

A CONSTRUÇÃO NAVAL EM LIGA DE ALUMÍNIO

Thierry Stump*
Jan Vatavuk**

Resumo

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um texto elucidativo da aplicação do alumínio como material para a construção de embarcações de porte médio, tomando como exemplo um catamarã de 16 metros que está em operação em Angra dos Reis. O enfoque deste texto está mais fortemente ligado ao ponto de vista de materiais, porém ao longo da explanação se fazem algumas alusões a respeito das aplicações, desenvolvendo-se alguns raciocínios que devem ser levados em conta ao se especificar materiais para aplicações onde ocorre solicitação extrema, como é o caso das embarcações polares, sublinhando para estas situações as vantagens que o metal alumínio oferece. São também abordados alguns aspectos referentes a cuidados que devem ser tomados durante a fabricação de embarcações em alumínio, bem como problemas de corrosão que devem ser evitados.

Abstract

The objective of this paper is to present a clarifying text as regarding the aluminium application in building of medium size ships, i.e. one called "Catamarã" (length of 16 meters) already working in Angra dos Reis, Rio de Janeiro state. Our main focus is related to materials themselves, though we have also commented on applications, specifically the points to be considered when selecting the material to demanding situations, as for example "polar ships", besides the benefits of using aluminium. Some aspects such as caution to be taken while building aluminium ships and corrosion problems to be avoided were stressed as well.

* Engenheiro Projetista e Construtor Naval. E-mail: thstump@attglobal.net

** Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Presbiteriana Mackenzie. E-mail: janvatavuk@uol.com.br.

1 INTRODUÇÃO

A primeira embarcação marítima, em alumínio, um dos metais de menor densidade $-2,7\text{g/cm}^3$ contra $7,8\text{g/cm}^3$ para o aço, foi um iate a motor de 12 metros de comprimento, “O Mignon” teria sido construído em 1891, na França. Na Inglaterra, a primeira embarcação motorizada foi Diana, com aproximadamente 17 metros, construída em moderna liga de alumínio, de grande resistência. Esta embarcação foi utilizada pela Marinha Real durante a Segunda Guerra Mundial e, durante os anos 60, ainda estava em uso.¹

Hoje, esse material de inúmeras vantagens, que serão abordadas ao longo do texto, é largamente utilizado no mundo inteiro, especialmente nos EUA e na Holanda, para a construção de iates a motor e a vela, de todos os tamanhos. No momento, essa liga é usada apenas para iates construídos por unidade, enquanto a construção em série utiliza o poliéster (fibra de vidro).

A liga de alumínio utilizada na construção naval tem um conjunto de propriedades mecânicas muito bom e grande resistência à corrosão. As ligas estão disponíveis em grande número de espessuras de lâmina, obtidas por laminação e extrusão. Esse material, cuja fabricação acaba de completar um século, certamente terá inúmeros desenvolvimentos nos próximos anos, principalmente considerando-se a flexibilidade advinda da utilização da informática, juntamente com os cortes automatizados das peças de caldeiraria (ver Figura 1) para a montagem de barcos e também a usinagem por CNC. Esta evolução na fabricação permite atender de forma completa aos anseios dos armadores para a construção de embarcações que podem ir de 10 a 40 metros de comprimento. No caso de iates a vela e a motor, a gama é mais ampla, indo desde 8 metros até cerca de 50 metros.¹

