

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LETÍCIA REGINA MENEGON

CATAMARÃS DE ALUMÍNIO: TECNOLOGIA, APLICAÇÕES E DESAFIOS

JOINVILLE
2024

LETÍCIA REGINA MENEGON

CATAMARÃS DE ALUMÍNIO: TECNOLOGIA, APLICAÇÕES E DESAFIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Menegon, Letícia Regina
CATAMARÃS DE ALUMÍNIO: TECNOLOGIA, APLICAÇÕES E DESAFIOS
/ Letícia Regina Menegon ; orientador, Thiago Pontin
Tancredi, 2024.
70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Catamarãs em Alumínio. 3.
Catamarã. 4. Ligas de Alumínio. 5. Littoral Combat Ship. I.
Tancredi, Thiago Pontin . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

LETÍCIA REGINA MENEGON

CATAMARÃS DE ALUMÍNIO: TECNOLOGIA, APLICAÇÕES E DESAFIOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 02 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador/ Presidente

Dra. Viviane Lilian Soethe
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a deus por ter me dado a oportunidade de chegar onde estou.

Aos meus pais, Adriana e Gilmar, e ao meu irmão Gabriel por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu esposo Maicon, que tornou o período na universidade mais leve e esteve comigo em todos os momentos.

Aos meus avós, Elena e Lírio, que sempre me apoiaram e estiveram comigo, sem vocês isso não seria possível.

A minha prima Viviane, sem o apoio dela não estaria aqui, a minha tia Beloni e prima Raiza por serem minha segunda casa.

Ao meu professor e orientador Thiago Pontin, por toda a paciência e ensinamentos passados durante a graduação. A professora Viviane por nos incentivar sempre.

A todos os meus professores, amigos e familiares que estiveram presentes em minha vida e tornaram esse momento possível.

“A educação é o grande motor do desenvolvimento pessoal. É através dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que um filho de trabalhadores rurais pode chegar a presidente de uma grande nação.”

Nelson Mandela

RESUMO

Catamarãs construídos em alumínio têm se tornado uma escolha popular no transporte marítimo devido a sua eficiência, durabilidade e capacidade de operar em diversas condições. Neste trabalho são apresentadas as considerações básicas sobre a resistência ao avanço, a estabilidade e o projeto estrutural desse tipo de embarcação, bem como são descritos os materiais mais utilizados em sua construção, dando especial destaque para a eventual utilização do alumínio. O objetivo é mitigar a lacuna encontrada na literatura sobre discussões amplas e assertivas acerca do uso do alumínio na construção de catamarãs oceânicos, mencionando alguns campos de atuação nos quais as embarcações monocasco não podem ser utilizadas. Entre outros trabalhos utilizados como referência, é apresentado o caso da embarcação multicasco militar Littoral Combat Ship, que oferece insights valiosos sobre a utilização do alumínio da fabricação de embarcações multicasco oceânicas. Com essa pesquisa, inferiu-se que a construção em alumínio, embora possua algumas vantagens, apresenta limitações associadas à soldagem e ao controle da fadiga estrutural.

Palavras-chave: Catamarã, Catamarã em Alumínio, Alumínio Naval, Ligas de Alumínio, Littoral Combat Ship.

ABSTRACT

Catamarans constructed from aluminum have become a popular choice in maritime transport due to their efficiency, durability, and ability to operate in various conditions. This paper presents the basic considerations regarding drag, stability, and structural design of this type of vessel, as well as describes the most commonly used materials in their construction, with a special focus on the potential use of aluminum. The objective is to address the gap found in the literature regarding comprehensive and assertive discussions about the use of aluminum in the construction of oceanic catamarans, mentioning some fields of application where monohull vessels cannot be used. Among other referenced works, the case of the military multihull vessel Littoral Combat Ship is presented, offering valuable insights into the use of aluminum in the manufacture of oceanic multihull vessels. This research infers that, although aluminum construction has some advantages, it presents limitations related to welding and control of structural fatigue.

Keywords: Catamaran, Aluminum Catamaran, Marine Aluminum, Aluminum Alloys, Littoral Combat Ship.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Marinheiros polinésios em uma canoa multicasco, em 1781	15
Figura 2 Estabilidade Catamarã em comparação com Monocasco	18
Figura 3 Roll Catamarã comparado com Monocasco.....	19
Figura 4 Estabilidade Inicial de um Catamarã	20
Figura 5 Formato casco Wigley	22
Figura 6 Parte Estrutural Casco Catamarã.....	23
Figura 7 Materiais e processos utilizados na construção Naval	26
Figura 8 Gráfico de propriedades os materiais para seleção.....	27
Figura 9 Diagrama de Ashby Relacionando Tenacidade à Fratura x Resistência	28
Figura 10 Diagrama Módulo de Young x Densidade	29
Figura 11 Módulo de Elasticidade x Resistência	30
Figura 12 Rigidez Específica x Resistência Específica	31
Figura 13 Mapa Resistência x Custo relativo	32
Figura 14 Moldes de um casco Blubay 72.....	34
Figura 15 Catamarã a Vela em Fibra de Carbono	35
Figura 16 Construção Catamarã em Madeira	36
Figura 17 Construção casco em alumínio	40
Figura 18 Catamaran The Beast	45
Figura 19 Catamarã de Travessia (JAUME III).....	46
Figura 20 Catamarã MV Offshore Guardian.....	47
Figura 21 High Speed Support Vessel	48
Figura 22 Catamarã IMUA	49
Figura 23 Catamarã para aquicultura.....	50
Figura 24 Diagrama Pourbaix Alumínio.....	52
Figura 25 Esquema processo de soldagem MIG/MAG.....	54
Figura 26 Soldagem Estrutura Casco	55
Figura 27 Solda Realizada Estrutura Alumínio	55
Figura 28 Principais pontos de surgimento de trincas no Alumínio.....	56
Figura 29 LCS Independence	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades Mecânicas Fibra de Vidro	33
Tabela 2	Propriedades Mecânicas Fibra de Carbono.....	35
Tabela 3	Propriedades Mecânicas da Madeira Balsa.....	36
Tabela 4	Indicação Numérica das ligas de alumínio	37
Tabela 5	Influencia Elementos de Liga	38
Tabela 6	Propriedades Mecânicas Aço A36.....	41
Tabela 7	Propriedades Físicas Alumínio x Aço A36.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACOBAR	Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus implementos
LCB	Longitudinal Center of Buoyancy
LCG	Longitudinal Center of Gravity
ABS	American Bureal Ship
DNV	Det Norske Veritas
AA	Aluminium Association
ABAL	Associação Brasileita Alumínio
LCS	Littoral Combat Ship

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA	14
2. HISTORIA E EVOLUÇÃO	15
2.1 CATAMARÃS	15
2.2 ALUMÍNIO NA CONSTRUÇÃO DE CATAMARÃS	16
3. FUNDAMENTOS DE PROJETO	18
3.1 PRINCÍPIOS DE PROJETO.....	18
3.2 ESTABILIDADE E FLUTUAÇÃO.....	19
3.3 RESISTENCIA AO AVANÇO	21
3.4 PROJETO ESTRUTURAL.....	23
4. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ENGENHARIA	25
4.1 DIAGRAMA DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	26
4.2 SELEÇÃO DE MATERIAS PARA CATAMARÃS	32
5. MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONSTRUÇÃO	33
5.1 FIBRA DE VIDRO	33
5.2 COMPOSITOS AVANÇADOS.....	34
5.3 MADEIRA	36
5.4 ALUMÍNIO	37
5.5 AÇO CARBONO	41
5.6 VANTAGENS DO ALUMÍNIO NA CONSTRUÇÃO NAVAL.....	42
5.6.1 AÇO X ALUMÍNIO.....	42
6. APLICAÇÕES PRÁTICAS	45
6.1 CATAMARÃ DE PASSAGEIROS E TURISMO	45
6.2 CATAMARÃ SERVIÇOS MARÍTIMOS.....	46
6.3 CATAMARÃ MILITAR E DE DEFESA.....	47
6.4 OUTRAS APLICAÇÕES.....	49
7. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS	51
7.1 DESAFIOS NA CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO	51
7.1.1 CORROSÃO.....	51
7.1.2 SOLDAGEM	53
7.1.3 FADIGA	56
7.2 TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	57
8. MULTICASCO MILITAR EM ALUMÍNIO	58
8.1 LITTORAL COMBAT SHIP.....	58
8.2 PROBLEMAS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO	59
8.3 FADIGA ESTRUTURAL ALUMÍNIO.....	61
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento significativo no uso do alumínio na indústria naval, especialmente em embarcações de serviço e de apoio offshore. Essa tendência, destacada por Colunna (2023), é impulsionada pelos benefícios do alumínio em termos de durabilidade, leveza e impacto ambiental reduzido em comparação com materiais tradicionais como o aço. O alumínio oferece vantagens notáveis, como a eficiência no consumo de combustível, quando comparado à construção em aço. Em relação ao aço de baixo teor de carbono, embarcações feitas em ligas de alumínio podem ser até 50% mais leves. Essa redução de peso contribui significativamente para a melhor estabilidade e desempenho geral da embarcação (COLUNNA, 2023).

Contudo, embora o alumínio seja resistente a ambientes marinhos, ele necessita de processos de proteção para manter sua durabilidade, podendo ser utilizadas diversas técnicas para preservar a estrutura da embarcação.

O transporte marítimo é uma parte essencial da infraestrutura global, e a inovação no projeto de embarcações desempenha um papel vital na melhoria da eficiência e sustentabilidade. Catamarãs de alumínio, com sua estrutura leve e resistente, apresentam-se como uma alternativa viável para diversas demandas, incluindo o transporte de passageiros.

É por essa razão que a maior parte dos catamarãs construídos recentemente são balsas ou ferryboats utilizados em viagens curtas e que operam em regime de semi-planeio, com excelente estabilidade transversal e boa manobrabilidade. O comprimento desses barcos varia entre 20 e 40 metros, enquanto o número de passageiros pode variar entre cem e quatrocentos (MARTINÉZ, 2016).

Inserido nesse contexto, neste trabalho são abordados os avanços tecnológicos e a utilização do alumínio na construção naval, destacando seus benefícios e os desafios enfrentados na aplicação desse material. Também são discutidos o projeto de catamarãs, incluindo suas peculiaridades em relação à resistência ao avanço, à estabilidade, à flutuabilidade e ao projeto estrutural.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo fornecer uma ampla visão sobre embarcações do tipo catamarã, com ênfase na utilização do alumínio para a fabricação do casco e da superestrutura.

Para alcançar os objetivos gerais, foram identificados os seguintes objetivos específicos para a elaboração do trabalho:

- Realizar uma ampla revisão bibliográfica sobre o uso de embarcações do tipo catamarã;
- Realizar uma ampla revisão bibliográfica sobre o uso do alumínio na construção de embarcações oceânicas;
- Realizar uma ampla revisão bibliográfica sobre o uso do alumínio na construção de embarcações multicasco;
- Analisar as características técnicas e as propriedades das ligas de alumínio e outros materiais utilizados para a construção naval;
- Avaliar as vantagens e as desvantagens da utilização do alumínio para a construção naval;

1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

O método de pesquisa utilizado será a revisão bibliográfica, a qual será realizada tendo como base: pesquisas acadêmicas, artigos de revistas científicas e livros especializados; de onde são extraídos dados quantitativos e qualitativos para fornecer uma visão abrangente sobre o tema.

2. HISTÓRIA E EVOLUÇÃO

2.1 CATAMARÃS

A origem exata dos catamarãs permanece incerta devido à sua presença em diversas culturas marítimas ao redor do mundo. No entanto, alguns historiadores sugerem que os primeiros catamarãs foram construídos nas ilhas da Polinésia.

Os polinésios desenvolveram as embarcações catamarãs conhecidas como waka, que utilizavam cascas de árvores e troncos unidos para formar os cascos. Essa configuração, ilustrada na Figura 1, proporcionava estabilidade à embarcação e a capacidade de navegar por longas distâncias. (MASTRO D'ASCIA, 2016)

Figura 1 - Marinheiros polinésios em uma canoa multicasco, em 1781



Fonte: Mastro D'Ascia (2016)

Em culturas indianas e asiáticas, também foram desenvolvidas embarcações semelhantes, usadas principalmente para pesca, transporte e comércio em águas costeiras. A palavra "catamarã" tem origem no termo tâmil "Kattumaram", onde "Kattu" significa pacote e "maram" significa árvore, referindo-se literalmente a troncos unidos. Essas embarcações eram formadas por três ou quatro troncos amarrados, com o tronco mais longo posicionado no centro, projetando-se além dos outros. A propulsão dessas balsas era feita através do uso de remos (FERNÁNDEZ; A., 2022).

Mais tarde, esse nome passaria a designar uma embarcação caracterizada por ter dois cascos iguais (ou muito similares), unidos em paralelo por meio de estruturas de ripas ou plataformas mais complexas.

No ocidente, o uso de catamarãs foi bastante difundido durante o século XX. Os irmãos Alistair e Francis Chichester e outros exploradores passaram a utilizar

catamarãs para viagens oceânicas, devido à sua estabilidade e velocidade, popularizando esse tipo de embarcação para as mais diversas aplicações, desde veleiros de recreio até embarcações destinadas ao transporte de carga e/ou passageiros (FERNÁNDEZ; A., 2022).

As embarcações multicasco são projetadas para capitalizar as vantagens inerentes à essa geometria, como uma ampla área de convés, uma menor resistência ao avanço, uma maior estabilidade transversal e a possibilidade de arranjos mais atrativos devido a maior boca. (KOS, 2010)

Nas últimas décadas, os catamarãs experimentaram avanços notáveis em tecnologia e fabricação. A incorporação de materiais como alumínio e compósitos de fibra de carbono em sua construção resultou em embarcações mais leves, duráveis, resistentes e eficientes. Por essa razão, essas embarcações passaram a ser utilizadas em uma ampla gama de aplicações, incluindo: transporte de passageiros e carga, turismo, competições de vela, pesquisa científica e exploração offshore.

Devido à crescente ênfase em eficiência, sustentabilidade e segurança, espera-se que esses navios continuem a evoluir e a se adaptar às novas demandas de arquitetos, engenheiros e armadores.

