



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GIA/13
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS - GIA

**EFEITOS DA INCRUSTAÇÃO DE MACROGANISMOS SOBRE MATERIAIS DE CENTRAIS NUCLEARES QUE
UTILIZAM ÁGUA DO MAR NOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

**Paulo Artur Pimentel Tavares da Silva
ELETRONUCLEAR**

**Nelri Ferreira Leite(*)
ELETRONUCLEAR**

RESUMO

Em Centrais Nucleares do tipo de Angra 1, que utilizam uma grande quantidade de água do mar como refrigerante é freqüente o crescimento de macroorganismos no sistema de água de refrigeração ocasionando problemas de incrustação nos componentes de troca térmica que são construídos com feixe tubular de titânio e liga de cobre/níquel 90/10.

Este trabalho busca avaliar o comportamento desses materiais frente às condições adversas ocasionadas pela fixação e crescimento da população de macroorganismos marinhos de forma a torná-los susceptíveis a processos corrosivos semelhantes aos ocorridos com outros materiais.

A avaliação do comportamento do titânio e das ligas de cobre/níquel 90/10 em água do mar foi baseado em experimentos de laboratório realizados no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e experimentos no mar próximo à Ilha de Cabo Frio (Arraial do Cabo, R.J.). Em ambos os casos foram feitas medidas eletroquímicas e inspeção visual nos corpos de prova, a fim de acompanhar a formação de biofilme e a fixação de macroorganismos nestes materiais.

As amostras de titânio apresentaram susceptibilidade à fixação de macroorganismos com ocorrência de corrosão sob os depósitos, enquanto que as amostras de liga cobre/níquel 90/10 não apresentaram fixação microbiana mas sofreram forte corrosão.

PALAVRAS-CHAVE

Incrustação, Corrosão em Água do Mar, Sistema de Refrigeração, Centrais Nucleares.

1.0 - INTRODUÇÃO

Esta pesquisa [1] tem como objetivo relacionar a existência de corrosão em superfície de liga cobre/níquel e de titânio devido à fixação de microrganismos marinhos (em especial de larvas de cirripédios), quando os mesmos ficam em contato permanente com a água do mar. A motivação para realização desse trabalho se deu após a observação do alto custo dispendido na manutenção dos sistemas de refrigeração da Usina Nuclear de Angra I, devido ao crescimento de incrustações que ocorre em todo circuito de troca térmica inclusive nos componentes com feixes tubulares construídos com esses materiais.

Nos primeiros anos de funcionamento da Usina, foi observado um desenvolvimento descontrolado de cirripédios (cracas) formando camadas compactas ao longo de todo canal de água de circulação. Tal fenômeno teve como consequência o desprendimento de grandes placas de cirripédios, que se fragmentaram pelo impacto direto no espelho do feixe tubular dos trocadores, devido à inexistência de filtros. Com isso houve bloqueio parcial de alguns tubos

causando turbilhonamento e entupimento dos mesmos, chegando a perfurá-los pelo processo de corrosão-erosão nas regiões adjacentes ao boqueio, tendo que ser posteriormente plugueados.

Prematuramente foi necessário substituir o feixe tubular do condensador principal, que era de uma liga de cobre, por tubos de titânio, que é um metal nobre e com excelente comportamento frente a diversos meios corrosivos, sendo utilizado com sucesso em sistemas de refrigeração que utiliza a água do mar como fluido refrigerante. Foram escolhidos como materiais para estudo, os dois metais mais importante do circuito de troca térmica da Usina de Angra I, o titânio e a liga de cobre/níquel 90/10. Com estes materiais pretende-se identificar os possíveis processos corrosivos que por ventura possam existir relacionados à fixação de cracas, de forma a buscar uma solução técnica e operacional que mantenha a integridade da Usina.

A avaliação do comportamento do titânio e das ligas de cobre/níquel 90/10, em água do mar foi feita através de experimentos de laboratório com inoculação de larvas de cirripédios (cracas) e de ensaios de campo no mar na Ilha de Cabo Frio, monitoradas através de medidas eletroquímicas e de inspeção visual nas superfícies dos corpos-de-prova, para verificar a fixação de macroorganismos. Os experimentos foram desenvolvidos no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), situado no Município de Arraial do Cabo, considerado um Centro de Excelência da Marinha em estudos desta natureza, envolvendo a cultura de larvas de cirripédios que é o principal organismo marinho para a execução deste trabalho.