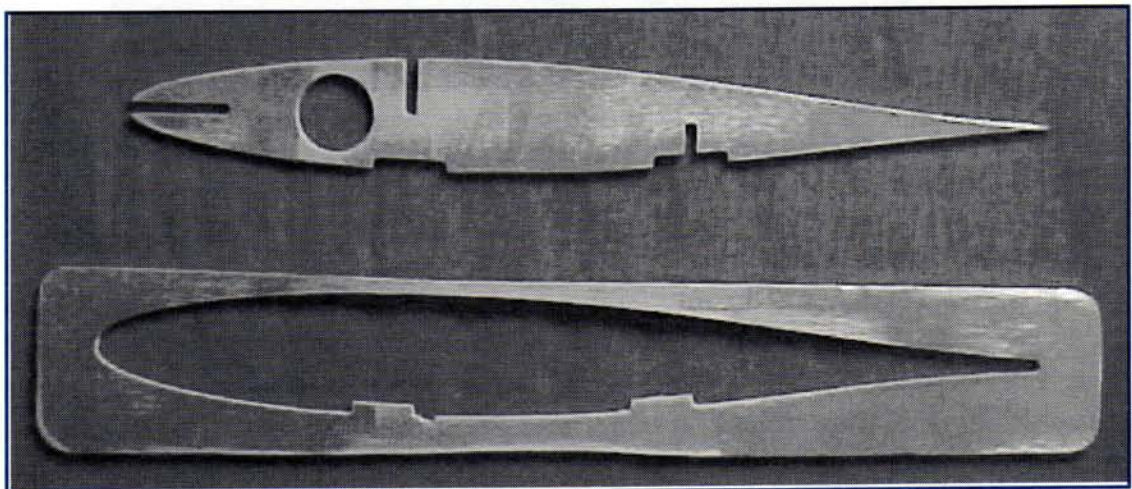


Figura 1 Peça estrutural do leme pequeno do barco Paraty. O corte deste componente foi realizado por plasma, tornando assim muito reduzida a região afetada pelo calor⁴

A redução das massas envolvidas em uma determinada dimensão, na utilização do alumínio em relação aos outros materiais, se traduz em redução de energias gastas para o avanço durante a navegação e mesmo para o controle da estabilidade, além de uma menor sollicitação mecânica quando da navegação em mares revoltos.²

Outro fator que deve ser considerado é que o alumínio se apresenta tenaz mesmo a baixas temperaturas, pois sua estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada é praticamente imune ao processo de clivagem, mecanismo de fratura responsável pela transição de energia mecânica absorvida no ensaio de impacto Charpy com o abaixamento da temperatura, no caso dos aços, e presente nas inúmeras falhas ocorridas nos Liberty Ships,³ durante a Segunda Guerra Mundial, quando muitos navios que levavam tropas americanas para a Europa afundaram, principalmente navegando nos mares gelados do norte. Em alguns casos, os cascos foram totalmente rompidos pelo mecanismo de fratura frágil.

A fratura frágil apresenta como característica principal uma propagação súbita, com a trinca caminhando a velocidades da mesma ordem de grandeza da velocidade do som no metal, lembrando-se que no caso do aço essa velocidade atinge 5km por segundo, o que se traduz por um rompimento com característica de explosão. A Figura 2 exemplifica esse mecanismo de fratura ocorrido em um grande navio para transporte de petróleo.

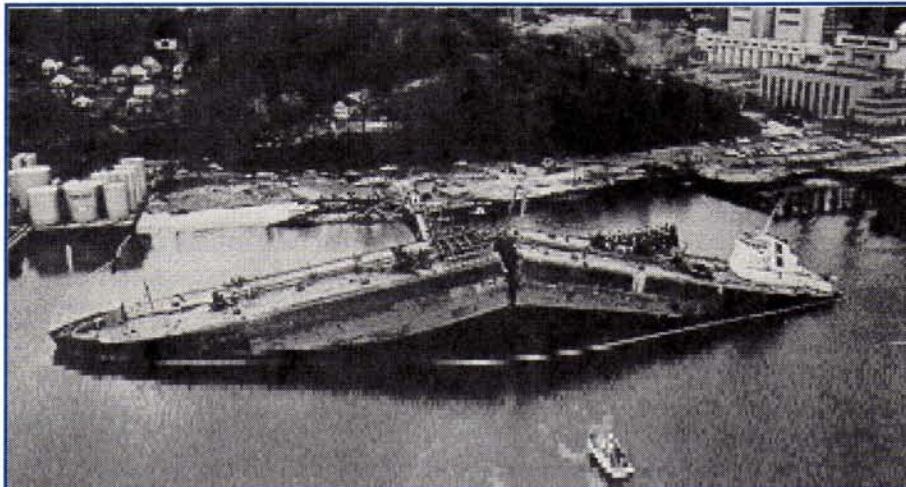


Figura 2 Fratura frágil em petroleiro na seção mestra, na qual ocorre o maior esforço. A velocidade da trinca é tamanha que o longo percurso da seção mestra pode ter sido percorrido em cerca de 0,04 segundo³