2.2 ALUMÍNIO NA CONSTRUÇÃO DE CATAMARÃS

Inicialmente, embarcações feitas de alumínio eram vistas com ceticismo devido a preocupações com sua resistência e durabilidade. No entanto, com o tempo, os avanços tecnológicos das ligas de alumínio e dos métodos de construção transformaram essa percepção.

Durante o século XX, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento gradual no interesse pelo uso do alumínio na construção naval. A demanda por embarcações mais leves, ágeis e economicamente viáveis impulsionou a pesquisa e o desenvolvimento de novas ligas de alumínio e de novas técnicas de construção (COLUNNA, 2023).

Na década de 1960, os catamarãs ressurgiram como uma alternativa eficiente aos navios monocasco. A leveza do alumínio o tornou um material ideal para a construção de embarcações multicasco, levando à ampla aceitação dos catamarãs de alumínio em diversas aplicações, incluindo balsas, ferryboats, embarcações de resgate e iates de luxo (COLUNNA, 2023).

Os recentes avanços na tecnologia de fabricação e as melhorias nas ligas de alumínio resultaram em uma maior aceitação e aplicação desse material na indústria naval. Sua resistência à corrosão, durabilidade e facilidade de manutenção o tornaram uma escolha atrativa para embarcações operando em ambientes marítimos.

Atualmente, o alumínio é reconhecido como um material versátil e eficiente para projetos estruturais de catamarãs e outras embarcações, passando de uma opção pouco utilizada, para um material de grande importância, impulsionado pelas demandas por desempenho, eficiência e sustentabilidade existentes no transporte marítimo. Além disso, a maior facilidade de fabricação (usinagem e conformação) e a ampla disponibilidade do alumínio, também contribuem para a redução dos custos e do tempo de construção dos catamarãs.

3. FUNDAMENTOS DE PROJETO

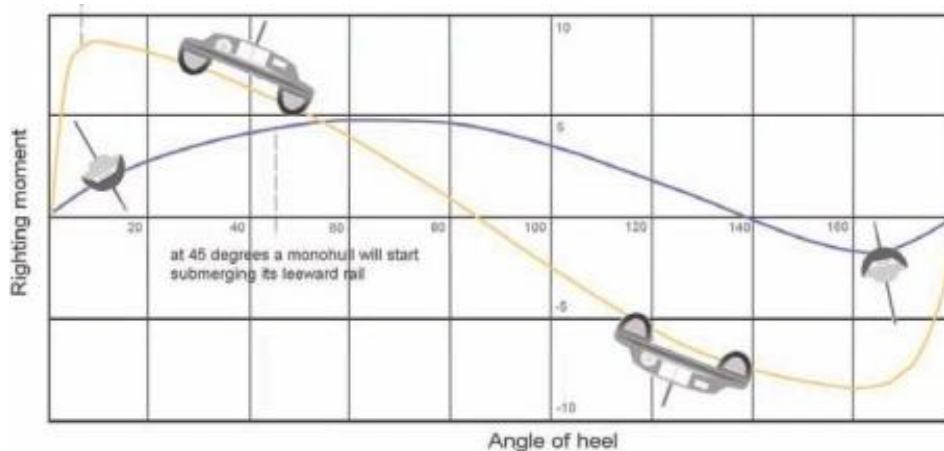
O desenvolvimento de um catamarã exige uma compreensão abrangente dos princípios da engenharia naval, com ênfase tanto nos aspectos estruturais quanto nos hidrodinâmicos. Neste capítulo são explorados os principais conceitos necessários para o projeto de um catamarã, destacando as considerações essenciais para garantir sua eficiência, estabilidade e desempenho.

3.1 PRINCÍPIOS DE PROJETO

Segundo Martínéz (2016), as principais vantagens de um catamarã em relação às embarcações monocasco baseiam-se na divisão do deslocamento entre dois corpos paralelos entre si, separados transversalmente e conectados por um deck resistente. Isto significa que a relação deslocamento-comprimento de cada casco do catamarã é menor que a de um navio monocasco de mesmo comprimento. Isso permite projetar os cascos minimizando o arrasto em alta velocidade sem que seja necessário se preocupar com a perda de estabilidade da embarcação.

Tradicionalmente, embarcações multicasco tem uma estabilidade transversal inicial muito maior que a de uma embarcação monocasco do mesmo comprimento ou deslocamento, devido ao grande momento de inércia causado pelo espaçamento entre as áreas de linha d'água de cada casco (Figura 2).

Figura 2 – Estabilidade Catamarã em comparação com Monocasco



Fonte: TARJAN, 2008

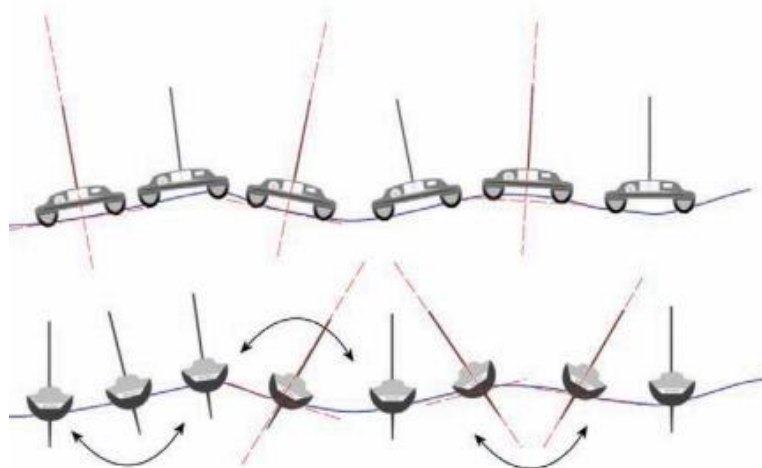
Além disso, a área útil do convés é muito superior à de um monocasco de mesmo comprimento ou deslocamento. Por fim os catamarãs ainda possuem um momento de giro mais eficaz nas manobras com as hélices, devido ao afastamento transversal dos propulsores localizados na popa dos cascos (MARTINÉZ, 2016).

Do ponto de vista estrutural, a parte inferior da estrutura que conecta os cascos de um catamarã é submetida a intensas cargas hidrodinâmicas devido ao impacto das ondas em condições de mar agitado. Para mitigar esse problema, é essencial que essa estrutura seja mantida a uma altura adequada, limitando, assim, as variações de calado permitidas. Consequentemente, o catamarã apresenta uma capacidade limitada para variações no peso da carga máxima transportada (MARTINÉZ, 2016).

3.2 EQUILÍBRIO E ESTABILIDADE

A estabilidade de uma embarcação é determinada por diversos fatores, que incluem a distribuição de peso, o centro de gravidade e o centro de flutuação. Segundo Tarjan (2008), no caso de embarcações do tipo catamarãs, a presença de dois cascos separados possibilita uma base mais ampla e estável, reduzindo a propensão de roll em relação aos cascos tradicionais (Figura 3).

Figura 3 - Roll Catamarã comparado com Monocasco



Fonte: TARJAN, 2008

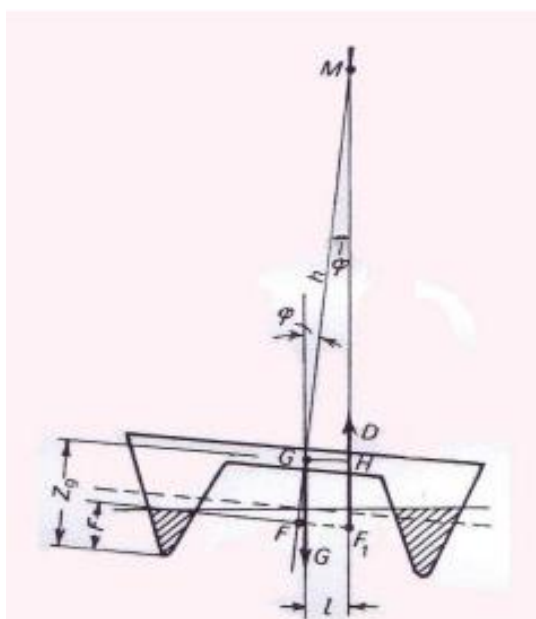
Para calcular o equilíbrio da embarcação, é proposto um método sistemático para o projeto inicial, seguindo algumas etapas. Primeiramente, é estimado o calado

médio da embarcação, adotando o calado de projeto. Em seguida, é calculada a curva de flutuação ao longo do comprimento, considerando-se que a embarcação navega com um ângulo de trim de 0° . Assim, a flutuação total do navio é determinada pela integração da curva de flutuação ao longo do comprimento (TANCREDI, 2004).

Para que um navio esteja em equilíbrio, é essencial que o peso total da embarcação seja igual a sua flutuação. Além disso, é necessário que o LCB (Longitudinal Center of Buoyancy) coincida com o LCG (Longitudinal Center of Gravity). Esse processo é repetido iterativamente para diferentes valores de calado e ângulos de trim até que ambas as condições sejam satisfeitas e o navio esteja em equilíbrio (TANCREDI, 2004).

Já a estabilidade é definida pela combinação das forças atuantes nos centros de gravidade (G) e de flutuação (F). Considerando a seção transversal mostrada na Figura 4, conforme o centro de flutuação F se move, surge um binário que tende a inclinar transversalmente a embarcação. A existência de um grande momento de inércia da área de linha d'água de catamarãs faz com que, mesmo mudanças significativas na posição de F, resultem em pequenos ângulos de inclinação da embarcação (KOS, 2010).

Figura 4 - Estabilidade Inicial de um Catamarã



Fonte: KOS, 2010

O momento de inércia da área de linha d'água de um catamarã é determinado pela soma da inércia da área de linha d'água dos dois cascos, acrescentada do produto entre a área do plano de flutuação e o quadrado da metade da distância entre os cascos. Em resumo, a distância entre cascos é um fator essencial na estabilidade transversal de catamarãs. Alterações nessas distâncias podem resultar na redução da resistência ao avanço, devido à interação entre os sistemas de ondas geradas pelos cascos e à velocidade do fluxo entre eles, bem como na diminuição dos ângulos de inclinação ou das acelerações transversais (KOS, 2010).

3.3 RESISTENCIA AO AVANÇO

A resistência ao avanço de um navio refere-se a força a qual a embarcação deve superar para navegar a uma dada velocidade, sendo influenciada por uma variedade de fatores, entre eles: a forma dos cascos, a forma da proa, a eficiência dos propulsores e as condições hidrodinâmicas. Também devem ser consideradas as características operacionais como as condições de carga, a condição do casco e a altura significativa das ondas a frente do navio.

A forma do casco é um dos fatores principais que determinam a resistência ao avanço de uma embarcação. No caso dos catamarãs, os cascos, em geral, são estreitos e alongados, o que reduz a resistência hidrodinâmica em comparação com monocascos de mesmo deslocamento.

Segundo Haase et. al. (2016), o arrasto total pode ser dividido em componentes de fluxo viscoso e potencial. Geralmente a componente viscosa é expressa por um coeficiente de atrito multiplicado por um fator de forma ($C_f * (1+k)$), enquanto a componente potencial é obtida pela integração da pressão normal ao casco.

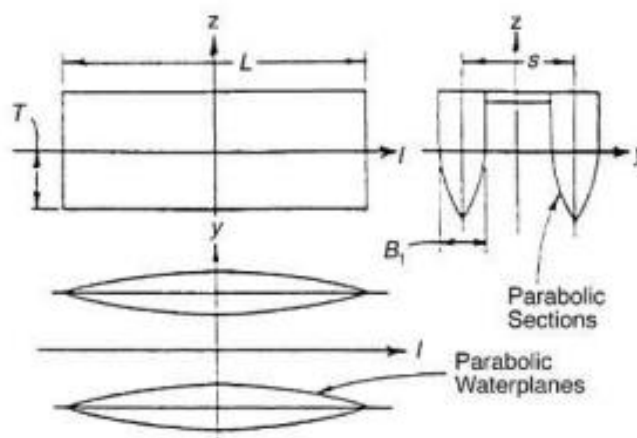
Outro importante parcela da resistência existente em catamarãs é a resistência de interferência das ondas, a qual é causada pela interação entre os sistemas de ondas gerados por cada um dos cascos isoladamente. Essa característica é diretamente afetada pela forma dos cascos e pelo espaçamento entre eles.

De acordo com o modelo matemático proposto por Wigley (1926), pode-se observar que a variação entre a razão s / L , onde s é a distância entre os cascos e L é o comprimento molhado de um casco, leva às seguintes conclusões:

- Quando a razão s / L diminui, as ondas divergentes entre os cascos são reduzidas, e a onda transversal se torna dominante devido a interferência das ondas divergentes;
- Para $s / L = 0,5$, a interferência das ondas praticamente desaparece e o padrão de ondas se assemelha ao de um monocasco
- À medida que a razão s / L diminui ainda mais, o efeito de interferência entre as ondas transversais se torna dominante. Por exemplo, para $s / L = 0,2$ e um número de Froude $Fn = 0,5$, esses efeitos se propagam para o escoamento na região externa dos cascos.

Assim é possível constatar a importância do espaçamento entre os cascos, bem como da relação s / L , na determinação da resistência de interferência de ondas existente em uma embarcação do tipo catamarã. Baseado em seus estudos, Wigley (1926) propôs o clássico formato de casco mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Formato casco Wigley



Fonte: Wigley (1926)

Portanto, o impacto da distância entre os cascos na resistência ao avanço da embarcação é bastante complexo e depende da velocidade do catamarã, das características geométricas e das proporções de cada casco isolado. Por exemplo, para baixos valores da relação comprimento / largura (L/B), tanto a forma quanto a distância entre os cascos afetam igualmente a resistência devido à geração de ondas; no entanto, em valores mais altos de L/B , a distância entre os cascos tem uma influência mais significativa. (KOS, 2010).