2.0 PROCESSOS DE BIOINCRUSTAÇÃO EM CENTRAIS NUCLEARES

A construção de Centrais Térmicas Nucleares de grande porte obriga que se utilize grandes volumes de água de refrigeração. Devido a este fato há uma tendência de, sempre que possível, instalar estas Usinas próximas a costa onde o mar possibilita uma fonte de água abundante e limpa. Entretanto, quando comparada com as águas limpas do rio, a água salgada é sensivelmente mais corrosiva, principalmente quando ela é rica em organismos vivos.

O '*biofouling*' é um problema que ocorre apenas em ambiente de águas pouco poluídas ou água do mar, se manifestando na forma de vidas marinhas, como as cracas, que aderem aos tubos ou aos espelhos (figura 1), bloqueando em parte o fluxo de água e acarretando regiões de alta velocidade do fluido. Isto origina uma forma de ataque conjunta de corrosão e erosão .

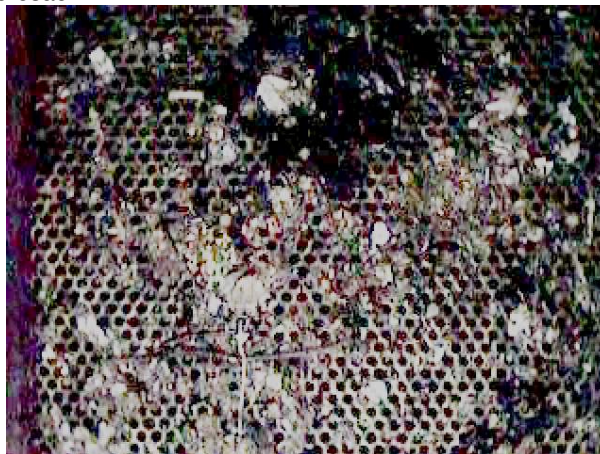


Figura 1 – Vista do espelho do trocador de calor de Angra 1

Desde 1982, quando a Central Nuclear de Angra1 entrou em operação, foi observado um grande crescimento de incrustações no sistema de água de refrigeração da Usina que consiste de uma captação de aproximadamente 40 m³/s de água do mar para resfriar o vapor exaurido das turbinas e transformá-lo em condensado no sistema secundário. A figura 2 ilustra os três sistemas: primário, secundário e de água de refrigeração de uma Central Nuclear.

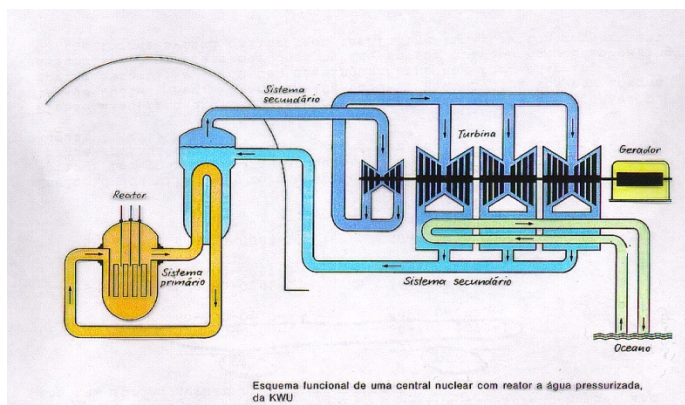


Figura .2 – Modelo simplificado dos circuitos de refrigeração de uma Central Nuclear

Estas incrustações eram representadas em sua grande maioria de crustáceos da classe cirripédia, conhecida como “cracas” (figura 3), que encontraram condições favoráveis ao seu desenvolvimento na grande quantidade de nutrientes na massa d’água, aliadas a ausência de competidores foto positivos na escuridão do canal de entrada e no interior dos componentes do sistema de refrigeração. O crescimento desordenado desses macroorganismos trouxe consequências desastrosas em Angra 1, causando danos irreparáveis nos tubos do condensador pelo processo de corrosão-erosão e entupimento dos mesmos, que sendo plugueados comprometeram significativamente a eficiência térmica e operacional da Usina.



