um sentido. Na prática não há durante o processo de fabricação uma indicação clara quanto ao posicionamento da placa, podendo ser fabricada com alinhamento longitudinal ou transversal. Assim, foi empregado o valor do módulo de elasticidade obtido perpendicular às fibras, sendo este menor que o obtido paralelo às fibras, estaremos sendo conservadores quando aos resultados.

Figura 27 – Resultados em MPa obtido experimentalmente por Hernando A. L. Palma

Repetição	MÓDULO DE ELASTICIDADE MOE		MÓDULO DE RUPTURA MOR	
	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
	E_{xT}	E_{yT}	F_{rl}	F_{rt}
E1A	5248,9	1944,5	61,4	31,2
E1B	3940,7	1479,2	51,2	22,6
E1C	3120,7	1105,0	38,8	17,4
E2A	6445,6	2089,2	61,6	30,3
E2B	4980,1	1653,5	49,8	26,5
E2C	3589,3	1341,1	38,9	20,7
E3A	11204,5	3466,3	88,2	42,4
E3B	8509,8	2765,1	68,5	34,9
E3C	5771,0	1896,8	49,6	25,4
E4A	8686,7	3089,5	68,5	38,3
E4B	6353,5	2030,4	50,4	27,4
E4C	5792,8	2105,1	46,7	24,5
E5A	6799,4	2601,6	57,5	34,0
E5B	7622,5	2169,3	68,7	32,4
E5C	4686,9	1743,1	51,5	24,8
E6A	9175,6	2485,2	71,3	31,8
E6B	7222,9	2163,8	53,8	26,5
E6C	6059,2	1876,9	46,8	24,2
Média	6400,6	2154,2	56,9	28,6
S	2095,7	753,7	12,6	6,3
CV	32,7	35,0	22,2	22,2

Fonte: PALMA (1997)

Resumindo as propriedades inseridas no Abaqus na tabela abaixo:

Tabela 2 - Propriedades das lâminas (coordenadas locais)

	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
M450	8.316	8.316	0,300	3.190	1.156	1.156
T400	20.060	4.790	0,312	1.888	1.888	1.322

Fonte: Produzido pelo Autor

Tabela 3 - Propriedades do compensado naval.

	E (MPa)	ν_{12}
Compensado Naval	2.154,2	0,1

Fonte: Produzido pelo Autor

4.2.3 Condições de Contorno e Carregamento

A plataforma de popa da Focker 320 GT é fixada na embarcação por meio de adesivo estrutural juntamente com parafusos de reforço além de alças de inox que garantem a rigidez da estrutura, havendo um modelo semelhante, Focker 305 GT que também possui plataforma de popa acoplada e não possui estas alças.

Na tentativa de retirá-las do produto, não serão incluídas na análise, buscando definir qual a sua importância e se necessário compensar esta retirada com uma sugestão de alteração do plano de laminação, reduzindo o custo do produto e facilitando a montagem da peça.

A fixação garante à plataforma uma condição de engaste, que pode ser modelada por meio da restrição do deslocamento nos três graus de liberdade de translação ($U_x = U_y = U_z = 0$) e nos três graus de liberdade de rotação ($UR_x = UR_y = UR_z = 0$).

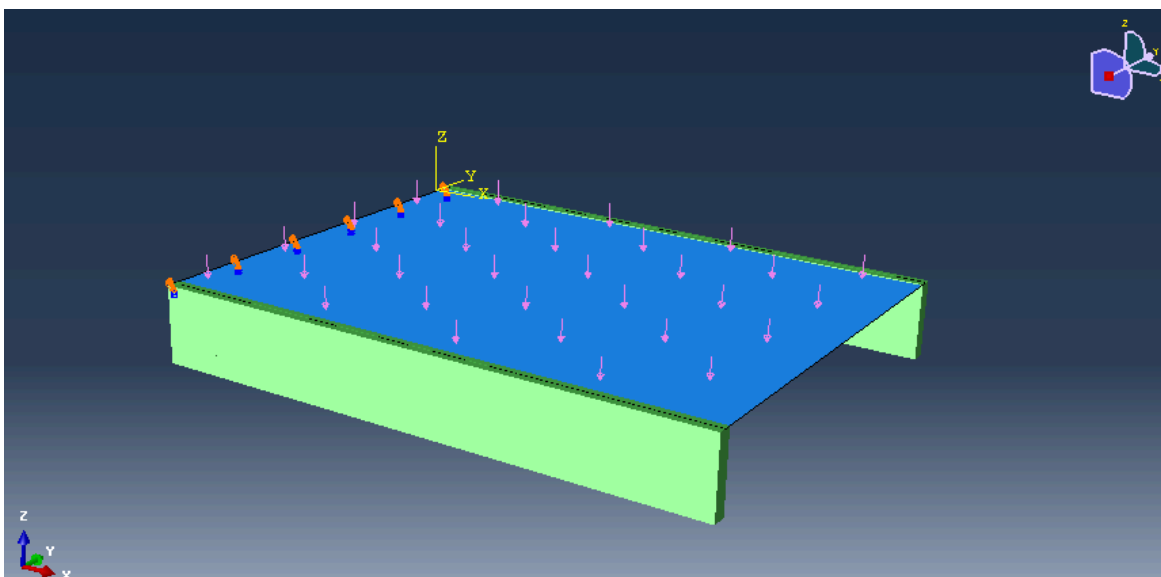
A empresa ao fazer o projeto da plataforma estipulou que a mesma deveria resistir a uma carga de 5000 kg, o que em seu entendimento representava 6 pessoas adultas, ou aproximadamente 4.905 N de força, porém sem descrever detalhadamente o tipo de carregamento. Se a plataforma apresentar uma área útil de 1,5 m², o carregamento mecânico equivalente pode ser representado como uma pressão no valor de 3,27 kPa.