3.4 PROJETO ESTRUTURAL

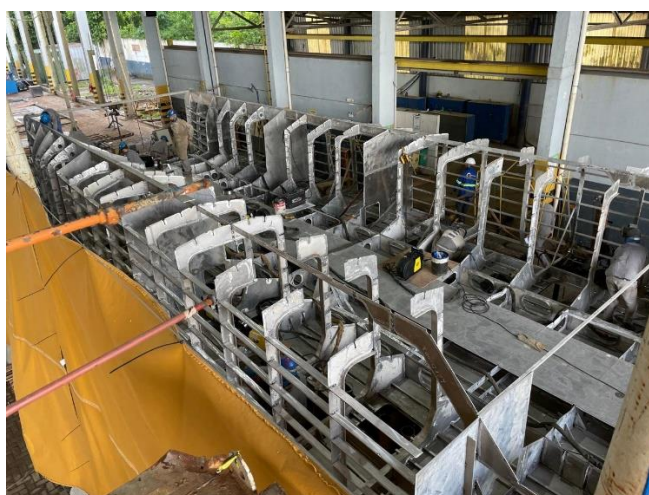
Realizado o cálculo do equilíbrio em condições de mar calmo e de ondas (tosamento e alquebramento), é possível determinar a distribuição das cargas ao longo do comprimento da embarcação. A partir dessa curva, é possível obter o diagrama de forças cortantes e momento fletor atuantes na embarcação, as quais representam os esforços globais ao longo da viga do navio.

Sendo que, na configuração de tosamento, o convés superior da seção mestra encontra-se sob compressão enquanto o fundo do navio encontra-se sob tração. Já na condição de alquebramento, o fundo do navio sofre compressão e o convés superior sofre tração (TANCREDI, 2004).

Com essas informações, é possível identificar as seções que sofrem as máximas solicitações globais. No entanto, além dos esforços globais, algumas regiões devem ser analisadas localmente, e essa análise pode ser dividida em análise dos reforçadores e análise do chapeamento.

Na Figura 6, é possível observar detalhes da estrutura interna de um catamarã fabricado em alumínio. Na Figura 6, podem ser vistos os principais componentes estruturais, como as longarinas, anteparas e reforçadores transversais, os quais conferem rigidez e garantem a integridade do casco.

Figura 6 - Parte Estrutural Casco Catamarã



Fonte: Autor, 2023.

Para o cálculo do chapeamento e dos reforçadores, normalmente são utilizadas

normas fornecidas por Sociedades Classificadoras, as quais apresentam cálculos específicos para o dimensionamento estrutural de catamarãs construídos em alumínio. A adequação às normas técnicas garante a conformidade do projeto e da fabricação com os padrões de segurança e qualidade exigidos para que a embarcação possa navegar.

Nesse caso, os procedimentos de cálculos são baseados em uma vasta experiência obtida com o projeto, fabricação e operação de embarcações semelhantes. Sendo que os espaçamentos entre os elementos estruturais são justamente as variáveis definidas pelo engenheiro, cuja variação permite que diferentes projetos estruturais possam atender a uma mesma norma técnica.

A partir dos espaçamentos entre reforçadores definidos pelo engenheiro e das pressões atuantes em cada região do casco, a norma estabelece as dimensões mínimas requeridas para as chapas e reforçadores, permitindo a determinação do arranjo estrutural. A seguir, são calculadas as propriedades geométricas da seção mestra, em especial o módulo da seção, o qual deve ser maior do que o módulo de seção mestra exigido pela norma e calculado com base nos esforços globais atuantes na embarcação. (ABS, 2013).

No entanto, é importante destacar que os cálculos estruturais baseados na teoria de viga do navio (esforços globais) são recomendados para embarcações com comprimento acima de 24 metros (ISO, 2020) e acima de 36 metros (ABS, 2013). Para catamarãs com comprimentos inferiores a esses, apenas os efeitos da pressão no fundo do casco e os momentos sofridos pela estrutura transversal do deck resistente devem ser considerados.

4. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ENGENHARIA

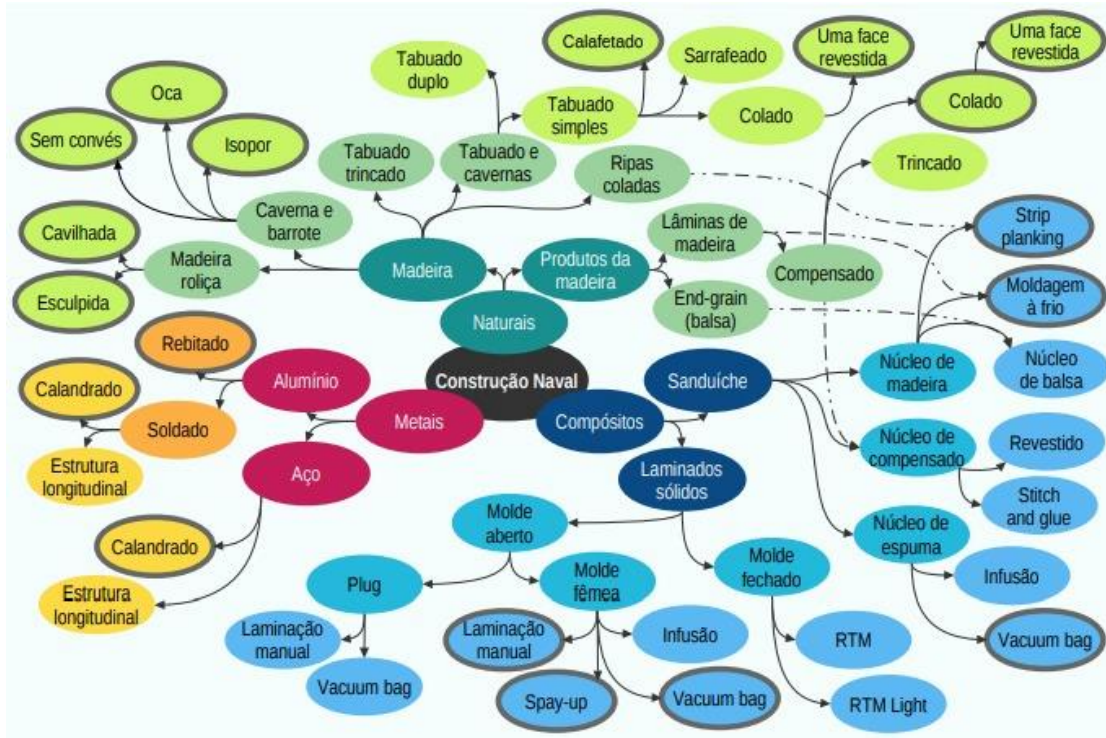
A seleção de materiais é uma das etapas mais importantes e complexas de um projeto, sendo uma prática essencial para engenheiros e projetistas. Esses profissionais enfrentam o grande desafio de escolher, entre os inúmeros materiais disponíveis atualmente, aquele que melhor se adequa para uma dada aplicação. Esse processo requer a consideração de uma série de fatores, como suas propriedades, formas, custos, mão de obra qualificada, disponibilidade no mercado, além dos custos das ferramentas e maquinário necessários para a sua fabricação.

Segundo Ashby (2012), a escolha adequada dos materiais é essencial para assegurar a eficiência, durabilidade e viabilidade econômica de um projeto. Critérios como resistência mecânica, resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica, peso e impacto ambiental são avaliados de forma cuidadosa.

Além disso, os avanços tecnológicos, como programas de simulação e bancos de dados de materiais, têm simplificado esse processo, proporcionando análises mais precisas, rápidas e assertivas. Entre os materiais mais utilizados na construção naval destacam-se o aço, o alumínio, a fibra de vidro e os compósitos avançados, tais como a fibra de carbono e de aramida. (WALTER, 2018).

Na Figura 7 é apresentado um diagrama detalhado dos materiais e processos empregados na construção naval artesanal. O esquema de cores foi elaborado para diferenciar as diversas categorias de materiais e seus respectivos processos de fabricação. Tons de verde representam materiais naturais e seus respectivos processos de fabricação. Materiais compósitos e seus processos são indicados por tons de azul. Já os materiais metálicos e seus processos são identificados com tons de magenta e alaranjado. Além disso, uma borda cinza é aplicada para destacar os materiais e processos que são comumente utilizados no Brasil. As setas inseridas no esquema têm a função de indicar a divisão em subcategorias, permitindo uma visualização clara e estruturada das diferentes classificações. Por fim, setas tracejadas são usadas para representar as relações entre materiais e processos de diferentes categorias, mostrando como eles podem interagir e complementar uns aos outros. (WALTER, 2018).

Figura 7 - Materiais e processos utilizados na construção Naval



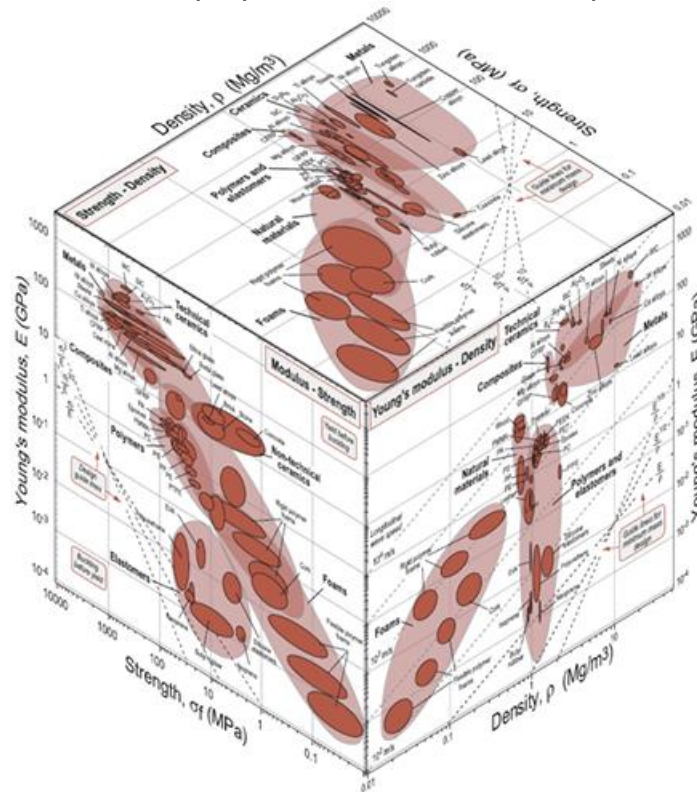
Fonte: WALTER, 2018.

4.1 DIAGRAMA DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A escolha de materiais de engenharia raramente se baseia em uma única propriedade, mas sim em uma combinação de várias características envolvidas na aplicação a ser desenvolvida.

Para auxiliar nesse processo complexo, frequentemente se recorre ao uso de um mapa de propriedades (Figura 8). Esse tipo de mapa oferece uma visualização clara e comparativa das diversas propriedades dos materiais, permitindo que engenheiros e projetistas analisem e selecionem os materiais mais adequados de forma mais clara e eficiente. (MARCOMINI, 2020).

Figura 8 - Gráfico de propriedades dos materiais para seleção



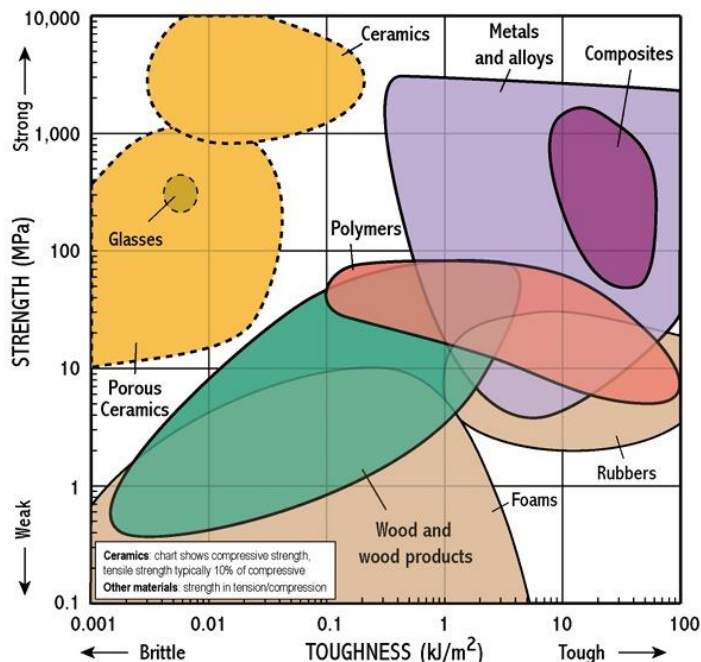
Fonte: MARCOMINI, 2020.

Cada material de engenharia exibe um conjunto específico de propriedades que podem ser representadas graficamente para facilitar a análise por meio do cruzamento de diferentes propriedades, tais como: resistência mecânica, densidade, resistência à corrosão, entre outras.

Os materiais de engenharia são frequentemente agrupados em categorias, em função da semelhança de suas propriedades. Essas categorias podem ser visualizadas e examinadas através de gráficos "envelopados" (Figura 9), que delineiam as regiões do espaço de propriedades onde esses materiais se encontram.

Esses diagramas são ferramentas valiosas, pois permitem identificar rapidamente quais grupos de materiais possuem as características desejadas para determinadas aplicações, além de permitirem a comparação de forma eficaz das propriedades, facilitando a seleção do material mais adequado para atender às necessidades específicas do projeto (MARCOMINI, 2020).

Figura 9 - Diagrama de Ashby Relacionando Tenacidade à Fratura x Resistência



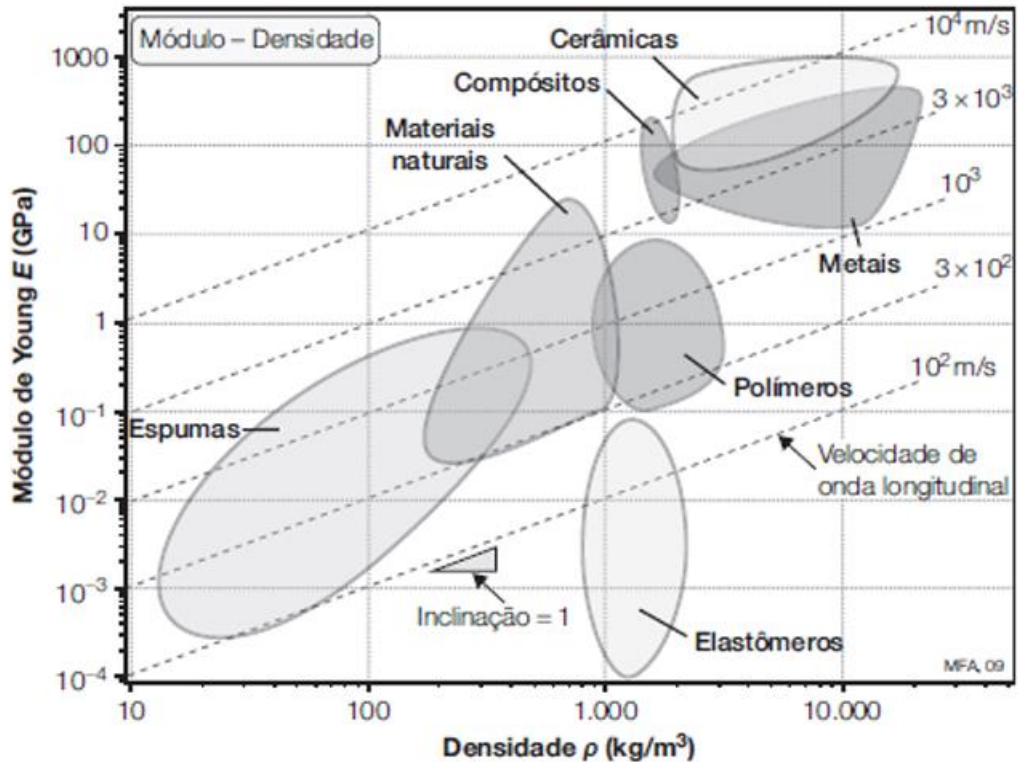
Fonte: MARCOMINI, 2020.