Figura .3 – Exemplo de cracas encontradas no circuito de refrigeração

Foi necessário trocar 48000 tubos de ligas de cobre do Condensador Principal, que não suportaram a agressividade desse meio, por tubos de titânio a um custo de 5 milhões de dólares somente na compra do novo feixe tubular. Outro fato relevante ocorreu após 10 meses de operação da Usina quando foram detectados furos em 7 dos 3000 tubos de Cu/Ni 90/10 com diâmetro de 3/4” e 1,24 mm de espessura, instalados em um trocador de calor do sistema de arrefecimento das turbinas (SARET) da Usina de Angra 1.

Os tubos de Cu/Ni 90/10 deste trocador de calor refrigerado com água do mar começaram a perfurar após alguns meses de operação. Mostrou-se que o fenômeno era causado por objetos sólidos temporariamente bloqueados no interior dos tubos provocando turbulência no fluxo de água e conseqüente erosão localizada nas adjacências.

Neste período foi detectado um desenvolvimento descontrolado de cirripédios (cracas) formando camadas compactas ao longo do sistema de água de circulação que variavam de 5 a 20 cm. Esse tipo de desenvolvimento provocou o “sufocamento” e conseqüentemente, a morte dos indivíduos que estavam diretamente fixados às paredes do sistema. Desta maneira, a renovação do cimento fixador foi interrompida, o que acarretou o desprendimento de grandes placas de cirripédios. Como não existia nenhum tipo de filtro nas caixas do trocador, essas placas eram fragmentadas pelo impacto direto no espelho, onde estavam os tubos de cobre. Isto resultou em entupimentos e/ou bloqueios parciais como mostra a figura 4, provocando um turbilhonamento, que acarretou perfurações erosivas nas regiões adjacentes às carapaças..

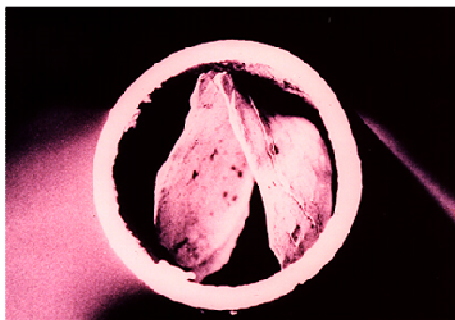


Figura 4 – Craca aderida ao tubo de Cu/Ni 90/10 com diâmetro de 3/4” do trocador do SARET e tubo de cobre com perfuração

Em virtude desse problema, foi implantado o sistema de cloração contínua à baixa concentração de aproximadamente 0,1 mg/L (0,1 ppm) de cloro total residual. As clorações contínuas de baixa concentração são usadas em muitos casos para o controle de “fouling” em regiões de baixa velocidade de fluxo. Entretanto cabe ressaltar que os organismos cirripédios adultos são bastante resistentes às clorações contínuas e intermitentes, sendo que o mesmo não acontece com as formas larvares (figura 5).



Figura 5 – Exemplo de larvas de cirripédios da espécie *Balanus amphitrite*

3.0 BIOCORROSÃO E “*BIOFOULING*” EM MATERIAIS DE INTERESSE INDUSTRIAL

Os processos abióticos de corrosão podem influenciar a velocidade, extensão e distribuição das espécies microbianas, assim como a composição química e propriedades físicas do biofilme. É sabido que a natureza do substrato metálico influencia a velocidade e distribuição do “*fouling*” microbiano na água do mar. Zonas de corrosão uniforme promovem a absorção heterogênea dos microrganismos. Por outro lado a falta de homogeneidade no biofilme é precursora dos efeitos de aeração diferencial como tem sido encontrado em diversos aços inoxidáveis e ligas de cobre-níquel em água do mar. Nas zonas catódicas de superfícies metálicas que se corroem geralmente ocorre uma elevação do pH e da concentração de eletrólitos, ao contrário das zonas anódicas que a redução localizada do pH e da concentração eletrolítica influi sobre a absorção das bactérias nestas áreas.

Os filmes passivos de óxidos e hidróxidos hidratados proporcionarão às bactérias, sítios ativos para fixação. Os óxidos de titânio, por exemplo, são insolúveis no intervalo de pH fisiológico e tem sido utilizado como matrizes para implantes sem efeitos inibidores sobre moléculas biologicamente ativas.