Além disso, com o intuito de melhorar a descrição do carregamento a ser adotado na simulação buscou-se alguma auxílio a norma “NR500 – *Rules for the Classification and the Certification of Yachts*” da entidade classificadora Bureau Veritas que em seu capítulo 4, seção 4 parte B, sugere cálculos para a determinação de valores mínimos que as regiões de deck devem resistir, sendo a plataforma de popa considerada como parte do *deck*. Por meio da norma entende-se que no caso da Foker

320 GT a região de *deck* deve resistir a uma pressão mínima e uniformemente distribuída de 5kN/m² ou 5kPa

Comparando as duas abordagens, percebe-se que a Bureau Veritas traz um valor de pressão mínimo quase 53% maior que o estipulado pela empresa, desta forma optou-se por simular com o carregamento sugerido pela norma uma vez que atendendo a ela, a consideração de carregamento da empresa estará garantida.

Figura 28 - Condições de contorno e carregamento



Fonte: Produzido pelo Autor

4.2.4 Critérios de Aceitação

Para a aprovação da peça, o componente deve atender aos requisitos estipulados pela ABNT NBR 14574 – Embarcações de recreio em plástico reforçado com fibra de vidro – Requisitos para construção a qual se obteve acesso à cópia adquirida pelo estaleiro Fibrafort.

Sendo considerado como critério de avaliação a tensão máxima desenvolvida nas direções principais em cada lâmina e a deflexão máxima do laminado, que devem obedecer as seguinte relações:

$$\sigma_N \leq 0,3\sigma_U \quad (50)$$

$$\frac{w}{b} \leq 1 \quad (51)$$

Sendo:

- σ_N a tensão normal em cada uma das direções principais e σ_U a tensão de ruptura da lâmina.
- w a deflexão máxima da placa em mm e b a menor dimensão da placa no plano.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

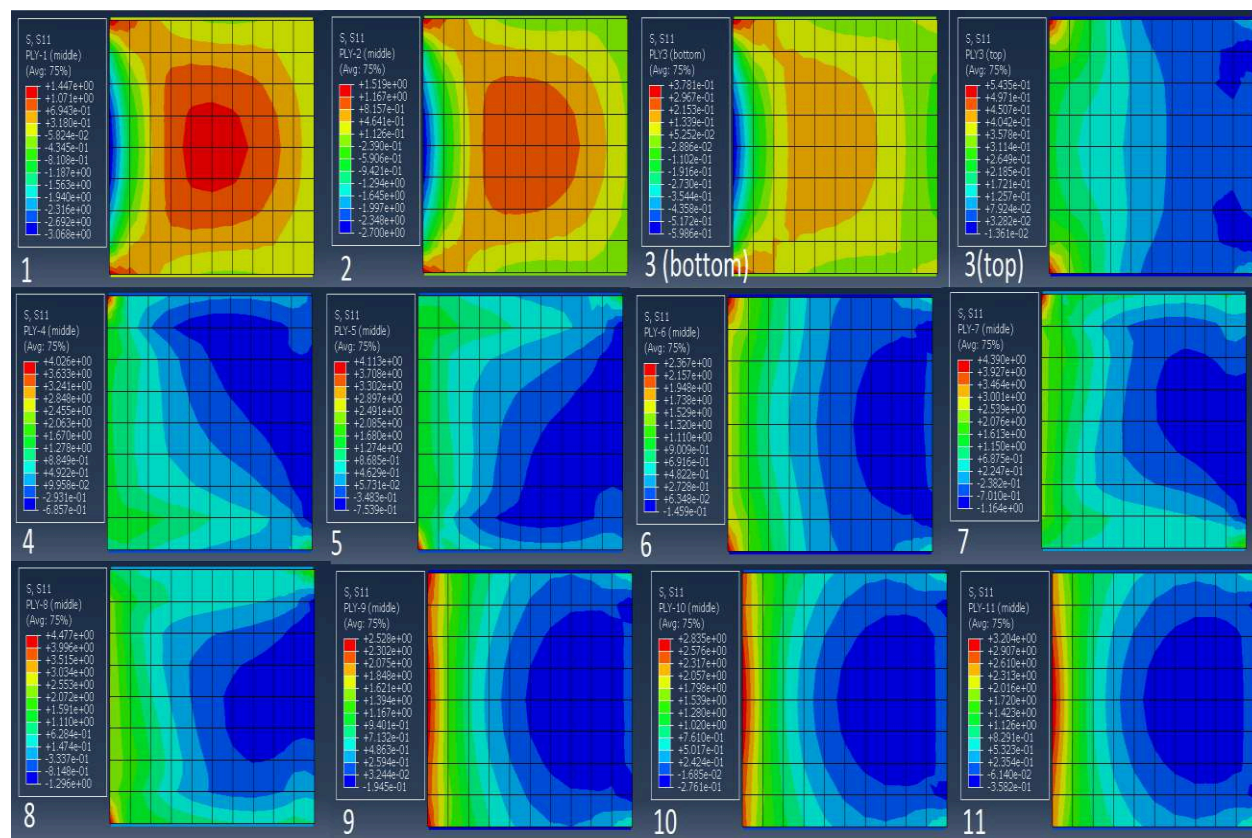
Os resultados foram apresentados em duas partes: primeiramente foi analisado o plano de laminação atual da empresa, verificando se os critérios de aceitação estipulados no trabalho foram aceitos, e caso fosse necessário seria apresentado um plano alternativo para que estes critérios sejam aceitos.