As planilhas de dados de materiais normalmente apresentam seus atributos de forma isolada, o que pode ser limitante, pois o desempenho de um componente raramente depende de uma única propriedade.

Assim, para superar essa limitação, Ashby (2012) sugere a criação de Diagramas de Propriedades de Materiais (DPM). Esses diagramas podem ser apresentados de duas maneiras: como diagramas de barras e como diagramas de balões. (SOUZA, 2020)

Nos diagramas de bolhas, os materiais localizados acima das linhas-guia, representadas na Figura 10, tendem a oferecer um desempenho superior em relação àqueles que estão abaixo dessas linhas. No caso do clássico diagrama da Figura 10, para condições de desempenho equivalentes, ou seja, considerando uma mesma deformação, os materiais situados acima da linha possuem uma massa menor em comparação com aqueles que estão abaixo dela (SOUZA, 2020).

Figura 10 - Diagrama Módulo de Young x Densidade

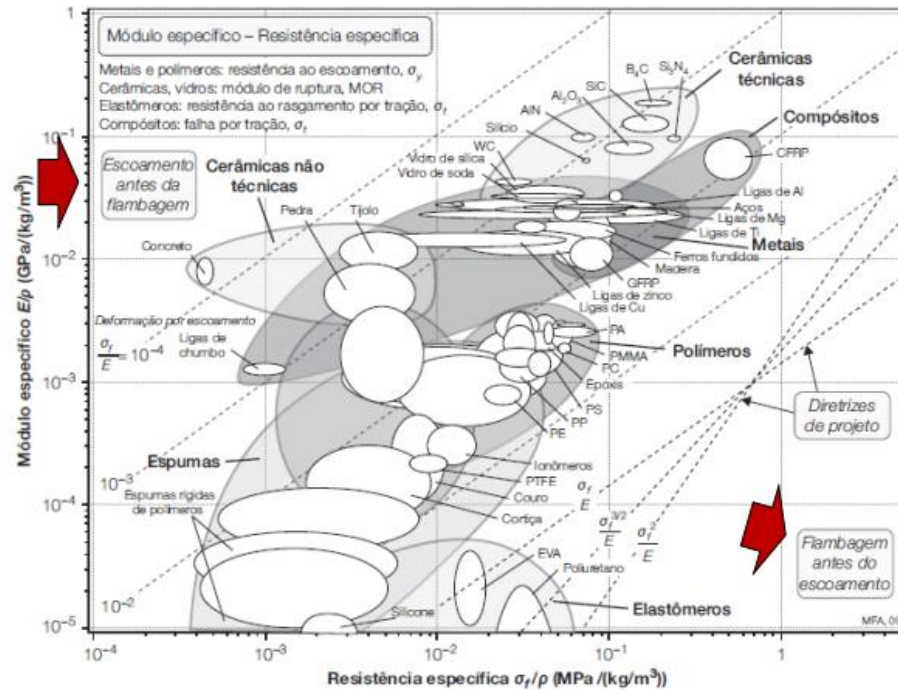


Fonte: MARCOMINI, 2020.

Esses diagramas ajudam na análise comparativa das combinações de propriedades dos materiais, facilitando a identificação daqueles que oferecem o melhor desempenho para condições específicas de aplicação. Assim, engenheiros e projetistas podem tomar decisões mais informadas e assertivas sobre a seleção de materiais, considerando múltiplas propriedades simultaneamente (SOUZA, 2020).

A distinção entre as diferentes classes de materiais é evidenciada na Figura 11. Os metais estão localizados na parte superior direita do diagrama, ou seja, apresentam um desempenho superior em termos de propriedades específicas. Já os polímeros são predominantemente concentrados na região central, refletindo suas características intermediárias, enquanto os elastômeros, por sua vez, são situados ligeiramente abaixo dos polímeros. Por fim, as cerâmicas são posicionadas na parte superior do gráfico, destacando suas características únicas em relação aos outros materiais (SOUZA, 2020).

Figura 11 - Módulo de Elasticidade x Resistência



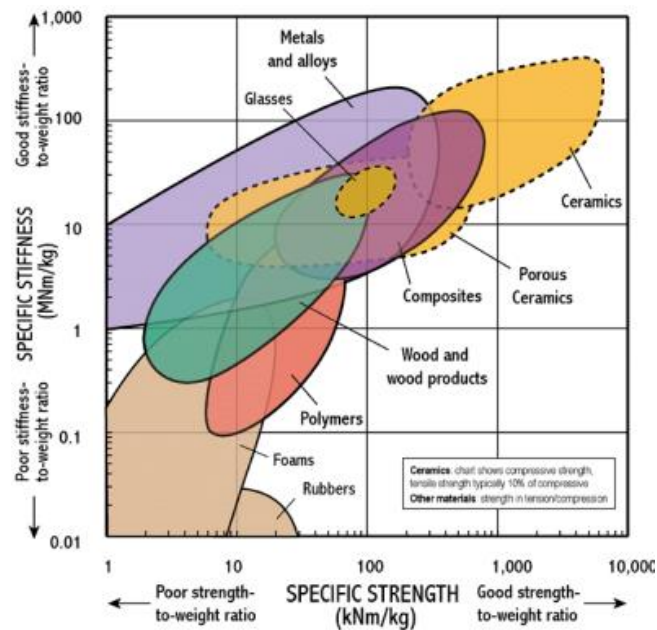
Fonte: MARCOMINI, 2020.

Semelhante aos diagramas de barras, os diagramas de bolões também utilizam escalas logarítmicas. Essa abordagem permite uma visualização mais clara e uma comparação mais eficaz das propriedades dos materiais, facilitando a análise detalhada das suas diferenças e semelhanças. O uso de escalas logarítmicas ajuda a lidar com a ampla gama de valores existentes, proporcionando uma representação mais compreensível das propriedades dos materiais em um único gráfico.

A resistência de um material está associada à sua capacidade de suportar deformações até o ponto do escoamento ou fratura. Essa característica é expressa pela razão entre a tensão de fratura (σ_f) e o módulo de elasticidade (E), representada pela fórmula σ_f/E .

No diagrama de propriedades dos materiais (Figura 12), essa relação é visualizada como um conjunto de retas paralelas, as quais indicam diferentes níveis de resistência em relação à deformação, proporcionando uma referência visual clara para a comparação entre os materiais. (MARCOMINI, 2020).

Figura 12 - Rigidez Específica x Resistência Específica



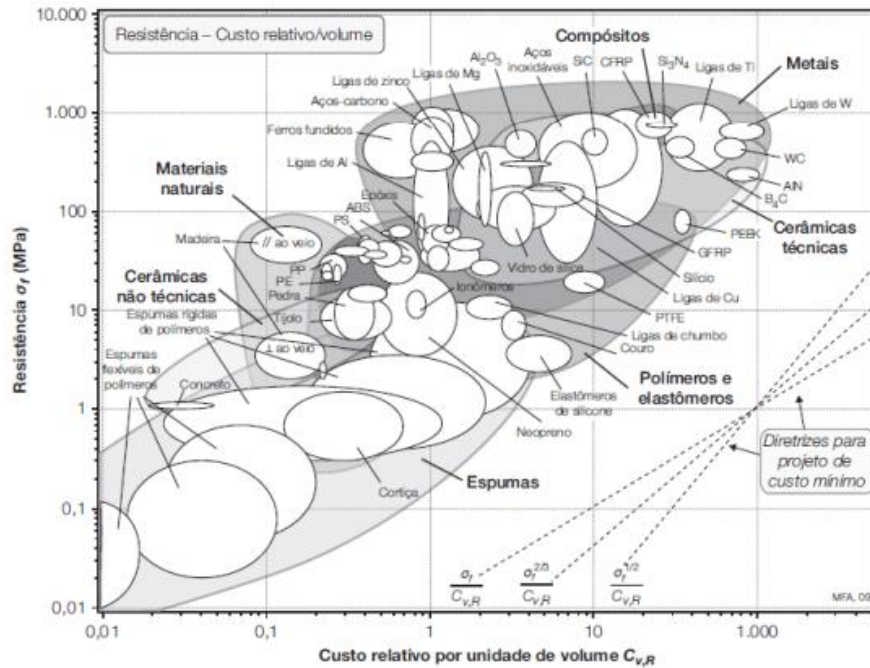
Fonte: Ashby, 2012

Os materiais compósitos e o alumínio são destacados como opções particularmente vantajosas devido à sua habilidade em proporcionar elevada rigidez e resistência, mantendo um peso específico relativamente baixo. Esses materiais são especialmente valorizados na engenharia naval por sua capacidade de combinar desempenho estrutural robusto com leveza, o que é crucial para melhorar a eficiência e o desempenho das embarcações.

Na Figura 13 é apresentado um diagrama que permite avaliar o desempenho dos materiais em relação ao seu custo por unidade de volume. É possível observar que os materiais que se destacam com os maiores valores em ambos os eixos (x e y) são aqueles que oferecem a melhor resistência mecânica para um dado nível de investimento financeiro. Embora esses dados não representem valores exatos, ou atualizados, eles facilitam a comparação qualitativa entre as diferentes categorias de materiais.

Observa-se que a relação entre custo e desempenho para os compósitos é quase inversa: um aumento no desempenho desses materiais é acompanhado por um aumento ainda mais acentuado no custo, resultando em uma relação custo-benefício geralmente inferior (SOUZA, 2020).

Figura 13 - Mapa Resistência x Custo relativo



Fonte: MARCOMINI, 2020.

4.2 SELEÇÃO DE MATERIAS PARA CATAMARÃS

Para o projeto de catamarãs, cuja prioridade é a redução de peso, é fundamental utilizar materiais que ofereçam um desempenho superior, apresentando o maior valor possível para a resistência específica, ou seja, a maior relação possível entre o limite de resistência e o peso específico do material.

Nesse sentido, destacam-se a madeira com orientação das fibras, os polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) e as ligas de alumínio.

5. MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONSTRUÇÃO

Na construção de catamarãs, é possível utilizar uma grande variedade de materiais, cada um com suas características e vantagens específicas. Neste capítulo, é apresentada uma visão geral dos principais materiais empregados, destacando suas propriedades e aplicabilidades.

O alumínio, objeto deste trabalho, é particularmente valorizado por sua leveza, durabilidade e resistência à corrosão, tornando-se uma escolha interessante em muitos projetos de catamarãs. Assim, este capítulo dará ênfase ao uso do alumínio, explorando suas vantagens e desafios, além de descrever a evolução histórica da aplicação desse material na construção naval.

5.1 FIBRA DE VIDRO

A fibra de vidro é amplamente empregada na indústria náutica. Em embarcações de cruzeiro e de serviço, os reforços de fibra são laminados com resinas como poliéster, epóxi ou éster vinílica, criando uma estrutura de baixo custo e construção relativamente simples.

Entre suas vantagens, destacam-se a leveza, a facilidade de obtenção e a disponibilidade de mão de obra especializada nesse material. No entanto, a fibra de vidro é vulnerável à deterioração devido à exposição a elementos naturais, como raios solares e água salgada. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades mecânicas da fibra de vidro (MIGUEIS, 2005).

Tabela 1 - Propriedades da fibra de vidro

Propriedades	Unidade	Fibra de Vidro
Densidade	g/cm ³	1,8
Módulo de Elasticidade	Gpa	30
Coefficiente de Poisson	---	0,2
Tensão de Ruptura	MPa	750
Tensão de Tração	MPa	124
Tensão de Compressão	MPa	117

Fonte: Migueis, 2005

Os avanços nas pesquisas dos materiais compósitos permitiram que os catamarãs se destacassem como estruturas leves e robustas, mesmo enfrentando um ambiente tão desafiador como o oceano. Contudo, essa vantagem vem acompanhada de exigências rigorosas. A fabricação usando a tecnologia de sanduíche requer um ambiente de trabalho devidamente controlado (Figura 14), onde fatores como proporções precisas de resina, temperatura, umidade e pressão são críticos para garantir a resistência e a durabilidade da embarcação. Qualquer desvio nessas condições pode comprometer severamente a qualidade da construção. Assim, a confiabilidade de um barco navegável está diretamente ligada à qualidade de sua construção, bem como da mão de obra empregada (TARJAN, 2008).

Figura 14 - Moldes de um casco Blubay 72



Fonte: TARJAN, 2008

5.2 COMPOSITOS AVANÇADOS

Materiais avançados como compósitos de fibra de carbono, aramida e outros são utilizados na construção de catamarãs de alto desempenho. Esses materiais oferecem uma excelente relação entre resistência e peso, permitindo a construção de catamarãs extremamente leves e rápidos.

No entanto, além de requererem o uso de resina epóxi, o custo desses materiais ainda é bastante elevado para serem utilizados em barcos de cruzeiro ou de serviço. Por fim, esses materiais ainda exigem uma proteção contra raios UV e uma manutenção especializada, o que aumenta a complexidade e os custos operacionais (MIGUEIS, 2005).