3.1 Titânio

O titânio [2] parece ser o metal mais resistente à biocorrosão de todos os testados até o presente momento. O comportamento passivo deste metal é muitas vezes reforçado por agentes oxidantes ou redutores ou por produtos secundários associados a ambientes microbianos aeróbicos ou anaeróbicos. A característica de apresentar altos potenciais anódicos de pite, torna o titânio menos susceptível ao pite que é o tipo mais comum de ataque em biocorrosão. Este comportamento passivo o tem transformado em um dos materiais preferidos como elemento de construção de tubos de trocador de calor exposto a água do mar, apesar de ser um substrato favorável para formação de “*biofouling*” e ter-se detectado colonização de bactérias em apenas 5 horas de exposição em meios contaminados.

Em relação à corrosão observa-se que a sua resistência é devida à formação de uma película protetora de óxido de titânio (TiO₂) altamente estável, tenaz e aderente. Este filme protetor é formado espontaneamente quando o metal entra em contato com traços de oxigênio ou umidade presente ao meio.

O uso do titânio e suas ligas como materiais construtivos de equipamentos industriais estão ligados a sua resistência à corrosão, porém a suscetibilidade à formação de “*biofoulin*” em sua superfície contínua sendo objeto de análise no processo de corrosão induzida por microrganismos.

3.2 Ligas de Cobre e Níquel

Ligas de Cobre são tradicionalmente utilizadas em condensadores refrigerados à água salgada como decorrência de suas boas propriedades de transferência térmica assim como de resistência a corrosão e ao “*biofouling*”. Dentre as ligas mais utilizadas encontramos em primeiro lugar o latão-alumínio e a seguir as ligas de cobre-níquel. A liga de latão-alumínio possui cerca de 76% de Cu, 22% de Zn, 2% de Al e traços de As. O alumínio nos teores utilizados, confere aos tubos uma excelente resistência ao impingimento e o arsênio impede a sua dezincificação.

As ligas de cobre têm várias aplicações em instalações marinhas, como hélice de navios e condensadores. Além das características físicas desejadas, essas ligas apresentam boa resistência à corrosão. As ligas mais resistentes são as que contêm cobre acima de 70% como ligas de cobre/níquel 70/30 e 90/10.

Geralmente as ligas de cobre expostas a água do mar estéril desenvolvem uma estrutura de películas passivas constituídas por uma camada uniforme de óxido cúprico aderente ao metal e camadas descontínuas e pouco passivantes de hidróxido cúprico. Em água do mar poluída as camadas externas variam em sua composição e se apresentam como películas porosas, grossas e pouco aderentes, enquanto que as películas internas são finas e apresentam sulcos na zona de contorno de grão.

Videla [3] constatou que o efeito dos poluentes da água do mar sobre a distribuição e composição das películas passivas também ocorre com o bronze/alumínio em meio marinho contaminado com sulfetos. A variação na composição do substrato metálico pode também influenciar a resistência ao “*biofouling*”, como a relação de cobre níquel 90/10 com teores distintos de ferro em sua composição. As ligas que não têm ferro são rapidamente corroídas e pouco colonizadas enquanto as que têm teores de ferro maiores que 2,5% favorecem a formação de “*microfouling*”.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

4.1 Materiais Metálicos

Foram escolhidos como materiais de teste, os dois metais mais importantes do circuito de troca térmica da usina de Angra 1: o titânio (ASTM B 265 Grau 1) e a liga de cobre níquel 90/10 (ASTM B 111).

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise química efetuada em uma amostra do material dos corpos-de-prova de titânio, comparando-se com os valores na especificação ASTM-B 265 Grau 1. Vê-se que a liga atende perfeitamente aos requisitos de composição química da especificação.

Tabela 1 - Composição química do Titânio (% em peso)

	Ti	N ₂	C	H ₂	Fe	O ₂
Corpo-de-prova	99,886	0,008	0,009	0,002	0,04	0,055
ASTM B 265 Grau 1	Resto	0,03 máx	0,10 máx.	0,015 máx	0,20 máx	0,18 máx

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise química efetuada em uma amostra do material dos corpos-de-prova, comparando-se com os valores na especificação ASTM B 111 C70600. Vê-se que a liga atende perfeitamente aos requisitos de composição química da especificação.