5.1 Resultado do Plano de Laminação Atual

Primeiro foi analisado as tensões em cada camada nas direções preferenciais 1 e 2 para verificar se alguma delas ultrapassou a tensão de ruptura, caracterizando assim falha por ruptura do material.

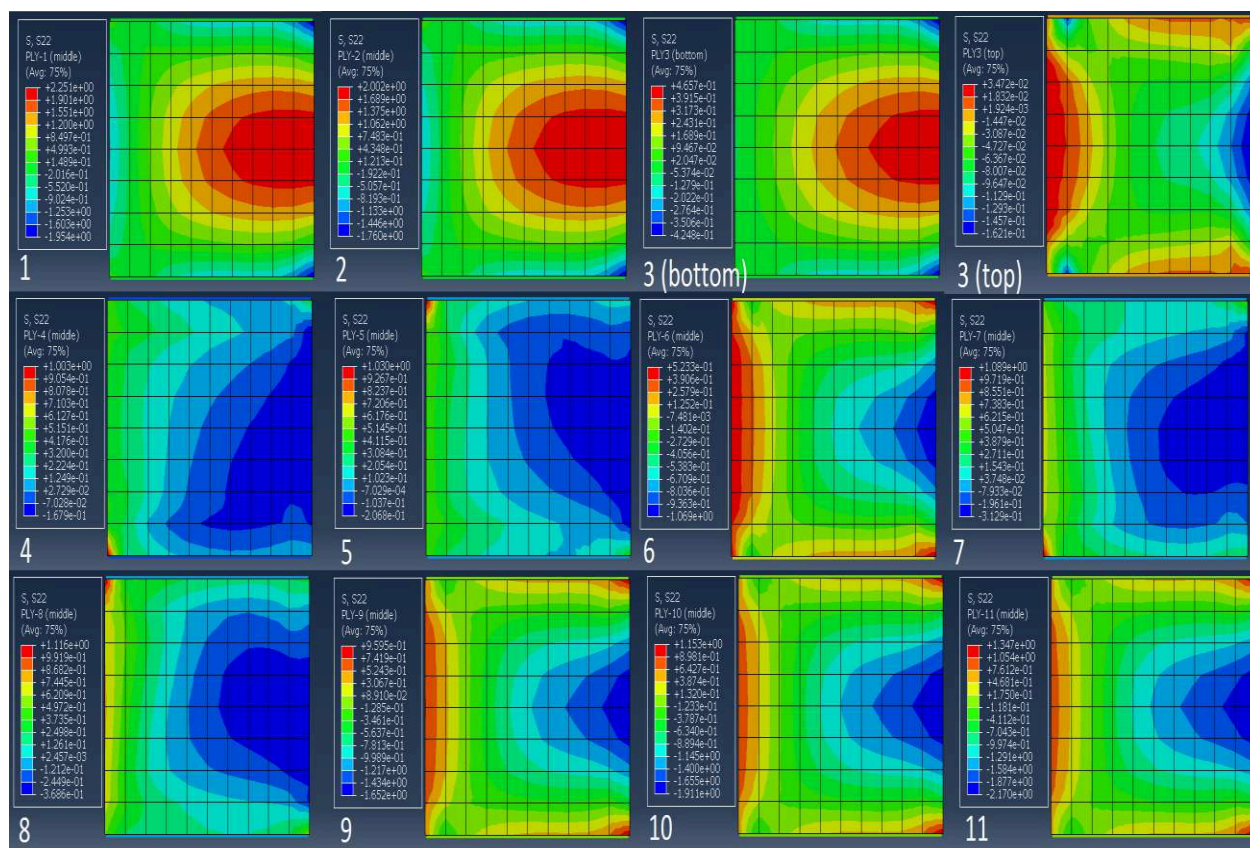
No eixo de coordenadas locais, direção 1 e 2 obtivemos os seguintes *plots* de tensões:

Figura 29 - *Plot* de tensão na direção x para cada camada.



Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 30 - Plot de tensão na direção y para cada camada.



Fonte: Produzido pelo Autor

Foram consideradas as tensões somente na região de deflexão do laminado, excluindo as regiões de contorno do modelo, já que por conta das considerações quanto às restrições de movimento não representarem fielmente o que acontece na prática, assim pode haver distorção do valor apresentado nestes pontos.

Pode-se observar pelos *plots* de tensão que na região do núcleo acontece a transição na tensão de tração para compressão, isto ocorre pela linha neutra da seção transversal passar pela região do núcleo, sendo que neste caso as tensões abaixo da linha neutra de tração e acima de compressão. Além disso, conforme a distância em relação à linha neutra, a tensão aumenta em módulo para o mesmo material, conforme previsto na revisão bibliográfica.

Segue uma tabela com os valores máximos encontrados em cada camada, o núcleo é colocado duas vezes, pois como sua espessura é considerável e a linha

neutra passa por ele, apresentando uma parcela na face superior e outra na face inferior em sentidos contrários.

Tabela 4 - Comparativo de tensões.