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades da fibra de carbono.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da fibra de carbono

Propriedades	Unid	Fibra de Carbono
Densidade	g/cm ³	1,96
Módulo de Elasticidade	Gpa	390
Coefficiente de Poisson	---	0,2
Tensão de Ruptura	MPa	2060
Tensão de Tração	MPa	2200

Fonte: Marques, 2015

A fibra de carbono é um material predominantemente utilizado nos catamarãs de regata, pois, uma vez que são extremamente leves, permitem que essas embarcações atinjam grandes velocidades (MANCELOS et al, 2015).

Segundo o estaleiro HH Catamarãs (2024), especializado em construção com fibra de carbono, seu processo de infusão foi aperfeiçoado para fornecer estruturas de carbono sem defeitos e vazios. Isso permite a produção de peças mais leves e resistentes, eliminando peso desnecessário e garantindo uma estrutura mais eficiente.

Na Figura 15 é possível observar um exemplo de um catamarã fabricado em fibra de carbono destinado a competições de vela.

Figura 15 - Catamarã a Vela em Fibra de Carbono



Fonte: HH Catamarans, 2024

5.3 MADEIRA

Embora menos comum nos dias de hoje em decorrência do surgimento de materiais mais avançados, a madeira ainda é utilizada na construção de catamarãs tradicionais e artesanais (Figura 16). Pois ela oferece uma estética única e chama atenção pela sua beleza natural, a qual, no entanto, requer mais manutenção e pode ser mais suscetível a deterioração em comparação com os outros materiais.

Figura 16 - Construção de um catamarã em madeira



Fonte: BG YACHT DESIGN, 2024.

Desde o início da navegação, a madeira tem sido fundamental na construção de cascos, mastros e outros componentes estruturais de barcos. Esse material natural, amplamente disponível, apresenta boas propriedades mecânicas (MIGUEIS, 2005). Por exemplo, na Tabela 3 podem ser vistas as propriedades mecânicas da madeira balsa.

Tabela 3 - Propriedades da madeira balsa

Propriedades	Unid	Madeira
Densidade	g/cm ³	0,610 – 0,750
Módulo de Elasticidade	Gpa	1,91 – 2,14
Coeficiente de Poisson	---	0,036 – 0,618
Tensão de Ruptura	MPa	3,8 – 4,7

Fonte: Mancelos et al. 2015

Com o surgimento das resinas epóxi, a construção naval em madeira experimentou um novo avanço. Essas resinas permitiram a criação de estruturas em sanduíche, com espessuras reduzidas e formas diversificadas.

Nas últimas três décadas, a introdução de fibras de vidro, aramidadas e carbono unidirecional na estrutura dos barcos revolucionou a construção com madeira, trazendo inovações significativas e melhorando a eficiência e durabilidade das embarcações (MIGUEIS, 2005).

5.4 ALUMÍNIO

O alumínio vem sendo utilizado na construção de embarcações há várias décadas. Em muitos casos, os navios navegaram por décadas sem problemas estruturais graves.

No entanto, existiram diversos casos em que a seleção errada da liga de alumínio levou a sérios problemas de corrosão, o que ocasionou no desmonte dos navios poucos anos após sua construção (THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 2021).

Conforme explicado pela The Aluminium Association (2021), esse é o material mais abundante na crosta terrestre e está muito presente no nosso dia a dia, fazendo parte desde a fabricação do papel alumínio até a construção de navios, automóveis e latas de bebida.

Na Tabela 4 é possível verificar as principais classificações das ligas de alumínio, numeradas conforme sua composição, sendo que o dígito inicial indica o principal elemento de liga. Já os dois dígitos finais indicam as informações sobre a composição da liga ou, no caso do alumínio puro, o nível de pureza da liga (ALUMINIUM ASSOCIATION 2021).

Tabela 4 – Classificação numérica das ligas de alumínio

Indicação Numérica	Principal Elemento de Liga
1XXX	Alumínio Puro
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício

5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outro Elemento de Liga
9XXX	Série livre

Fonte: THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 2021

O alumínio fundido tem a capacidade de dissolver outros materiais e metaloides, como o silício, que se comporta como um metal. Por isso, durante o processo de resfriamento e solidificação do alumínio, alguns dos componentes da liga podem permanecer em solução sólida, resultando em uma estrutura atômica mais rígida do metal.

Nesse caso, os átomos se organizam em uma rede cristalina regular, formando moléculas de tamanhos diferentes das do elemento principal da liga. O objetivo principal das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem comprometer outras propriedades. Assim, novas ligas têm sido desenvolvidas buscando obter as propriedades necessárias para cada tipo de aplicação.

Na Tabela 5 é possível observar alguns dos elementos mais utilizados na fabricação de ligas de alumínio, bem como as suas respectivas influências nas ligas fabricadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007).

Tabela 5 - Influência dos elementos de liga

Elemento	Influência
Cobre	Aumenta resistência mecânica
Manganês	Aumenta resistência mecânica e a resistência a corrosão, em particular a resistência a corrosão sob tensão
Silício	Aumenta a resistência à corrosão e melhora as características de fundição
Magnésio	Aumenta a resistência mecânica e a resistência a corrosão em geral, além de proporcionar maior facilidade na soldagem
Zinco	Aumenta a resistência mecânica e a resistência a corrosão em meios alcalinos, além de proporcionar maior facilidade na soldagem

Fonte: MOREIRA, 2012

A descoberta do “envelhecimento” das ligas contendo magnésio e silício levou ao desenvolvimento das principais ligas estruturais de alumínio utilizadas atualmente na engenharia. Esse foi um trabalho pioneiro no campo das ligas de alumínio-magnésio, que hoje são amplamente utilizadas na indústria naval. Entre as ligas de alumínio mais utilizadas na construção naval, destacam-se as séries 5000, 6000 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007).

Em relação ao tratamento térmico, as ligas de alumínio são geralmente classificadas de acordo com sua sensibilidade a esse processo. No entanto, essa sensibilidade está diretamente relacionada às resistências mecânicas das ligas. Por exemplo, ligas de alumínio tratáveis termicamente, como as das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX, podem ser endurecidas por um processo de envelhecimento, no qual ocorre a precipitação de fases intermetálicas. Por outro lado, as ligas que não apresentam um aumento significativo na resistência mecânica devido à precipitação de fases durante o tratamento térmico são classificadas como não tratáveis termicamente, como é o caso das ligas das séries 1XXX, 3XXX e 5XXX (COELHO, 2013).

É importante exercer cautela ao classificar as ligas de alumínio como tratáveis ou não tratáveis termicamente, pois, mesmo as ligas consideradas não tratáveis termicamente podem sofrer influências significativas da temperatura em suas propriedades. Um exemplo são as ligas Al-Mg da série 5XXX. Quando o teor de magnésio dessas ligas ultrapassa o limite de solubilidade em temperatura ambiente (superior a 3,0% em peso de Mg), podem ocorrer, em condições termodinâmicas favoráveis, a formação de precipitados nos contornos de grão, como o Mg_2Al_3 . Esses precipitados, em vez de aumentar a dureza da liga, podem gerar problemas como a maior suscetibilidade à corrosão nos contornos de grão e a diminuição da resistência à corrosão sob tensão (COELHO, 2013).

Já as ligas da série 5000, como a 5083 e a 5086, são amplamente utilizadas devido à sua resistência adequada à corrosão e à capacidade de manter essa resistência mesmo em baixas temperaturas. Elas são particularmente adequadas para a construção de cascos e estruturas expostas à água salgada (COELHO, 2013).

Em virtude das excelentes propriedades mecânicas, uma escolha normalmente utilizada consiste no emprego da liga de alumínio 5083 (5,2% de magnésio, 0,1% de manganês e 0,1% de cromo) nas partes do casco expostas à água. Pois essa liga se destaca por sua alta resistência à corrosão, especialmente em ambientes marinhos e corrosivos, o que prolonga a durabilidade da estrutura do navio contra os efeitos da

exposição à água salgada e outros elementos corrosivos. Já a existência de magnésio melhora as propriedades de endurecimento a frio e aumenta a resistência a corrosão dessa liga (COSENTINO,2014). Por fim, é importante mencionar que a liga 5083 também é altamente soldável, facilitando tanto o processo de fabricação quanto o reparo das estruturas navais. Essa característica permite uma montagem eficiente e confiável, além de possibilitar reparos rápidos em caso de danos, o que é fundamental para a operação contínua das embarcações.

Na Figura 17 é possível observar a estrutura interna de um catamarã em alumínio, mostrando os reforçadores e o chapeamento da embarcação.

Figura 17 - Construção de um casco em alumínio



Fonte: INCAT SHIPYARD, 2024

As ligas da série 6000 têm na sua composição o magnésio e o silício como principais elementos, que buscam um melhor compromisso com a ductilidade, a resistência a corrosão e a fadiga. A combinação desses elementos resulta na formação de um composto intermediário Mg^2Si , cuja precipitação tem um papel importante no endurecimento, o qual aumenta a resistência mecânica dessa liga. No entanto, o excesso de silício aumenta a resistência a corrosão em meio alcalino e facilita a conformação plástica, mas aumenta a tendência à corrosão intragranular. Já o excesso de magnésio aumenta a resistência a corrosão, mas diminui a capacidade de conformação plástica e a resistência mecânica (SILVA, 2019).

Alguns exemplos de aplicação são as ligas 6061 e a 6063, que são conhecidas pela sua combinação de resistência mecânica e facilidade de soldagem, sendo geralmente aplicadas em estruturas de embarcações que pedem uma boa relação resistência-peso e alta resistência à corrosão (SILVA, 2019).

Além das séries convencionais, também existem ligas de alumínio especialmente desenvolvidas para atender às necessidades específicas de cada projeto de embarcação. Essas ligas podem ser adaptadas levando em consideração diversos fatores, tais como: resistência mecânica, peso e resistência à corrosão.

O alumínio se destaca como um material versátil e eficiente na construção naval, especialmente no projeto estrutural de catamarãs, devido às suas propriedades físicas e mecânicas. A escolha da liga de alumínio adequada, desempenha um papel importante na garantia da segurança, durabilidade e desempenho da embarcação, contribuindo assim para o sucesso do projeto.

5.5 AÇO CARBONO

Em geral, o aço utilizado na construção naval apresenta as vantagens de ter um preço acessível, uma fácil disponibilidade e promover uma rápida construção. No entanto, suas desvantagens incluem: o peso elevado, altos custos de manutenção e a necessidade de isolamento térmico (MIGUEIS, 2005). Na Tabela 6 são apresentadas algumas das propriedades mecânicas do aço Naval.

Tabela 6 - Propriedades do Aço A36

Propriedades	Unid	Aço
Densidade	g/cm ³	7,86
Módulo de Elasticidade	Gpa	205
Coefficiente de Poisson	---	0,29
Tensão de Ruptura	MPa	450
Tensão de Tração	MPa	400
Tensão de Compressão	MPa	400

Fonte: Adaptado Mancelos et al, 2015.

Conforme pode ser visto na Tabela 6, o aço A36 possui um peso específico elevado, limitando seu uso em catamarãs, sendo viável apenas para grandes veleiros tradicionais (monocascos) com mais de 30 metros de comprimento.

5.6 VANTAGENS DO ALUMÍNIO NA CONSTRUÇÃO NAVAL

A utilização do alumínio na construção naval oferece diversos benefícios, como maior desempenho e eficiência, pois embarcações de mesmo porte feitas de alumínio são significativamente mais leves do que aquelas construídas com aço, permitindo maior capacidade de carga e menor consumo de combustível.

Além disso, o alumínio é altamente resistente à corrosão, o que reduz a necessidade de manutenção ao longo do tempo. Já a maior maleabilidade do material também possibilita aos projetistas criarem barcos com diferentes formatos e características, adequando os projetos para uma grande variedade de usos (THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 2021).

Outro ponto relevante é a alta reciclabilidade do alumínio, sendo que, de acordo com The Aluminium Association (2021), 75% de todo o alumínio produzido ainda está em uso. Isso ocorre pois esse material pode ser reciclado repetidamente sem perder suas propriedades mecânicas, contribuindo para a preservação ambiental e promovendo a sustentabilidade na indústria naval.

Embora, para uma produção em série, a produtividade da construção de embarcações multicasco em compósito seja imbatível, para catamarãs personalizados com comprimento entre 50 e 200 pés, o alumínio volta a ser competitivo.

Um catamarã personalizado em compósito pode ser ligeiramente mais caro de construir, mas apresentará uma vantagem em desempenho. Já quando se busca por mais conforto do que velocidade, o alumínio é uma escolha sensata. Qualquer proprietário que busque um iate rápido, escolheria uma embarcação multicasco. Logo, construir um catamarã de 35 pés em metal seria uma contradição com o objetivo do projeto. No entanto, conforme já foi discutido, o alumínio apresenta vantagens para iates maiores, embarcações de pesquisa únicas ou barcos de trabalho.

Por fim TARJAN (2008) sintetiza a discussão dizendo que quanto maiores são os navios e quanto menos o foco está no desempenho, mais a construção em alumínio pode ser justificada.

5.6.1 AÇO X ALUMÍNIO

Observando os dados da Tabela 3, a qual compara as características do alumínio com o aço, é possível constatar que o alumínio tem uma combinação excepcional de propriedades, que o faz ser um dos materiais mais versáteis utilizados

na engenharia e na indústria em geral. Possuindo um ponto de fusão de 660°C, relativamente baixo em comparação ao do aço, que é da ordem de 1570°C, seu peso específico é 2,7g/cm³, aproximadamente 30% do peso específico do aço.

Já condutibilidade térmica, por sua vez, pode ser até 4,5 vezes maior que a do aço. Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Além disso, não produz faíscas, uma característica importante para sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas.

Tabela 7 - Propriedades físicas: Alumínio e Aço A36

Propriedades Físicas típicas	Alumínio	Aço
Densidade (g/cm ³)	2,7	7,86
Temperatura de fusão (°C)	660	1500
Módulo de Elasticidade (Mpa)	70000	205000
Coeficiente de Dilatação Térmica (L/°C)	23.10-6	11,7.10-6
Condutibilidade Térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12
Condutibilidade Elétrica (%IACS)	61	14,5

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007

Como já citado anteriormente, a densidade do aço é aproximadamente três vezes maior que a do alumínio. Por essa razão, embarcações feitas em aço são mais pesadas, e por isso, normalmente são mais estáveis e robustas, entretanto esse maior peso resulta em um maior consumo de combustível e/ou menores velocidades.