O fato de o alumínio não apresentar a transição dúctil frágil no ensaio de impacto Charpy torna-o extremamente interessante para embarcações que devem navegar em mares gelados e em condições extremas de carregamento, como tensões decorrentes de grandes ondas e impactos que possam ser causados por abalroamento com grande massa de gelo, comportando-se, mesmo nessas condições, de forma tenaz, podendo assim evitar acidentes de maior gravidade. Por este motivo escolheu-se o alumínio para a construção da nova embarcação polar Paraty 2 de 28,5 metros de comprimento e 110 toneladas, do navegador Amyr Klink.⁴

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, um exemplo de embarcação em fase de construção e pronta, fabricada totalmente em alumínio. É um catamarã de 16 metros de comprimento por 9 metros de largura, para transporte de até 60 passageiros, com a possibilidade de desembarque direto nas areias das praias (ver Figura 5).

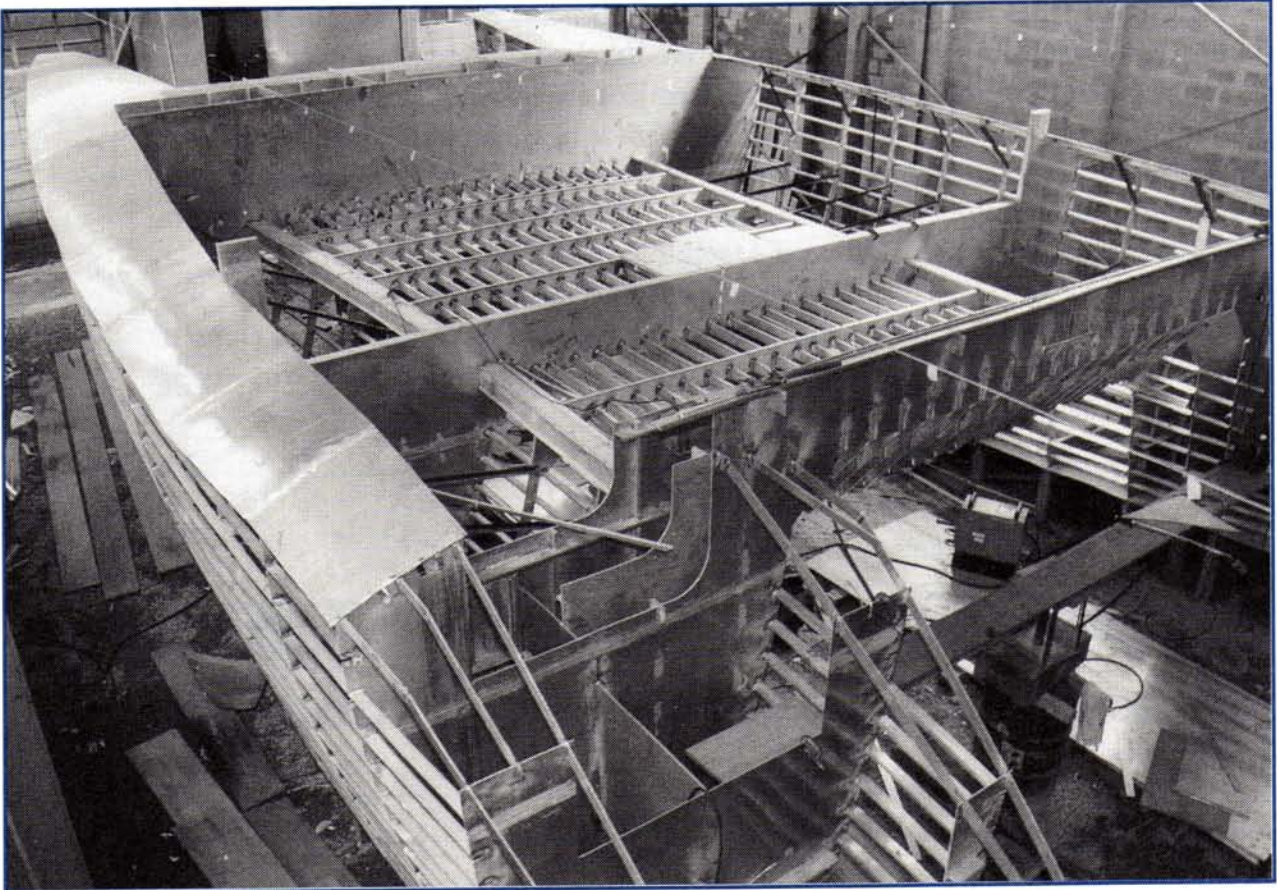


Figura 3 Catamarã em fase de fabricação. Observe-se a estrutura totalmente em alumínio⁴



Figura 4 Embarcação pouco antes de ser lançada ao mar, no porto de Santos⁴



Figura 5 Catamarã já em atividade⁴

As ligas mais utilizadas na construção naval contêm, além do alumínio, 3 a 4% de magnésio e mais outros metais, em quantidades menores. O teor de cobre nessas ligas é muito menor que em outras ligas de propriedades mecânicas muito boas, mas sensíveis à corrosão ao serem utilizadas no ambiente marinho. As pequenas variações mais comuns na liga metálica, na construção naval, pertencem às séries 5.000 (elemento de liga principal Mg) e 6.000 (elementos principais Mg e Si).⁵

As propriedades mecânicas das ligas mais utilizadas, ou seja, as 5.083, 5.086 e 6.061 (ver composição química nominal na Tabela 1), podem ser incrementadas substancialmente por meio de tratamentos térmicos e mecânicos, designados na Tabela 2,⁶ por índices tais como H111, H32, H341 para as ligas não tratáveis termicamente, cujo endurecimento é conseguido por deformação plástica