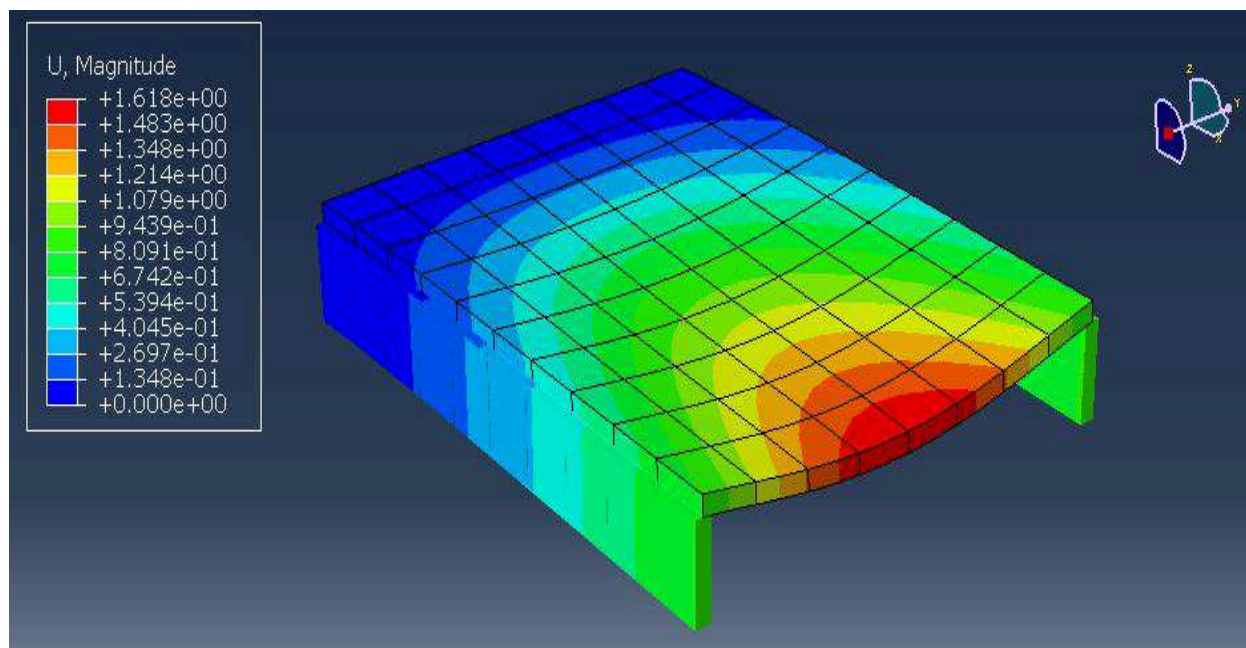
	σ_1 (MPa)	σ_{u1} (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{u2} (MPa)
Ply 1 (M450)	+1,447 e00	+103	+2,251 e00	+103
Ply 2 (M450)	+1,167 e00	+103	+2,002 e00	+103
Ply 3 (Compensado Naval)	+2,153 e-01	+28,6	+4,657 e-01	+28,6
Ply 3 (Compensado Naval)	-1,361 e-02	-28,6	-1,621 e-01	-28,6
Ply 4 (T400; -45)	-6,857 e-01	-289	-1,679 e-01	-59
Ply 5 (T400; +45)	-7,539 e-01	-289	-2,068 e-01	-59
Ply 6 (M450)	-1,459 e-01	-103	-1,069 e00	-103
Ply 7 (T400; -45)	-1,164 e00	-289	-3,129 e-01	-59
Ply 8 (T400; +45)	-1,296 e00	-289	-3,686 e-01	-59
Ply 9 (M450)	-1,945 e-01	-103	-1,652 e00	-103
Ply 10 (M450)	-2,761 e-01	-103	-1,911 e00	-103
Ply 11 (M450)	-3,582 e-01	-103	-2,170 e00	-103

Fonte: Produzido pelo Autor

Conclui-se então que a ruptura do material está descartada para o caso estudado, sendo os valores de tensão encontrados nas camadas são inferiores ao valor de tensão de ruptura.

Considerando então o critério de aceitação em termos de rigidez, que faz referência à magnitude da deflexão máxima em relação ao espaçamento entre reforçadores (menor dimensão da placa no plano). Os cálculos realizados indicam que para um espaçamento de 500 mm, o valor de deflexão máxima é de 5 mm.

Com base no *plot* de deslocamentos do caso simulado, figura 31, observa-se uma deflexão máxima de 1,618mm, aprovando a peça em relação aos critérios estipulados.

Figura 31 - *Plot* da magnitude de deflexão

Fonte: Produzido pelo Autor

5.2 Resultado do Plano de Laminação Proposto

Para propor um plano de laminação alternativo, tomou-se cuidado em relação à viabilidade de implementação das mudanças, levando-se em consideração que qualquer alteração de material ou processo poderia causar complicações de operação que poderiam impedir sua implementação. Também foi levado em consideração que a sugestão de materiais de alto desempenho que possuem um alto valor de mercado tornaria essa proposta inviável.