As embarcações construídas em alumínio por serem mais leves, podem oferecer maior velocidade e melhor eficiência. Sua menor densidade pode exigir, em alguns casos, chapas mais espessas, para conseguir garantir a mesma resistência que o aço. As espessuras geralmente utilizadas para a construção de embarcações vão de 3mm a 12mm para o aço e de 2mm a 10mm para o alumínio.

Lamb (2010) estima que, para uma fragata de 91 metros, a utilização do alumínio reduziria o deslocamento total da embarcação de 2.627 toneladas para 2.122 toneladas, ou seja, uma redução de aproximadamente de 19%. Essa redução de peso levaria a uma economia apenas no combustível de 2.840 toneladas por ano, o que, a preços de 2010 de U\$ 450 por tonelada, equivaleria a uma economia anual de U\$ 1,3

milhão, ou U\$ 32 milhões ao longo de um ciclo de vida de 25 anos. O custo estimado de aquisição (sem o custo do sistema de combate) aumentaria de U\$ 356 milhões para U\$ 383 milhões, ou U\$ 27 milhões, o que é compensado pelos custos reduzidos de combustível, ainda mais se os preços atuais continuarem a crescer.

6. APLICAÇÕES PRÁTICAS

Neste capítulo são abordadas as diversas aplicações dos catamarãs de alumínio, destacando sua importância, versatilidade e eficiência. Ao compreender melhor esse tipo de embarcação, é possível entender por que essas embarcações conseguem atender a demandas que as embarcações monocascos não conseguem, além de permitir o desenvolvimento de projetos mais eficientes capazes de atender as crescentes demandas do setor marítimo.

6.1 CATAMARÃ DE PASSAGEIROS E TURISMO

Os catamarãs com o foco em turismo são pensados para o conforto e a diversão dos passageiros, podendo variar desde modelos pequenos para atividades de um dia, como a pesca recreativa ou passeios turísticos, até catamarãs maiores, com instalações de luxo para cruzeiros de vários dias. Geralmente apresentam uma distribuição de espaço que inclui áreas de convés espaçosas para relaxamento ao ar livre, cabines confortáveis para descanso e entretenimento, banheiros e em alguns casos, contam até com cozinhas compactas ou áreas para churrasco.

Além de serem utilizados como barcos de recreio, os catamarãs também têm sido amplamente utilizados para o transporte de passageiros (Figura 18), onde a velocidade é um fator importante para o projeto.

Figura 18 - Catamaran The Beast



Fonte: LOMOcean, 2024

Os catamarãs destinados ao transporte de passageiros são projetados para oferecer um serviço eficiente e confortável, geralmente operando em rotas costeiras ou inter-ilhas. Esses navios variam desde pequenos catamarãs utilizados para transporte público até grandes ferryboats, capazes de acomodar centenas de pessoas e veículos.

Normalmente os catamarãs de transporte de passageiros são equipados com assentos confortáveis, áreas de estar internas e externas, banheiros, e, em alguns casos, sistemas de entretenimento e áreas de recreação para as crianças (INCAT SHIPYARD, 2024). Por exemplo, na Figura 19 pode ser visto o catamarã Jaume III utilizado na travessia Ciutadella - Alcúdia na Espanha.

Figura 19 - Catamarã de Travessia (JAUME III)



Fonte: INCAT SHIPYARD, 2024.

6.2 CATAMARÃ SERVIÇOS MARÍTIMOS

Os catamarãs de serviço marítimos são caracterizados por sua robustez, estabilidade e capacidade de operar nas mais diversas condições climáticas, sendo utilizados para atividades como busca e salvamento, transporte de carga e manutenção offshore. Entre os sistemas a bordo, esses navios podem ser equipados com guinchos, guindastes ou plataformas de trabalho para facilitar as operações em alto mar (LOMOCEAN, 2024).

Por exemplo, o Catamarã MV Offshore Guardian (Figura 20) possui propulsores elétricos na proa e na popa que contribuem para seu posicionamento dinâmico, capacidade para lançar veículos subaquáticos operados remotamente, a-frame, capacidade para geração elétrica e um convés reforçado que permite o apoio das atividades offshore.

Figura 20 - Catamarã MV Offshore Guardian



Fonte: LOMOCEAN, 2024

6.3 CATAMARÃ MILITAR E DE DEFESA

Já os catamarãs desenvolvidos para fins militares e de defesa são projetados com ênfase na operação em altas velocidades e excelente capacidade de manobra. Essas embarcações podem alcançar grandes velocidades e realizar manobras ágeis e precisas, o que é crucial para operações militares eficazes. Além disso, são capazes de transportar uma quantidade significativa de carga, incluindo equipamentos militares, pessoal e suprimentos.

Esses catamarãs são versáteis e podem ser adaptados para uma variedade de missões, como busca e salvamento, transporte de tropas, apoio logístico e operações de combate. Eles são equipados com tecnologia avançada em comunicação, navegação e sistemas de armamento, assegurando alto desempenho e eficiência em operações no campo (INCAT SHIPYARD, 2024).

Por exemplo, no projeto do Reef Resilience (INCAT SHIPYARD, 2024), foi empregada a dinâmica de fluidos computacional (CFD) na otimização do projeto do

casco, sendo que a eficácia desse processo foi confirmada por testes independentes de velocidade e desempenho nas instalações de tanques de reboque do Australian Maritime College (AMC). Equipado com dois motores principais MAN D2862 LE463, a embarcação opera a uma velocidade de 20 nós, oferecendo eficiência notável em termos de RPM e consumo de combustível. Testes recentes em alto-mar revelaram que a embarcação pode alcançar a velocidade máxima de 27 nós e para aprimorar o conforto da tripulação, são utilizados interceptores com compensação automática e controle de passeio ativo.

O High Speed Support Vessel (HSSV) (Figura 21) representa uma solução multifuncional de suporte militar, baseada na plataforma consolidada de catamarã de alta velocidade desenvolvida pela Austal. Essa embarcação de calado raso e porte médio é projetada para oferecer desempenho ágil e alta capacidade de manobra, combinando alta velocidade com uma elevada capacidade de carga, adequada para o transporte de tropas, equipamentos, veículos e outros itens. Equipado com um extenso convés para veículos, uma plataforma para helicópteros, uma rampa de popa e um guindaste, o HSSV está preparado para realizar uma ampla gama de missões militares e humanitárias (AUSTAL, 2024).

Figura 21 - High Speed Support Vessel



Fonte: AUSTAL, 2024.

6.4 OUTRAS APLICAÇÕES

Algumas outras aplicações para catamarãs de alumínio estão na área da pesquisa ambiental, pois, por ser um material sustentável e reciclável, a escolha do alumínio aumenta a eficiência energética em virtude do menor consumo de combustível associado a esse tipo de embarcação.

Nesse sentido, a capacidade de operar em águas rasas se torna uma vantagem para a pesquisa ambiental, pois possibilita o acesso a áreas costeiras, manguezais e outros habitats que podem ser inacessíveis para embarcações maiores. Além disso, a grande estabilidade transversal dos catamarãs é ideal para a realização de trabalhos de campo, pois permitem a coleta de dados e amostras de forma segura e eficiente, mesmo em condições de mar agitado.

Por exemplo, o navio de pesquisa mostrado na Figura 22 integra uma forma de casco que combina simetria e assimetria, com quebra-ondas na proa e hidrofólios. O casco e seus componentes são projetados para dissipar a ação das ondas, garantindo um menor arrasto e um maior conforto para os passageiros. Os hidrofólios de popa criam uma elevação vertical nas velocidades de semi-planeio, o que reduz o ângulo de trim na entrada do regime de planeio. Isso diminui significativamente tanto a necessidade de potência quanto a formação de marolas à baixas velocidades. Já o hidrofólio principal reduz a potência necessária para manter a velocidade de serviço, resultando em uma redução substancial no consumo de combustível e nos custos operacionais, além de melhorar a navegabilidade, especialmente em mares agitados (ALL AMERICAN MARINE, 2024).

Figura 22 - Catamarã IMUA



Fonte: ALL American Marine, 2023

Os catamarãs também desempenham um papel importante como embarcações auxiliares em instalações de aquicultura (Figura 23) e em atividades subaquáticas. Essas embarcações são projetadas para atender às necessidades da pesca costeira, cultivo de mariscos, cultivo de mexilhões e outras operações relacionadas. Nesses casos elas são empregadas no transporte de ração e peixes, na mudança de redes, e na limpeza de lagos e rios, oferecendo versatilidade e eficiência em uma variedade de tarefas (ELIMAT, 2024).

Figura 23 - Catamarã para aquicultura



Fonte: ELIMAT, 2024.

7. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A construção de catamarãs de alumínio apresenta desafios e considerações específicas que precisam ser rigorosamente avaliadas para assegurar o sucesso do projeto. Embora o alumínio ofereça resistência à corrosão em ambientes marinhos, é essencial implementar processos adicionais de proteção anticorrosiva para manter a integridade estrutural da embarcação. Além disso, a soldagem do alumínio requer técnicas especializadas para evitar defeitos e garantir a durabilidade das juntas. Outro aspecto fundamental é a fadiga do material, que deve ser cuidadosamente monitorada e gerenciada ao longo do ciclo de vida da embarcação.

7.1 DESAFIOS NA CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO

Embora as ligas de alumínio das séries 5xxx e 6xxx sejam amplamente empregadas na construção marítima, ainda existem lacunas significativas no conhecimento básico dessas ligas. (COLLETTE; SIELSKI, 2015).

Nesse sentido, as maiores deficiências estão relacionadas às propriedades de fadiga e à tenacidade à fratura, especialmente a tenacidade à fratura dinâmica. Muitos dos dados disponíveis sobre fratura são provenientes de testes não padronizados e, portanto, podem ser inválidos. Além disso, existe uma grande variabilidade nas propriedades mecânicas do alumínio em decorrência do processo de soldagem, sendo que o material soldado apresenta menor rigidez e resistência do que o material em seu estado original (COLLETTE; SIELSKI, 2015).

Embora os catamarãs de alumínio ofereçam várias vantagens, como leveza e durabilidade, seu uso pode ser mais oneroso se comparado a materiais como aço ou fibra de vidro. Portanto, é fundamental gerenciar os custos durante o processo de construção para garantir que o projeto permaneça dentro do orçamento e seja economicamente viável.

7.1.1 CORROSÃO

A resistência à corrosão é influenciada tanto pelo ambiente quanto pelos metais envolvidos. As variáveis associadas à liga que afetam a corrosão incluem sua composição química e o processo de fabricação. Esses fatores determinam a

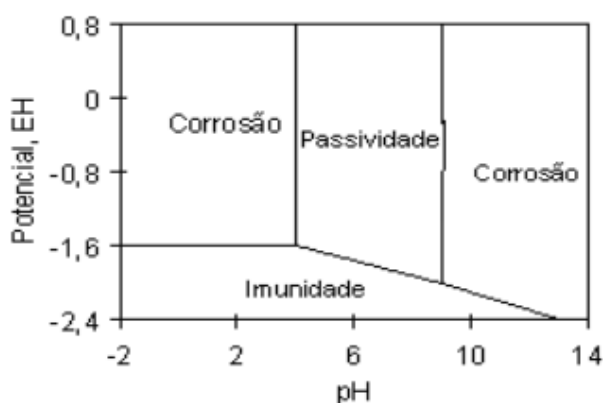
microestrutura, a qual desempenha um papel fundamental na ocorrência e no tipo de corrosão desenvolvida. Outro aspecto que exerce grande influência nesse fenômeno é o projeto estrutural, incluindo o dimensionamento das juntas, a presença de soldas e a interação com outros materiais (SCARABOTTO, 2018).

Os problemas de corrosão no alumínio e suas ligas geralmente ocorrem quando a camada passiva formada na superfície do metal é comprometida e não se regenera devido às condições ambientais. Em ambientes que contêm íons de cloreto (Cl⁻), por exemplo, é comum a ocorrência de corrosão por pites no alumínio. Essa camada passiva que, em circunstâncias ideais, pode se regenerar automaticamente, deixa de se regenerar na presença de íons de cloreto, resultando na corrosão localizada (FERRARI, 2011).

A estabilidade do alumínio em função do pH é representada no diagrama de Pourbaix (Figura 24), onde é possível identificar três regiões distintas:

- A região de imunidade, onde o alumínio é termicamente estável e não sofre corrosão;
- A região de passivação, onde ocorre a formação de um filme de óxido na superfície do alumínio;
- A região de corrosão ativa, onde o alumínio é termodinamicamente instável, podendo se dissolver e formar íons, sofrendo a corrosão.

Figura 24 - Diagrama Pourbaix Alumínio



Fonte: FERRARI, 2011.

Para proteger o alumínio contra a corrosão e aumentar sua durabilidade, podem ser aplicados revestimentos de proteção, cujo princípio básico é impedir o contato entre o meio corrosivo e o material a ser protegido.

As ligas de alumínio podem ser revestidas por diferentes processos, incluindo anodização, eletrodeposição, cromatização, tratamento nanocerâmico, fosfatização e pintura (SCARABOTTO, 2018).

Um aspecto importante na utilização do alumínio em estruturas navais é garantir sua compatibilidade com outros materiais presentes na embarcação. A eventual incompatibilidade pode resultar em corrosão galvânica, sendo essencial empregar materiais compatíveis ou utilizar barreiras isoladoras apropriadas para evitar a corrosão.

7.1.2 SOLDAGEM

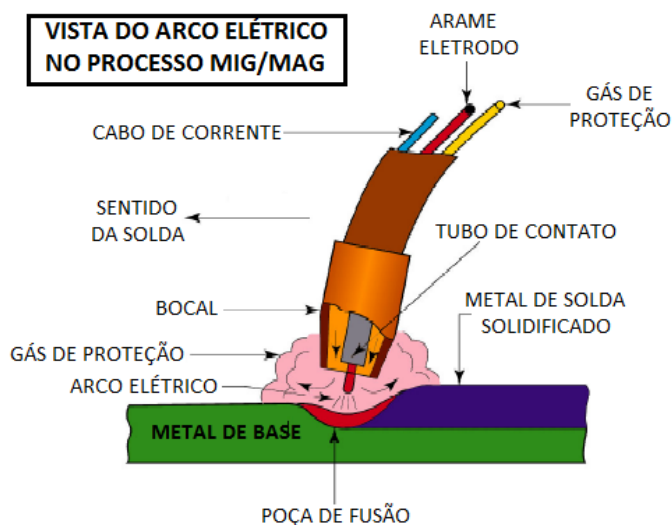
O processo de soldagem do alumínio e suas ligas é uma tarefa complexa, especialmente quando comparada à soldagem de aços, que tem um longo histórico de uso na indústria e uma vasta literatura disponível.