a frio, podendo eventualmente ser submetidas a um recozimento para produzir amolecimento ou estabilização, ou ainda pelos índices T4 (solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição estável) e T6 (solubilizado e envelhecido artificialmente) para as ligas endurecíveis por meio de tratamento térmico. Esta tabela apresenta ainda o efeito da operação de soldagem nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio empregadas com os tratamentos apresentados acima.

TABELA 1

Composição química nominal (% em peso)

	Cu	Si	Mn	Mn	Cr
5083			0,7	4,4	0,15
5086			0,45	4,0	0,15
6061	0,25	0,6		1,0	0,20

TABELA 2

Efeito da operação de soldagem no limite de escoamento e no limite de resistência

Grau	Limite de resistência		Limite de escoamento	
	Rr	Rrw	LE	Lew
5083H111	275	268	165	144
5083H321	300	275	210	165
5083H341	345	275	269	165
5086H111	248	262	144	124
5086H32	275	241	193	131
5086H34	303	241	234	131
6061T6	262	165	241	137

Fonte: Lloyd's Register of Shipping. Valores em N/mm²

Rr: Limite de resistência

Rrw: Limite de resistência

LE: Limite de escoamento antes da soldagem

Lew: Limite de escoamento após a soldagem

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que a elevação da temperatura do metal durante operações de solda acarreta uma redução dessas propriedades na zona assim tratada. Tal diminuição é particularmente sensível para as ligas 6061 T6 (liga endurecida por solubilização e posterior envelhecimento), especialmente utilizada para extrusão dos perfilados dos mastros dos veleiros.⁶

2 FABRICAÇÃO E MONTAGEM

O peso específico e as propriedades mecânicas do alumínio permitem uma fabricação e formatação relativamente simples, com ferramentaria bastante simples, requerendo máquinas leves em operações como corte e chanframento, nas quais se utilizam pequenas máquinas de marcenaria com ferramenta de vídea refrigerada a álcool.⁴ Outro fato de extrema relevância é o manuseio das chapas, que pode ser realizado manualmente devido à baixa densidade do alumínio, aliado ainda a um processo limpo.