Tabela 2 - Composição química da liga Cu-Ni (% em peso)

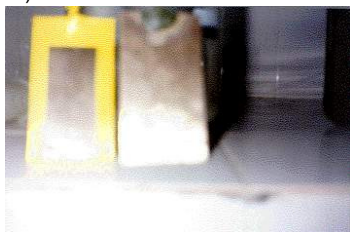
	Cu	Ni	Pb	Fe	Zn	Mn
Corpo-de-prova	88,3	9,6	0.02	1,24	0,25	0,63
ASTM B 111 Liga C70600	Resto	9,0 – 11,0	0,05 máx.	1,0 - 1,8	1,0 máx	1,0 máx

Os corpos-de-prova para ensaio em laboratório e exposição no mar, mostrados na figura 6, foram preparados nas seguintes dimensões:

Corpo-de-prova de Cobre/Níquel 90/10 - (100x50x2)mm

Corpo-de-prova de Titânio - (100x30x1) mm

a) Cu/Ni 90/10



b) Titânio

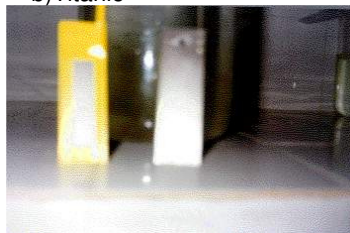


Figura 6 - Detalhes dos corpos-de-prova de Cu/Ni 90/10 e titânio

O contato elétrico para medidas eletroquímicas foi feito através de um fio de cobre soldado ao corpo-de-prova, no caso da liga de Cu/Ni 90/10 e de um fio de titânio no caso do corpo-de-prova de titânio. Para os ensaios de polarização, os corpos-de-prova foram isolados com uma fita isolante 3M deixando uma área exposta de aproximadamente 22 cm² para o Cu/Ni e 8 cm² para o titânio.

4.2 Meio de Cultura

A espécie de cirrípede *Balanus Amphitrite* foi escolhida por produzir grande quantidade de náuplios (larvas) mais resistentes à manipulação em laboratório. Os cirrípedios foram coletados em 13/01/99 no porto de Arraial do Cabo, RJ, utilizando-se espátulas, posteriormente, foram acondicionados em sacos plásticos e levados para o Laboratório de Larvicultura do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. No laboratório, os animais foram cuidadosamente quebrados, e suas duas lamelas ovígeras, situadas na porção basal, foram retiradas com pinça e colocadas em cubas contendo água do mar previamente filtrada e esterilizada com raios ultravioleta (UV) para evitar a contaminação da cultura com bactérias. As lamelas permaneceram nas cubas até que os náuplios eclodissem, o que ocorreu no dia 14/1/99.

Os náuplios de *Balanus Amphitrite* passam por seis fases distintas de crescimento que se diferenciam entre si principalmente pela presença de setas, sétulas, espinho e tamanho do corpo. Estes estágios duram, aproximadamente, de 9 a 11 dias, partindo do estágio de náuplio I, mostrado na figura 7. Após este período, ocorre o aparecimento da larva cipris, que é capaz de se fixar no substrato através da glândula de cimento. Uma vez fixada, a cipris [4] sofre inúmeras metamorfoses até atingir a fase jovem, quando passa a crescer, atingindo a fase adulta mostrado na figura 8.



Figura 7 – Nauplio I



Figura 8 – Fase adulta da larva cipris

Após a eclosão, a água da cuba foi filtrada através de uma malha de 100 µm, utilizando-se um sifão de plástico. Posteriormente, a malha contendo os náuplios foi "lavada" com água do mar filtrada e esterilizada com UV e os náuplios nela retidos foram transferidos para um bécher de 3 litros com água filtrada e esterilizada. Concluída esta etapa, os náuplios foram alimentados com a microalga *Tetraselmis* (figura 9).



Figura 9 – Coleta de nutrientes à base de microalgas e fitoplanctons

Os náuplios foram alimentados diariamente, ao longo do período do experimento, e a água do bécher foi trocada a cada dois dias até o dia 24/01/99 (10º dia a partir da eclosão do náuplio). Neste dia, foi observada a presença de recrutas (animais jovens) nas placas de titânio.