Diferentemente do aço, o alumínio possui propriedades físicas e químicas que tornam o processo de soldagem mais desafiador, sendo que a formação de porosidades é uma das principais dificuldades encontradas nesse processo.

A formação de porosidades durante a soldagem do alumínio ocorre devido à alta solubilidade de gases como hidrogênio no metal líquido, que podem se tornar bolhas quando o metal se solidifica. A presença dessas bolhas pode comprometer a integridade estrutural da solda, tornando essencial o controle rigoroso das condições de soldagem e a utilização de técnicas adequadas para minimizar a introdução de gases durante o processo (PEREIRA, 2010).

O método mais amplamente utilizado para a soldagem de alumínio é o MIG (Metal Inert Gas). Esse processo emprega um fio de eletrodo consumível que é alimentado continuamente, sendo que durante o processo, um arco elétrico é estabelecido na extremidade desse fio. O eletrodo, o arco, a área fundida e a peça a ser soldada são protegidos da contaminação atmosférica por meio de um fluxo de gás ativo (MAG - Metal Active Gas) ou inerte (MIG - Metal Inert Gas), o qual é direcionado através da tocha de soldagem (Figura 25).

Figura 25 - Esquema do processo de soldagem MIG/MAG



Fonte: SUMIG, 2024.

Segundo QUINTINO (2012), a soldagem MIG/MAG é um método eficaz para evitar a contaminação do alumínio durante o processo de soldagem, garantindo uma junção mais forte e durável.

Devido às dificuldades inerentes à soldagem de ligas de alumínio, sua utilização em larga escala é mais desafiadora. A expansão térmica do alumínio é aproximadamente o dobro da observada no aço, e durante o processo de solidificação, as soldas de alumínio sofrem uma contração volumétrica de cerca de 6%. Essa mudança dimensional pode levar a distorções e trincas, exigindo uma abordagem específica para a fabricação de cascos de alumínio. Nesse caso é necessário empregar estratégias diferenciadas para mitigar esses efeitos e garantir a integridade estrutural das soldas realizadas em estruturas navais (COSENTINO, 2014).

A abordagem mais adotada envolve iniciar a construção com um "esqueleto" formado por perfis estruturais (Figura 26), que são posteriormente revestidos com chapas de alumínio. Esse método apresenta vários desafios, especialmente na soldagem dos reforçadores às chapas. O principal obstáculo nessa abordagem está no acesso limitado do operador aos espaços confinados, o que pode comprometer a qualidade da solda. Além disso, a necessidade de posicionar as máquinas de solda (MIG ou TIG) próximas à junta a ser soldada pode complicar ainda mais o processo. Esse cenário não apenas demanda um tempo significativo, mas também aumenta o risco de comprometimento da integridade da solda (COSENTINO, 2014).

Figura 26 - Soldagem da estrutura do casco



Fonte: Autor, 2023

Devido a esses desafios, a soldagem do alumínio deve ser realizada com extremo cuidado, pois esse é um ponto crítico na fabricação de embarcações de alumínio, sendo essencial assegurar que todas as soldas sejam executadas com precisão e em conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos.

A adoção de técnicas de soldagem adequadas, combinada com processos de inspeção mais rigorosos, é fundamental para assegurar a integridade estrutural da embarcação e prevenir falhas prematuras. Na Figura 27 é mostrado o processo de soldagem aplicada na estrutura de uma embarcação de alumínio.

Figura 27 - Solda realizada em uma estrutura de alumínio



Fonte: Autor, 2023

7.1.3 FADIGA

A fadiga é outro fator que deve ser considerado no projeto estrutural e na gestão de navios com peso reduzido, onde, para maximizar o desempenho operacional, busca-se projetar estruturas com as menores espessuras possíveis.

Esses navios são construídos geralmente em ligas de alumínio com grau marítimo ou aço de alta resistência que, por serem mais resistentes, levam a espessuras ainda menores, favorecendo o surgimento de trincas por fadiga.

Na Figura 28 são mostradas algumas regiões da estrutura onde o surgimento de trincas é mais comumente observado. (MAGOGA, 2023).

Figura 28 - Principais pontos de surgimento de trincas no alumínio



Fonte: (MAGOGA, 2023).

Os métodos para avaliar a resistência a fadiga de juntas soldadas incluem a abordagem de tensão nominal, tensão de ponto crítico, tensão efetiva de entalhe, a mecânica da fratura e os testes de componentes. Os detalhes de cada método fogem ao escopo desse trabalho, mas podem ser vistos em MAGOGA (2023).

7.2 TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A construção de catamarãs de alumínio emprega uma variedade de tecnologias avançadas para assegurar sua eficiência, segurança e longevidade. Entre os aspectos cruciais desse processo está a soldagem. Técnicas modernas de soldagem, como a soldagem por fricção, são empregadas para criar juntas mais robustas e duráveis, minimizando o risco de fissuras e falhas estruturais. (CARDENAS, 2011).

Esses novos métodos de união foram desenvolvidos para superar as dificuldades associadas aos processos de soldagem a arco elétrico em materiais como o alumínio. Um exemplo notável é a soldagem por fricção-agitação, que é realizada no estado sólido e evita os problemas típicos associados à transição do material soldado do estado líquido para o sólido durante o resfriamento. As ligas metálicas unidas por esse método passam por mudanças de temperatura e tensões térmicas internas muito menores do que aquelas observadas nos processos de soldagem por fusão. Como resultado, as alterações na microestrutura e nas propriedades mecânicas nas zonas termicamente afetadas pela soldagem são minimizadas, proporcionando características metalúrgicas e mecânicas superiores (CARDENAS, 2011).

A transição para a propulsão elétrica vai além da simples troca dos motores movidos a combustíveis fósseis. Ela exige uma revisão abrangente do projeto do navio para garantir a máxima eficiência. Para que um navio movido a energia elétrica alcance seu potencial completo, ele precisa ser o mais leve possível. Navios de grande deslocamento feitos de aço, por exemplo, exigem muito mais energia para operar do que navios de deslocamento leve construídos em alumínio (INCAT SHIPYARD, 2024).

A operadora Baleària foi inovadora ao introduzir geradores movidos a gás natural liquefeito (GNL) em sua frota, sendo pioneira em acordos com fornecedores de combustível e maquinário. O GNL é um dos combustíveis fósseis menos prejudiciais ao meio ambiente. Seu uso reduz as emissões de CO₂ em 30%, NO_x em 35%, além de eliminar a emissão de enxofre e de outras partículas. Segundo a INCAT SHIPYARD (2024), o uso do GNL, combinado com a otimização do formato de casco, pode resultar em um consumo de combustível menor quando comparado a outras embarcações de mesmo porte.

8. MULTICASCO MILITAR EM ALUMÍNIO

Neste tópico, será discutido o caso dos multicascos (trimarãs) da Marinha dos Estados Unidos, que representaram uma inovação significativa na construção naval moderna, especialmente no âmbito das embarcações militares. Construídos em alumínio, o estudo dos Littoral Combat Ships (LCS) reforça a viabilidade e as vantagens do emprego desse material em embarcações de alto desempenho. No entanto, apesar das significativas vantagens tecnológicas e operacionais, as embarcações Littoral Combat Ships (LCS) também enfrentaram diversos problemas ao longo de seu desenvolvimento e operação. Esta seção visa analisar e entender esses desafios para oferecer um contexto mais realista e prático sobre o uso do alumínio na construção dessas embarcações.

8.1 LITTORAL COMBAT SHIP

A classe LCS possui duas variantes distintas: a Freedom e a Independence, as quais foram desenvolvidas por equipes diferentes e construídas também por empresas diferentes. A variante Freedom (um monocasco de aço) é liderada pela Lockheed Martin e construída no estaleiro Fincantieri Marinette Marine Corporation, em Wisconsin. Já a variante Independence (um trimarã de alumínio) (Figura 29), foi desenvolvida pela General Dynamics Bath Iron Works e são construídos no estaleiro da empresa Austal USA localizado no Alabama (AUSTAL, 2024).

Figura 29 - LCS Independence



Fonte: AUSTAL, 2024

O Navio de Combate Litorâneo (LCS) da variante Independence é uma embarcação multimissão de alta velocidade e baixo calado, projetada para operar de forma independente ou integrada a um grupo de batalha.

Essa classe de navio oferece à Marinha dos Estados Unidos uma plataforma versátil e letal, apta a conduzir operações tanto em zonas costeiras quanto em mar aberto. Com as recentes atualizações de armamentos, incluindo o míssil Naval Strike, o LCS ampliou seu leque de missões no Pacífico Ocidental, abrangendo operações de Liberdade de Navegação (AUSTAL, 2024).

Diante desse cenário, os navios LCS foram desenvolvidos para enfrentar ameaças litorâneas emergentes e assegurar o acesso e o controle das águas costeiras, se destacando como um combatente de superfície rápido, de fácil manobra e capaz de operar em grupos, oferecendo capacidades de combate essenciais e flexibilidade operacional. Isso o torna apto a executar missões especializadas, como guerra de superfície, busca por minas e combate a submarinos. A combinação de alta velocidade, manobrabilidade e poder de fogo permite que o LCS responda rapidamente a diversas ameaças, garantindo a superioridade marítima em zonas costeiras estratégicas (AUSTAL, 2024).

Os projetos originais dos navios LCS foram, em parte, inspirados em balsas de alta velocidade para carros e passageiros, uma escolha pouco convencional para embarcações de guerra. Priorizando a velocidade e a manobrabilidade, esses navios não foram concebidos para suportar grandes danos, pois a aplicação de blindagem pesada comprometeria a leveza essencial para a operação eficaz em áreas costeiras. O resultado foi um projeto reconhecido como um dos navios de guerra mais rápidos do mundo, capazes de realizar operações próximas à costa, superar embarcações maiores e perseguir as menores; além de ter uma construção rápida, feita em grandes quantidades e com custos reduzidos (SAPIEN, 2023).

8.2 PROBLEMAS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO

Na Marinha dos EUA, o conceito de modularidade foi aplicado aos navios de combate litorâneo (LCS), os quais foram projetados para acomodar módulos em contêineres intercambiáveis. Inicialmente, esses módulos foram desenvolvidos para três funções principais: combate a submarinos, caça-minas e operações contra pequenas embarcações. A ideia era permitir uma rápida troca dos módulos para

adaptar o navio às diferentes missões, permitindo que o navio se adaptasse facilmente a futuras atualizações tecnológicas (U.S NAVAL INSTITUTE, 2023).

Apesar dessa abordagem modular, os navios não tiveram seus módulos trocados para reconfigurar as missões durante o serviço. Além disso, os três tipos de missão para os quais os módulos foram projetados exigiam características conflitantes em termos de sobrevivência e manobrabilidade. Por exemplo, um caça-minas não necessita de alta velocidade, e, na verdade, velocidade pode ser uma desvantagem para essa missão. Já para a guerra antissubmarina, cascos maiores e motores silenciosos são mais vantajosos. Portanto, o navio de combate litorâneo acabou se tornando um tipo de embarcação versátil, mas que não se especializou em nenhuma dessas funções de maneira eficaz (U.S NAVAL INSTITUTE, 2023).

Uma das críticas mais significativas ao LCS é que a Marinha dos Estados Unidos iniciou a produção em massa dessas embarcações sem uma compreensão clara de como seriam utilizadas operacionalmente. Essa falta de definição estratégica na fase inicial resultou em várias complicações e limitações que somente foram percebidas posteriormente (HECKMANN, 2024).

A ausência de um conceito operacional bem delineado fez com que muitos dos recursos e capacidades do LCS não fossem totalmente aproveitados ou fossem inadequados para as missões designadas. A decisão de avançar com a construção antes de concluir um planejamento detalhado das funções e usos do navio comprometeu sua eficácia e gerou críticas sobre a gestão do projeto. Além disso, resultou em desafios significativos relacionados à integração de sistemas, adaptação de tecnologias e treinamento de pessoal, que poderiam ter sido mitigados com um planejamento mais robusto e bem fundamentado (HECKMANN, 2024).

Embora possam existir outras maneiras de realizar as três principais missões originalmente pensadas para essa classe de navios, o programa LCS foi planejado especificamente para suprir essa demanda, e ainda é a opção mais econômica para atender a essas necessidades. Os críticos do programa LCS não fornecem estudos detalhados que demonstrem uma alternativa de melhor custo-benefício para cumprir essas três missões essenciais (ZIEZULEWICZ, 2022).

Os primeiros navios de novas classes da Marinha frequentemente encontram desafios de projeto e construção. Abordar e corrigir esses problemas nos navios de combate litorâneo (LCS) não aumentará significativamente o custo de aquisição das unidades subsequentes. Portanto, o programa LCS manterá sua eficiência econômica

original na execução das três missões principais para as quais foi planejado (ZIEZULEWICZ, 2022).

O projeto da variante Independence apresentou desafios em termos de docagem em alguns portos internacionais. O casco de alumínio torna o navio vulnerável a danos. Por exemplo, a tripulação do USS Coronado (LCS-4) relatou que o navio não estava equipado com defensas adequadas para prevenir danos durante as operações de reabastecimento (GAO, 2022).

Ao atravessar o Canal do Panamá, a tripulação teve que usar defensas de navios com casco de aço para a proteção. Além disso, a tripulação observou que, devido ao design da variante Independence, a porta do hangar não selava completamente, comprometendo a vedação estanque necessária. Sem essa vedação, o hangar, utilizado para armazenar equipamentos, armas e materiais, poderia ser inundado por água ou combustível. Como resultado, uma equipe adicional era necessária para monitorar eventuais derramamentos de combustível ou inundações. Segundo oficiais da Marinha, o LCS atualmente atende aos requisitos de projeto para a porta do hangar, garantindo a vedação estanque necessária (GAO, 2022).