Subconjuntos de tamanho relativamente grande podem ser pré-fabricados e sofrer manutenção sem a necessidade de meios de sustentação mais poderosos. Desse modo, vários módulos podem ser fabricados paralelamente antes de entrar na montagem, reduzindo assim sensivelmente o total de trabalho para as unidades maiores. Pode-se citar como exemplo o catamarã das Figuras 3, 4 e 5, montado em cinco blocos.⁴ Os primeiros barcos em alumínio foram construídos em montagens a rebite, tecnologia ainda empregada nos dias de hoje para embarcações que utilizam alumínio (classe 5052) de espessuras inferiores a 2 milímetros, como é o caso, por exemplo, das canoas motorizadas de uso fluvial.⁶

O desenvolvimento de métodos e de modernos equipamentos de solda a gás inerte torna possível a montagem por esse método até mesmo de laminados de espessura mínima de 2mm. A solda das ligas em alumínio geralmente utilizam gás argônio para evitar a formação de alumina, o que atrapalharia a penetração do metal de liga e, portanto, a qualidade da solda. Vale, no entanto, salientar que para soldar espessuras acima de 12mm a composição de gases mais recomendada tem como base o argônio enriquecido de hélio, tomando-se o cuidado da limpeza e pré-aquecimento de até 75 graus Célcus.¹

Existem duas técnicas de solda conhecidas pelo nome de TIG e MIG. A solda TIG (Tungsten Inert Gas) é utilizada para lâminas finas e algumas outras soldas finas. O soldador utiliza uma vareta de metal de liga manual elevada ao ponto de fusão por um arco elétrico de um eletrodo em tungstênio. A solda MIG (Metal Inert Gas) é a mais utilizada; também é a mais rápida para as grandes construções. O metal é depositado automaticamente em fusão por uma pistola que também difunde o argônio, argônio/hélio na zona a ser soldada.⁶

Os soldadores devem ser experientes e qualificados para evitar os defeitos que podem ser numerosos no caso de emprego de mão-de-obra não-qualificada. Os defeitos advindos do erro de operação de solda podem ser por falta de penetração, falta de fusão, inclusões, porosidade, etc.

As seqüências empregadas na fabricação por soldagem devem ser definidas e respeitadas de modo a limitar distorções, sejam locais, sejam gerais. Na verdade, a grande influência da temperatura na dimensão do alumínio pode provocar deformações (torções ou flexões) de vários centímetros ao longo de um casco em função do seu comprimento e espessura do alumínio. Pode-se tomar como exemplo o barco polar Paraty 2, que, em função de sua espessura de chapeamento e densidade estrutural, bem como de seu comprimento da ordem de 28,5m, obteve uma contração do fundo do casco, provocando um envergamento longitudinal próximo a 10cm, já estimado no seu projeto por experiência acumulada.⁴

As montagens mecânicas por parafusamento e rebitagem de elementos no casco – por exemplo, motor, divisórias e pisos –, que são utilizadas na construção de iates de alumínio, devem levar em conta as regras de prevenção impostas pelos fenômenos de corrosão galvânica, que serão descritos mais à frente.

Além das considerações de ordem estética, o alumínio poderia ficar sem pintura. Vale ressaltar que em embarcações como barcos de pesca e veleiros ocorre com freqüência um elevado atrito com o casco por parte dos cabos das redes e mesmo das velas, fazendo com que acabamentos de proteção à base de tintas sejam perdidos, produzindo corrosão se o material utilizado for o aço, porém nada sofrendo se confeccionado em alumínio. Este é mais um motivo da exigência do navegador Amyr Klink em realizar a construção de seus barcos com alumínio, em função do atrito do gelo com o casco, os lemes, etc.

Na realidade, o alumínio é protegido por uma camada de alumina aderente e de espessura nanométrica que surge no momento em que o metal é posto em contato com um meio oxidante (ar, água, etc.).¹

A demanda de caráter principalmente estético dos armadores e dos construtores possibilitou um desenvolvimento de sistemas de revestimento e pintura que permite a obtenção de um acabamento perfeito das estruturas em liga de alumínio. Os sistemas de pintura geralmente passam pelas seguintes etapas:¹

1. Limpeza e desengorduramento meticolosos.
2. Lixação ou jateamento para eliminação da alumina com elementos que não contaminem o alumínio como, por exemplo, norzon e jateamento com quartzo ou alumina puros.
3. Aplicação de camada inicial em epóxi anticorrosivo.
4. Emasseamento dependendo do estado da superfície.
5. Aplicação de duas demãos de epóxi.
6. Aplicação de duas ou três demãos de tinta poliuretânica alifática nas obras mortas (todas as superfícies acima da linha da água).