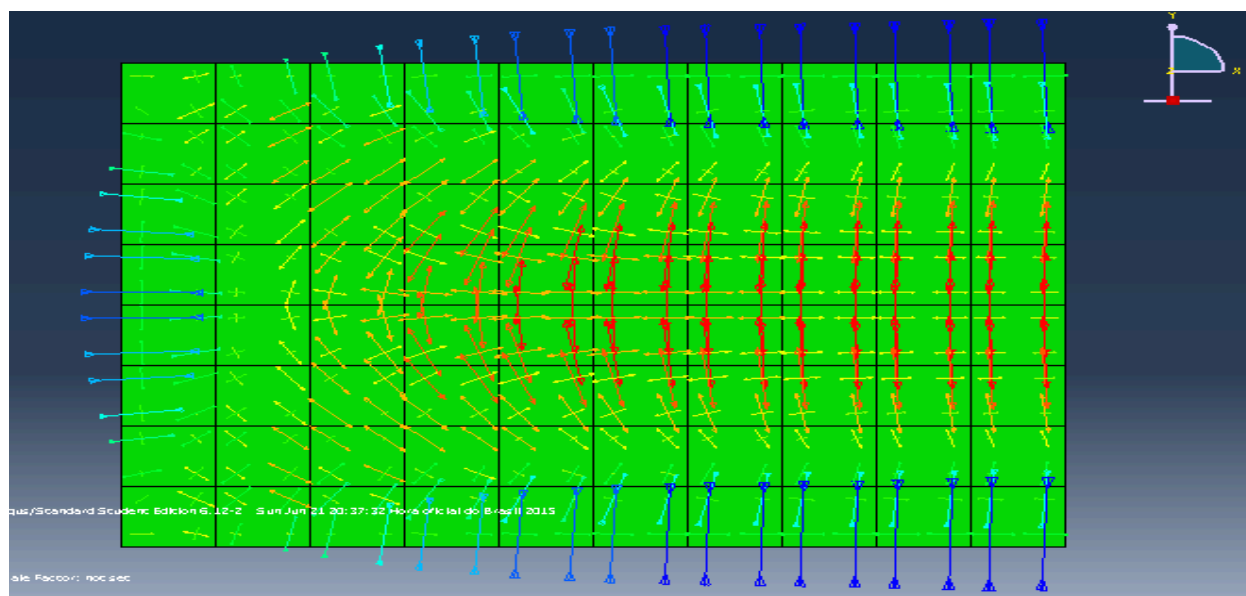
Primeiro foram discutido quais eram os fatores de influência e como agir de forma certa utilizando as teorias estudadas. De acordo com a teoria de estrutura sanduiche o núcleo deve ser posicionado no centro do laminado com o intuito de manter as lâminas das faces igualmente espaçadas, distribuindo de forma uniforme as tensões entre as duas faces. Além disso, as tensões normais geradas devido ao momento fletor atuante tende a valores mais reduzidos conforme a proximidade em

relação ao eixo neutro. Desse modo, os esforços mecânicos sobre o material do núcleo são minimizados.

Neste caso especificamente em que a flexão ocorre apenas para um sentido (para baixo), os maiores esforços trativos estarão localizados junto à face inferior da placa, o que pode ser comprovado pelos *plots* de tensões no laminado atual (figuras 29 e 30). Assim, as lâminas de tecido que possuem uma maior resistência a tração, deveriam estar posicionadas abaixo do núcleo e nas camadas mais inferiores, pois quanto mais afastada da linha neutra, maior influência da lâmina na resistência final. Outro ponto relevante é a espessura do núcleo, sabendo que esta dimensão é relevante ao cubo quanto à rigidez da estrutura.

Em relação à orientação das fibras, pode ser útil o *plot* dos vetores de tensão em uma lâmina, como na figura 32 onde se pode observar que na região central da lâmina, região onde ocorre a maior deflexão e conseqüentemente localizam-se os maiores valores de tensão, o *plot* nos mostra um sentido preferencial de esforços paralelo ao eixo y, lembrando que a maior resistência do tecido se dá na direção da fibra, assim pode-se concluir que um tecido biaxial orientado a 0° e 90° é mais indicado, alinhando assim as fibras na direção dos esforços.

Figura 32- *Plot* dos vetores de tensão.



Fonte: Produzido pelo Autor

Embasado nos comentários feitos sugere-se primeiramente a troca de orientação do tecido biaxial de $-45^{\circ}/+45^{\circ}$ para um tecido de mesma gramatura, porém com orientação das fibras a $0^{\circ}/90^{\circ}$, com o intuito de alinhar as fibras com a direção dos esforços, melhorando a resposta do laminado.

Pela teoria de flexão em vigas e comprovado pela análise do caso atual, percebe-se que a medida que se afasta do eixo neutro da seção transversal, afasta-se do centro, os esforços vão crescendo, portanto sugere-se que uma camada de tecido seja passada para o lado inferior do laminado fazendo com que o tecido realmente atuem onde possui melhor rendimento, resistindo aos esforços de tração abaixo do núcleo.

Propõem-se assim a retirada de material, 4 camadas de manta e a diminuição da espessura do núcleo de 10 para 6 milímetros assim além de reduzir drasticamente o peso da peça, consegue também uma redução de custo referente tanto a matéria prima quanto mão de obra já que com a redução de 5 camadas o processo de laminação deve reduzir também o tempo de produção da peça.

Tendo em vista que a área total da plataforma tem $1,5 \text{ m}^2$, e considerando a densidade do compensado naval como sendo 600 kg/m^3 (obtido de catálogos da internet) assim a redução de peso proveniente da diminuição da espessura do núcleo é de aproximadamente $3,6 \text{ kg}$ e considerando para cada camada de manta um teor de vidro de 30% obtendo uma redução de 9 kg . Já quanto à retirada de uma camada de tecido, teor de vidro de 40%, uma redução de 3 kg totalizando uma redução de peso de 50%, ganho maior que o esperado.