8.3 FADIGA ESTRUTURAL ALUMÍNIO

A decisão de utilizar alumínio na construção da classe Independence foi claramente orientada para aumentar a manobrabilidade e a velocidade, aproveitando a experiência prévia com projetos de balsas de alta velocidade. No entanto, essa escolha pode ter tornado os navios mais suscetíveis a danos, fadiga estrutural e corrosão. Esse aspecto tem sido amplamente discutido e debatido no contexto do programa da classe Independence (HELFRICH, 2022).

A fadiga do metal é analisada considerando os estresses nas direções lateral e vertical. Assim, para conter a propagação de trincas, foram estabelecidas limitações tanto na velocidade da embarcação quanto nas condições do mar em que ela opera (ZIEZULEWICZ, 2022).

Os estudos mostraram que os navios da classe Independence que estão comprometidos estruturalmente necessitarão substituir as chapas de convés e chapas do casco por materiais mais espessos, uma tarefa que pode ser realizada tanto pela Austal quanto pela Marinha. A adição de chapas mais espessas pode acarretar novos desafios, como o aumento do peso, que pode resultar na redução da velocidade da

frota, mesmo com as várias compensações de projeto originalmente planejadas para garantir a alta velocidade (HELFRICH, 2022).

Além disso, a reparação de chapas de alumínio apresenta um desafio significativo, pois, diferentemente das fissuras por fadiga, que se concentram em detalhes estruturais específicos, grandes áreas das chapas podem ser afetadas pela sensibilização. Quando uma área sensibilizada é reparada, a recorrência de fissuras pode ocorrer rapidamente, muitas vezes devido ao estresse residual das soldas de reparo. Esse processo de reparação exige o corte e a substituição de extensas áreas do casco, o que pode ser extremamente dispendioso, especialmente quando envolve a remoção e reinstalação de sistemas do navio. Como solução temporária, estão sendo realizados experimentos para sobrepor áreas sensibilizadas com plástico reforçado com fibra de vidro laminado no local (COLLETTE; SIELSKI, 2015).

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo fornecer uma visão abrangente sobre embarcações do tipo catamarã, com especial atenção nos catamarãs de alumínio, dissertando sobre os usos, as peculiaridades, as vantagens e desvantagens desse tipo de embarcação.

A revisão bibliográfica realizada estabeleceu uma base teórica, abordando a história dos catamarãs e a crescente utilização do alumínio na construção naval. A análise das características técnicas e das propriedades mecânica das ligas de alumínio mostrou que, em comparação com outros materiais, o alumínio oferece uma excelente relação de resistência mecânica por massa específica, influenciando diretamente na eficiência e no desempenho das embarcações, em especial naquelas onde chapas finas podem ser utilizadas.

A avaliação das vantagens e desvantagens do uso do alumínio revelou que, apesar dos desafios, como a necessidade de proteção contra a corrosão entre metais, os problemas associados a soldagem e a fadiga; as vantagens, incluindo a leveza, a resistência a corrosão em contato com a água do mar e a eficiência no consumo de combustível, são substanciais.

A seguir foram discutidos os principais fundamentos do projeto de um catamarã, abordando aspectos como resistência ao avanço, estabilidade, flutuabilidade e projeto estrutural. Nesse contexto, a aplicação dos catamarãs de alumínio na indústria naval e no transporte marítimo foi destacada, evidenciando a versatilidade e eficiência dessas embarcações em diversas operações, que vão desde o transporte de cargas e passageiros até missões militares.

Concluiu-se que os catamarãs de alumínio são uma solução promissora para a indústria naval, combinando leveza, durabilidade e eficiência. O avanço contínuo das tecnologias de construção e a inovação em materiais prometem ampliar ainda mais seu uso, contribuindo para um transporte marítimo mais sustentável e eficiente.

A análise do desenvolvimento da classe LCS (Littoral Combat Ship) da Marinha Americana forneceu um exemplo de inovação no projeto de embarcações multicascos, construídas em alumínio. Embora sejam embarcações velozes, manobráveis, versáteis e capazes de operar junto a costa, o programa enfrentou desafios significativos devido à falta de um planejamento operacional claro e à complexidade de manutenção e reparação das embarcações de alumínio. Ao contrário do que muitos

avaliaram, observou-se que o principal problema não foi a escolha do material e sim o projeto e sua execução como um todo.

Para estudos futuros, sugere-se a pesquisa e desenvolvimento de novas ligas de alumínio que ofereçam maior resistência à corrosão e melhores propriedades mecânicas; uma análise detalhada da vida útil das embarcações de alumínio e o desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva que possam prolongar sua durabilidade; uma avaliação mais aprofundada do impacto ambiental do uso de alumínio na construção naval, incluindo a análise do ciclo de vida do material desde a extração até a reciclagem; e, por fim, estudos comparativos entre o desempenho dos catamarãs de alumínio e daqueles construídos com materiais compostos avançados, considerando custos, eficiência e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABS (American Bureau of Shipping) - **Rules for Building And Classing - High-Speed Craft** - 2013.

ALL AMERICAN MARINE. **68.5' Research Vessel for the University of Hawai'i at Mañoa**. Disponível em: <<https://www.allamericanmarine.com/vessels-gallery/imua-uofh/#>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David; **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Características Químicas e Físicas do Alumínio**. 2007. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em: 06 abr. 2024.

AUSTAL. **LITTORAL COMBAT SHIP (LCS)**. 2024. Disponível em: <https://www.austal.com/ships/littoral-combat-ship-lcs>. Acesso em: 25 maio 2024.

BG YACHT DESIGN. **Boat Plans - Bora Bora 28**. 2024. Disponível em: <https://bgyachtdesign.com/boat-plans-designs-easy/boat-plans-borabora-28/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

COLUNNA, Eduardo. **Alumínio navega nas águas da inovação na indústria naval**. 2023. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/aluminio-navega-nas-aguas-da-inovacao-na-industria-naval/>. Acesso em: 04 mar. 2024.

CARDENAS, H. F., FRANCO, F., ÁVILA, J. A., & JARAMILLO, H. E. . (2011), **"Evaluación de la resistencia a la tensión de uniones soldadas por fricción agitación de la aleación de aluminio 5052-H38."** El Hombre y la Máquina, Vol., núm.36, pp.77-83 [Consultado: 24 de Junio de 2024]. ISSN: 0121-0777. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47821598007>

COLLETTE, Matthew; SIELSKI, Robert. **Aluminum Ship Structures**. University Of

Michigan, Michigan, 2015.

COELHO, Arthur César Miná Albuquerque. **EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA5086 H116**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013

COSENTINO, Rafael Lins. **ANALISE DA TOPOLOGIA ESTRUTURAL E SUA INFLUÊNCIA NO CUSTO DE FABRICAÇÃO DO CASCO DE CATAMARÃS EM ALUMÍNIO**. 2014. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CATAMARA 43 | **Sailing**. Disponível em: <<https://www.sailing.com.br/barcosaveladetalhe/montecarlo/Monte-Carlo/MC-4/3573>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ELIMAT ESTALEIRO. **CATAMARÃS DE TRABALHO**. 2024. Disponível em: <https://www.elimat.es/pt/producto/catamaranes-de-trabajo/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

HELFRICH, Emma. **The Navy's Independence Class Littoral Combat Ships Are Cracking**. 2022. Disponível em: <https://www.twz.com/the-navys-independence-class-littoral-combat-ships-are-cracking>. Acesso em: 20 jun. 2024.

HAASE, Max; DAVIDSON, Gary; THOMAS, Giles; BINNS, Jonathan; BOSE, Neil. **On the Design and Resistance Prediction of Large Medium-speed Catamarans**. University Of Tasmania: Australian Maritime College. Australia. 2016.

HH Catamarans. 2024. **Luxury Performance Cruising Catamarans**. Disponível em: <<https://www.hhcatamarans.com/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

HECKMANN, Laura (ed.). **Littoral Combat Ship Still Fighting to Prove Its Worth**. 2024. Disponível em: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2024/3/26/littoral-combat-ship-still-fighting-to-prove-its-worth>. Acesso em: 25 abr. 2024.

INCAT SHIPYARD. **LEADING THE WORLD IN THE TRANSITION TO ZERO EMISSION PASSENGER AND VEHICLE FERRIES.** 2024. Disponível em: <https://incat.com.au/electric-future/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12215: Small craft — Hull construction and scantlings.** 2 ed. 2020.

FERNÁNDEZ, Rodrigo Pérez; A., González Redondo Francisco. **La binave de Torres-Quevedo, precursora de los modernos catamaranes.** Revista de Historia Naval, [S.L.], p. 119-136, 2022. Ministerio de Defensa.

FERRARI; Jean Vicente. **Estudo da corrosão localizada da liga de alumínio 7475-T761 por espectroscopia de impedância eletroquímica global e local em meio de sulfato de sódio.** Other. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011.

GAO. **LITTORAL COMBAT SHIP:** actions needed to address significant operational challenges and implement planned sustainment approach. Washington: Gao, 2022.

KOS, S.; BRČIĆ, D; FRANČIĆ, V. **Comparative Analysis of Conventional and SWATH Passenger Catamaran.** Universidade de Rijeka, Croácia, 2010.

LOMOCEAN. **Naval Architecture and Yacht Design.** 2024. Disponível em: <https://www.lomocean.com/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

Lamb, Thomas and Nathaniel Beavers, **“Aluminum Applications to Naval Ship Design and Shipbuilding,”** Proceedings of the 2010 SNAME Annual Meeting and Ship Production Symposium, SNAME 2010, Vol. 2, pp. 68–77.

MARCOMINI, José Benedito. **SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA PROJETO MECÂNICO.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020. Color.

MIGUEIS, Ronaldo José Fazanelli. **ASPECTOS ESTRUTURAIS DA MASTREAÇÃO,**

TRANSVERSAIS E CASCO DE CATAMARANS A VELA DAY CHARTER. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Oceânica, Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MARQUES, Francisco Adson. **Análise experimental de reparos de compósitos.** 2015. 41 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Cefet/RJ, Rio de Janeiro, 2015.

MARTÍNEZ, M. M. **Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos.** Universidad Politécnica de Cartagena. 2016.

MANCELLOS, Maria Clara; BORGES, Jose Pedro; MENDES, Jose; BESSA, Jorge Nuno; GONÇALVES, Nuno. **A Engenharia Mecânica no Catamarã.** 2014. 35 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, 2015.

MASTRO D'ASCIA. **História do catamarã.** 2016. Disponível em: <https://mastrodascia.com.br/catamara/historiadocatamara#:~:text=Como%20se%20desenvolveu%3A%20Nos%20anos,motor%20para%20esporte%20e%20lazer..>
Acesso em: 05 abr. 2024.

MOREIRA, E.F. **Influência do pré-tratamento na ação anticorrosiva de revestimentos híbridos de sol-gel aplicados na liga EN AW-6063.** Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.

MAGOGA, Teresa; AKSU, Seref; SLATER, Karl. Implementation of a nominal stress approach for the fatigue assessment of aluminium naval ships. **Procedia Structural Integrity**, [S.L.], v. 45, p. 28-35, 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2023.05.010>.

PEREIRA, J. MANUEL MARTIN VIEIRA **Estudo das ligas de alumínio aplicadas a construção naval nomeadamente na resistência à corrosão em estruturas navais**. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. 2010.

QUINTINO, Bruno Miguel Duarte. **Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas de topo soldadas por MIG na liga AA5083-H111**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

SCARABOTTO, Mônica. **ESTUDO DA CORROSÃO NAS LIGAS DE ALUMÍNIO 3105 E 5052**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SILVA, André Jorge Oliveira da. **Estudo de melhoria de uma liga de alumínio utilizada na indústria automóvel**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal, 2019

SUMIG. S. -. **#1 Welding Company in Latin America**. 2024. Disponível em: <<https://www.sumig.com/pt>>. Acesso em: 20 jun. 2024

SAPIEN, Joaquin. **The Inside Story of How the Navy Spent Billions on the “Little Crappy Ship”**. 2023. Disponível em: <https://www.propublica.org/article/how-navy-spent-billions-littoral-combat-ship>. Acesso em: 26 maio 2024.

SOUZA, Thiago Abrante de. **UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO UFPBAJA PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS**. 2020. 66 f. TCC - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

STUMP, T.; VATAVUK, J. A construção naval em liga de alumínio. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, [S. l.], v. 1, n. 1, 2010. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/1823>. Acesso em: 24 jun. 2024.

TANCREDI, Thiago P. **A Estrutura Primária do Navio: Teoria de vigas – viga navio**. São Paulo, 2004. (Apostila).

THOMAS, R. **O navio de combate litorâneo da Marinha dos EUA foi um erro?** Disponível em: <<https://www.naval-technology.com/features/was-the-us-navys-littoral-combat-ship-a-mistake/?cf-view&cf-closed>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

The Beast Explorer Catamaran. Disponível em: <<https://www.lomocean.com/projects/the-beast>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

TARJAN, Gregor. **CATAMARANS The Complete Guide for Cruising Sailors**. New York: McGraw-Hill, 2008.

THE ALUMINIUM ASSOCIATION. **Aluminum The Miracle Metal**. 2021. Disponível em: <https://www.aluminum.org/aluminum-miracle-metal>. Acesso em: 02 abr. 2024.

U.S NAVAL INSTITUTE. . **Beware the Allure of Mission Modularity**. 2023. Disponível em: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2023/may/beware-allure-mission-modularity>. Acesso em: 20 maio 2024.

WIGLEY, W.C.S. 1926. **”Ship wave resistance. A comparison of mathematical theory with experimental results”**, Transactions of RINA, 68, 124-137, 60, 191-210, 72, 216-228

WALTER, Yuri. **SELEÇÃO DE MATERIAIS & DESIGN APLICADOS À CONSTRUÇÃO NAVAL ARTESANAL**. 2018. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ZIEZULEWICZ, Geoff. **The littoral combat ship’s latest problem: Class-wide structural defects leading to hull cracks**. 2022. Disponível em: <https://www.navytimes.com/news/your-navy/2022/05/10/the-littoral-combat-ships-latest-problem-class-wide-structural-defects-leading-to-hull-cracks/>. Acesso em: 26 maio 2024.