7. Aplicação de duas demãos de *antifouling* (antiincrustante) na parte de obras vivas (áreas submersas) que, por serem normalmente à base de estanho e de cobre, requer cuidados com isolamentos desta tinta com relação ao alumínio, para evitar a corrosão galvânica.⁷

3 PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA RISCOS DE CORROSÃO

A concepção, construção, manutenção e, portanto, o tempo de vida de um casco em liga de alumínio exigem uma boa compreensão dos fenômenos de corrosão por parte do arquiteto, do construtor e do usuário. Existem dois tipos principais de corrosão: a corrosão galvânica e a corrosão eletrolítica.

3.1 Corrosão galvânica

Esse tipo de corrosão é criado pela diferença de potencial entre dois metais que estejam em contato e mergulhados na água do mar, formando assim uma pilha elétrica. O metal de potencial mais fraco (o anodo) sofre maior corrosão em proveito do metal de maior potencial (o catodo). Esse fenômeno só acontece quando os dois metais ficam em contato e por isso o circuito elétrico é fechado.

O potencial é medido em relação a um eletrodo de referência feito de prata (cloreto de prata – Ag/AgCl) imerso na água do mar e conectado a um voltímetro. A outra extremidade fica conectada ao elemento metálico a ser testado (válvulas de casco, entrada e saída de água, *skag* ou até chaparia do costado). Alguns especialistas utilizam esse tipo de medida para pesquisar a origem e identificar os fenômenos de corrosão ou para verificar a eficácia de um sistema de proteção catódica sobre um barco em flutuação.

A Tabela 3 indica os potenciais de diferentes metais quando imersos na água do mar e medidos em relação a um eletrodo de referência (Ag/AgCl).

Um metal está eficazmente protegido pela cobertura catódica quando seu potencial medido em relação ao eletrodo de referência é de 0,20 a 0,25V inferior em relação aos valores da tabela, ou seja, cerca de -1,00V para as ligas de alumínio.

Uma proteção muito forte pode provocar a formação de álcali e de oxigênio que poderão atacar a pintura. Por isso, é importante respeitar essas regras ou recorrer a um especialista quanto a essas questões.

Além disso, é fundamental respeitar certas regras na escolha da montagem de outros materiais utilizados a bordo, para eliminar os riscos de corrosão galvânica. As válvulas em bronze ou em aço inoxidável, por exemplo, devem ser cuidadosamente isoladas do casco ou dos elementos da estrutura de alumínio, por meio de inserções ou de suportes em material isolante. Melhor ainda, devem ser substituídas por materiais equivalentes fabricados em substâncias sintéticas.⁷

TABELA 3

Potencial de materiais metálicos em relação a eletrodo de referência (Ag/AgCl) em água do mar

Metal	Potencial (VOLT)
Grafite	0,27
Titânio	0,02
Aço inoxidável 316 normalizado	-0,03
Monel	-0,06
Aço inoxidável 304 normalizado	-0,06
Prata	-0,10
Níquel	-0,13
Bronze de alumínio	-0,16
Chumbo	-0,20
Bronze cuproníquel	-0,25
Latão	-0,30
Cobre	-0,30
Estanho	-0,31
Aço inoxidável 316 (ativo)	-0,39
Aço inoxidável 304 (ativo)	-0,49
Ferro fundido	-0,63
Liga de alumínio (marinho)	-0,75
Zinco	-1,00
Aço galvanizado	-1,10
Magnésio	-1,60

3.2 Proteção catódica

A primeira forma de proteção catódica é bastante conhecida e consiste em instalar, em diferentes locais da estrutura e dos acessórios, eletrodos positivos/anodos de sacrifício, geralmente feitos em zinco (americanos e brasileiros chamam esse tipo de eletrodo de “zincos”). Esse metal é escolhido porque se comporta anodicamente em relação a todos os outros metais utilizados na construção naval, sendo seu potencial eletronegativo de $-1,0V$ (ver a Tabela 3).