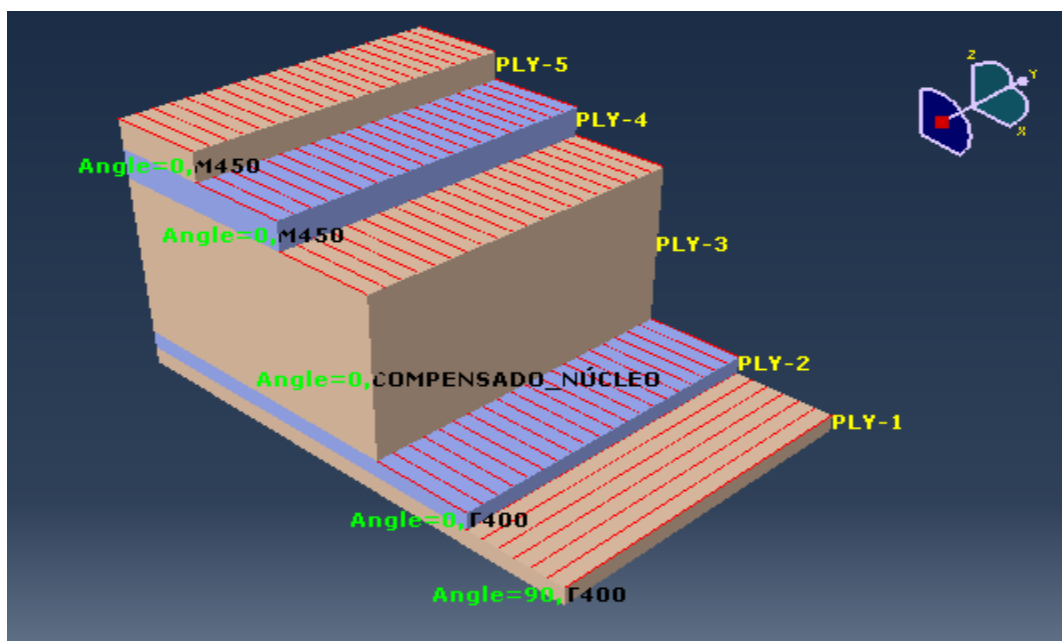
Assim sugerimos o seguinte plano de laminação:

Figura 33 - Empilhamento do plano de laminação proposto (Composit)

	Layer Label	Angle(deg)	Th(mm)
1	T400	90,00	0,66
2	T400	0,00	0,66
3	Compensado Naval	0,00	6,00
4	M450	0,00	0,74
5	M450	0,00	0,74

Fonte: Produzido pelo Autor

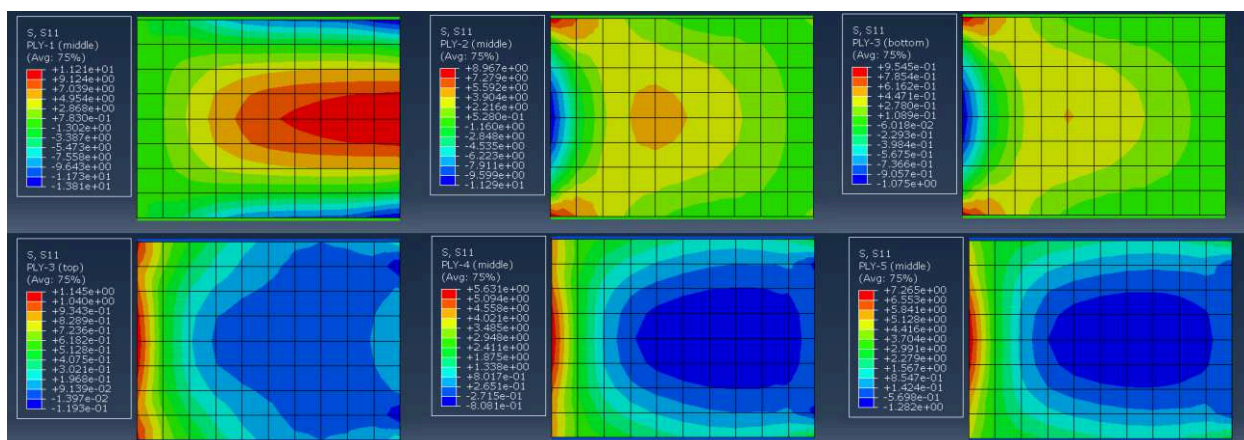
Figura 34 - Empilhamento do plano de laminação sugerido (Abaqus)



Fonte: Produzido pelo Autor

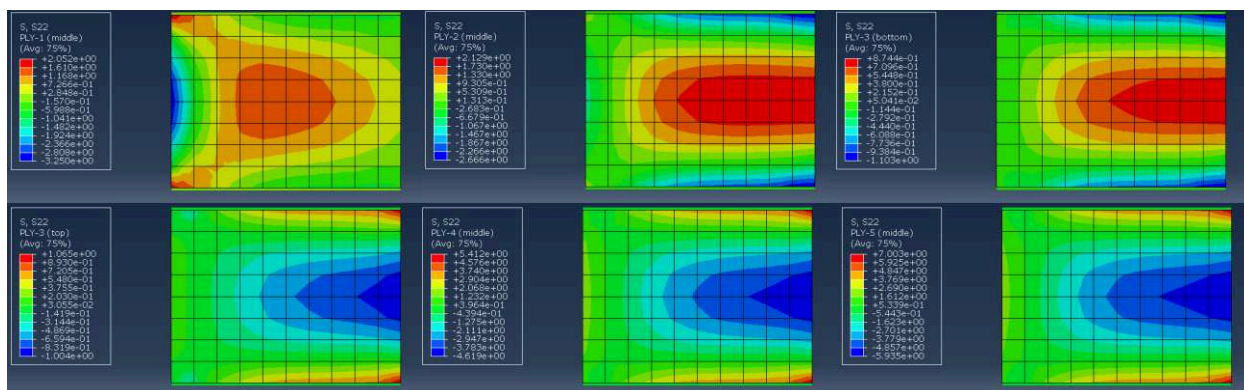
Repetindo a análise já realizada para o plano de laminação atual, foram verificados os *plots* de tensão e a comparação dos valores em cada camada nas direções preferenciais 1 e 2 (coordenadas locais) comparando com a tensão de ruptura:

Figura 35 - *Plot* de tensão na direção 1 para cada camada.



Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 36 - Plot de tensão na direção 2 para cada camada.



Fonte: Produzido pelo Autor

Tabela 5 - Comparativo de tensões

	σ_1 (MPa)	σ_{u1} (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{u2} (MPa)
Ply 1 (T400; 90)	+1,121 e01	+433	+2,052 e00	+16
Ply 2 (T400; 0)	+8,967 e00	+433	+2,129 e00	+16
Ply 3 (Compensado Naval)	+9,545 e-01	+28,6	+8,744 e-01	+28,6
Ply 3 (Compensado Naval)	-1,193 e-01	-28,6	-1,004 e00	-28,6
Ply 6 (M450)	-8,081 e-01	-103	-4,619 e00	-103
Ply 7 (M450)	-1,282 e00	-103	- 5,935 e00	-103

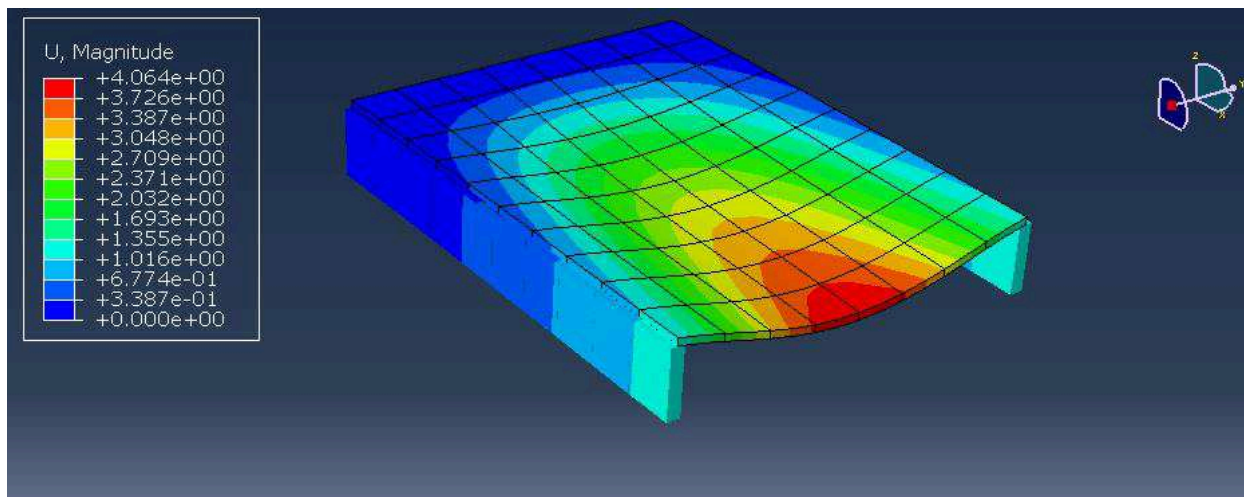
Fonte: Produzido pelo Autor

Novamente os resultados de tensão apresentaram-se abaixo dos limites de ruptura dos materiais descartando este modo de falha, nota-se também que dentre os materiais utilizados quem mais influencia na resistência global da peça é a face inferior do laminado, absorvendo a maior parte da tensão, como é comum em uma estrutura sanduíche, já que o núcleo tem a função de espaçar as faces aumentando o momento de inércia da peça.

Buscando a melhor relação de rigidez por peso, sendo esta a real finalidade das estruturas sanduíche, poderão ser utilizados materiais de mais baixa densidade, direcionando os esforços principais para as faces do laminado, porém isto traria um aumento de custo, devido ao conhecido alto valor destes materiais de núcleo, e faria com que a implementação do plano sugerido se tornasse inviável, por este motivo procurou-se trabalhar com o mesmos material já utilizado.

Ao analisar a deflexão máxima da estrutura (figura 37) observou-se que a peça atende aos critérios definidos, deformando apenas 4,064 mm assim aprovando as alterações no plano de laminação.

Figura 37 – *Plot* da magnitude de deflexão



Fonte: Produzido pelo Autor

Tabela 6: Comparação do Plano de Laminação

	Atual	Proposto	Varição
Peso estimado do laminado.	31 kg	15,5 kg	- 50 %
Fator de segurança (x)	71,2	30	- 58 %
Fator de segurança (y)	45,75	7,5	- 84 %
Deflexão máxima	1,618 mm	4,064 mm	+ 250 %

Fonte: Produzido pelo Autor

Na tabela 6 pode-se comparar os resultados obtidos, dando ênfase à redução percentual com relação ao peso onde obteve-se uma melhora significativa, lembrando que se for feito testes práticos, os valores encontrados podem não ser exatamente os mesmo devido às estimativas das propriedades dos materiais utilizados divergindo quantitativamente, porém como foram utilizadas as mesmas estimativas na proposta, qualitativamente houve progresso.

A avaliação de um projeto por meio de ferramenta computacional traz redução de custo e tempo de projeto, direcionando os testes práticos apenas para confirmação dos resultados obtidos numericamente, evitando repetições desnecessárias.