A colocação e a montagem desses anodos devem respeitar regras precisas, de modo a garantir uma proteção eficaz. Esses anodos devem ser regularmente verificados, seja quanto a seu desgaste, seja quanto à eficácia de sua montagem.

O número e a massa dos anodos devem adaptar-se ao tamanho do casco. Um desgaste anormalmente rápido deles indica um problema que deverá ser identificado e corrigido o mais rápido possível.

É possível garantir também a proteção catódica de uma estrutura em liga de alumínio com a ajuda de um sistema chamado corrente imposta. Esse procedimento consiste em transformar em catodo a própria estrutura a ser protegida, mediante a

emissão de uma corrente inversa, com a ajuda de um anodo inerte. Um sistema de medição permanente permite controlar e regular essa corrente em função da diferença do potencial medido.⁷

3.3 A corrosão eletrolítica

Em todas as embarcações, sobretudo nas construídas em alumínio, esses “dispositivos” elétricos não isolados podem trazer conseqüências dramáticas. A fuga de corrente contínua ou alternada provoca sérias deteriorações via corrosão eletrolítica. Essa corrosão é provocada pela aparição de uma diferença de potencial, geralmente causada por uma fuga de corrente, advinda de um defeito do isolamento de um condutor, ou de um dispositivo elétrico.

Este é o motivo pelo qual as instalações elétricas devem ser feitas com o maior cuidado, respeitando todas as condições exigidas pelas normas. Devem, especialmente, dispor de isolantes e protetores eficazes. O cabeamento deve ser feito apenas com dois fios, os condutores devem ser meticulosamente fixados nas canaletas colocadas em partes altas para evitar qualquer contato com a água da parte baixa da embarcação. Todos os interruptores e disjuntores devem ser bipolares e as máquinas devem estar isoladas e estanques. As tomadas do cais devem estar ligadas a transformadores de isolamento com fio terra.

Numerosos estaleiros especializados na construção em alumínio adquiriram domínio completo dos métodos de construção, de acabamento e de proteção contra a corrosão. Atualmente são construídas embarcações cada vez maiores e de melhor desempenho, exigindo maior domínio sobre todas as variáveis acima descritas.

4 COMENTÁRIOS FINAIS

Do exposto podem-se tecer considerações tais como que o uso das ligas de alumínio, além de ser intenso na construção naval nos países desenvolvidos como Canadá, Austrália, Nova Zelândia, França, Inglaterra Espanha, Holanda e África do Sul, deverá ser intensificado no Brasil, porém respeitando uma evolução por parte dos estaleiros em geral.

Um cuidado a ser tomado é que a utilização indiscriminada desse material, sem o devido conhecimento de sua tecnologia, pode romper sua imagem em relação ao público consumidor, como já está acontecendo em alguns segmentos náuticos, pois, apesar desse material ser superior ao aço, como já descrito, é mais sensível a não-conformidades na fabricação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GAROFE, Gilbert. *Alu acier inox*. Paris: Editora Bourdeaux, 1995. (Loisirs Notiques, n.16).
2. GUTELLE, Pierre. *Architecture du voilier*. Paris: Editora Bourdeaux, 1997, v.1, 2 e 3. (Loisirs Notiques, n.16).
3. HERTZBERG, Richard W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4 ed. New York: Editora John Wiley & Sons, 1996.
4. Relatórios internos da equipe técnica Thierry Stump.
5. PÓVOA, Antônio Adriano. *Manual de soldagem da ALCAN*. ALCAN Alumínio S.A., 1993.
6. *Règlement pour la classification- certification des navires de plaisance*. Paris: Editora Bureau Veritas, NR381DNPROOF, 1993.
7. VARGEL, Christian. *Corrosion de l'aluminium*. Paris: Editora Dunod, 1999.