Aliando as teorias de método de elementos finitos e mecânica dos sólidos com a estratégia de modelamento numérico e escolha de elementos, afim de obter um baixo custo computacional mantendo a qualidade da resposta, desta forma a simulação numérica pode contribuir para o projeto estrutural de componentes. Por fim, o estudo permitiu aprendizado sobre o produto, facilitando o projeto de novos componentes.

6 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A análise estrutural de elementos compósitos não é uma tarefa trivial, tendo em vista os equacionamentos descritos pela teoria clássica de laminados. A utilização do método de elementos finitos, como uma ferramenta computacional para a solução de problemas de engenharia, exige o entendimento dos procedimentos de cálculo para que o usuário consiga concretizar a correta interpretação dos fenômenos físicos envolvidos.

Este conhecimento permite ao usuário a aplicação de algumas hipóteses simplificadoras, que se acertadas podem diminuir muito o custo computacional da análise numérica. Caso contrário, o próprio analista pode interferir no resultado e direcionar o projeto de forma equivocada.

Analisando o plano de laminação da plataforma de popa da Focker 320 GT percebeu-se que, quando submetida ao carregamento estipulado por norma, não foram identificados riscos de falha por ruptura dos materiais que a compõem nem com relação ao critério de falha de rigidez à flexão, porém os deslocamentos verticais e tensões nos materiais estão muito abaixo das indicadas, nos apontando um possível superdimensionamento, nos indicando a possibilidade de realizar alteração no plano de laminação.

Foi avaliada proposta de redução da espessura do núcleo de 10 para 6 mm, podendo retirar ainda 5 camadas de manta desnecessárias do ponto de vista estrutural, resultando em um plano que continua atendendo aos critérios estipulados e ainda uma redução de 15,5 kg no peso final.

Esta modificação também afeta positivamente na cadeia produtiva do produto, tendo em vista que esta diminuição da quantidade de camadas a ser laminadas também reduzirá o tempo de produção da peça.

Portanto, a compreensão das variáveis de projeto que influenciam o comportamento mecânico de uma estrutura em material compósito permitiu a proposição de uma solução de engenharia para atender aos critérios de aceitação do produto, resultando em uma peça estruturalmente mais rígida e com um peso total menor, em relação ao projeto inicial.

A validação dos resultados considerou que os materiais utilizados devem ser submetidos a ensaios para confirmação das propriedades mecânicas calculadas e assim agregando confiabilidade aos resultados finais.

Para futuros desenvolvimentos, propôs-se o estudo referente aos tipos de fixação da plataforma na embarcação, avaliando a possibilidade de utilização de adesivos estruturais na substituição dos parafusos atualmente empregados. Deste modo, poder-se-á evitar a necessidade de realizar furos no casco, que comprometem a sua integridade. Também sugere-se um estudo quanto à viabilidade econômica da substituição do material de núcleo para a obtenção de reduções de massa significativas.

REFERENCIAS

AL-QURESHI, H. A. **Composite Materials: Fabrication and Analysis**. 3. Ed. São José dos Campos. SP. Ita-GPA, 2002.

BERTINI, Alexandre Araújo. **Análise do Comportamento à Flexão de Painéis Sanduíche com Faces de Argamassa Armada e Núcleo de Espuma Rígida de Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CALLISTER JR., William D. Introdução. In: William D. Callister Jr.. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Salt Lake City: Wiley, 1999. p. 1 - 5.

FATOS e NÚMEROS. **Revista Náutica Brasileira**. Fórum Náutico Brasileiro, SABRAE e SANTANDER. 2012.

FRIDTJOV Irgens. **Continuum Mechanics**. Springer. 2008

NASSEH, Jorge. **Barcos: Métodos Avançados de Construção em Composites**. [s.n.] Rio de Janeiro: Divisão de Engenharia e Marketing da empresa Barracuda Advanced Composites, 2007.

NASSEH, Jorge. **Manual de Construção de Barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Divisão de Engenharia e Marketing da empresa Barracuda Advanced Composites, 2011.

NASSEH, Jorge. **Técnica e Prática de Laminação em Composites**. [s.n.] Rio de Janeiro: Divisão de Engenharia e Marketing da empresa Barracuda Advanced Composites, 2008.

PALMA, Hernando Alfonso Lara. Determinação de propriedades elásticas e de resistência em compensados de *Pinus elliottii*. **Scientia Florestalis**, São Paulo, n.51, p. 37-48, jun. 1997.

PEREIRA, José Carlos. **Curso de Projeto estrutural com Materiais Compostos**. [s.n.] Florianópolis: Departamento de engenharia mecânica – UFSC, 2005.

SILVA, Humberto Sartori Pompeo da. **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Carauá e Híbridos com Fibras de Vidro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SABRAE. Construção Naval. Disponível em:
<<http://arquivopdf.sebrae.com.br/uf/amazonas/sebrae>> Acesso em: 20/06/2015.

MANUAL da CONSTRUÇÃO. Disponível em:
< <http://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/?p=152>>Acesso em: 20/06/2015.

FABRICAÇÃO de COMPÓSITOS. Disponível em:
< <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Materiais-Comp%C3%B3sitos-Processo-De-Obtencao>> Acesso em: 20/06/2015.

SLIDEPALYER. Imagem. Disponível em: < Slideplayer.com.br> Acesso em: 20/06/2015.

FIBROFORT. Disponível em:< [www. Fibrofort.co.br](http://www.Fibrofort.co.br)> Acesso em: 20/06/2015.