4.3 Experimentos com imersão total dos corpos-de-prova em Laboratório

Nos experimentos que realizados nas instalações do IEAPM em Arraial do Cabo para análise dos efeitos causados pela fixação dos macroorganismos marinhos, foram utilizados corpos-de-prova dos metais conforme descrito anteriormente.

O ensaio de laboratório consistiu em imergir 2 (dois) corpos-de-prova de cada material em bécheres com volume de 3 litros contendo 3 (três) meios distintos para exposição dos materiais. A figura 10 mostra os dispositivos do experimento de laboratório.



Figura 10 - Detalhe dos dispositivos do experimento de laboratório

- O Meio 1 era composto de água do mar natural esterilizada com raios ultra violeta, com nutrientes (microalgas e fitoplanctons) e inoculadas com larvas de cirripédios, da espécie *Balanus Amphitrite* semelhante a existente na água do mar de Angra.
- O Meio 2 era composto de água do mar natural esterilizada com raios ultra violeta e nutrientes.
- O Meio 3 era composto somente de água do mar esterilizada para controle do experimento.

Foi realizado um acompanhamento da formação de "biofouling" por um período de 10 dias, com observação diária dos corpos de provas, monitorando o potencial a circuito aberto, a formação de biofilme e a fixação das larvas de cirripédios

nas superfícies expostas. Após este período, foi feita uma avaliação dos corpos de prova visando identificar alterações ocorridas durante o experimento.

Os seguintes parâmetros foram acompanhados durante os ensaios:

- Medidas de potencial de circuito aberto em função do tempo, utilizando um multímetro digital da marca Digital Multimeter modelo 9300GP e um eletrodo de referência de Ag/AgCl.
- Contagem das larvas de cracas fixadas nos corpos-de-prova através de microscópio ótico modelo Reichter com aumento de 25 X.
- Polarização anódica dos corpos-de-prova ao final do experimento usando um Potenciostato-Galvanostato ONWIMETRA modelo PG-05
- Avaliação de processos corrosivos inerentes a presença de biofouling, utilizando técnicas de microscopia ótica, através de microscópio ótico modelo Reichter com aumento de 100 X, e eletrônica para observar a presença de pite na superfície metálica.

4.4 Experimentos com imersão total dos corpos-de-prova no mar.

Este experimento foi iniciado em 08/01/99 com a exposição dos corpos-de-prova numa das balsas do IEAPM (figura 11) na Ilha de Cabo Frio fundeada a 40 metros da Praia do Farol no município de Arraial do Cabo que está localizado a leste da cidade do Rio de Janeiro (23º 44', S 42º W).



Figura 11 – Detalhe da balsa do IEAPM

Os corpos-de-prova foram fixados numa estrutura retangular de isopor, que podemos ver na figura 12, de forma a garantir que os materiais ficassem submersos a uma profundidade de aproximadamente 20 cm, independente da variação de maré.



Figura 12- Foto da estrutura de fixação dos corpos-de-prova

A monitoração deste experimento foi realizada com observações periódicas uma vez por semana durante 25 dias através de medidas de potenciais e inspeção visual dos corpos de prova. No final do ensaio, os corpos-de-prova foram levados para o laboratório do IEAPM para observação de incrustações e polarização anódica.

5.0 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados das análises microbianas feitas durante e após a exposição dos corpos de prova nos meios estudados.

Os corpos de prova de titânio apresentaram a formação de "biofouling" logo nos primeiros dias de imersão no mar (figura 13). No final do ensaio os corpos de prova de titânio estavam completamente cobertos de algas. Por outro lado, não houve nenhum tipo de incrustação na superfície dos corpos-de-prova da liga Cu/Ni, conforme mostra a figura 14.

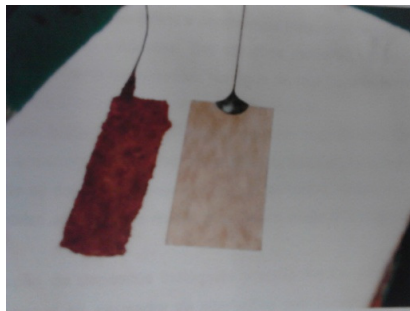
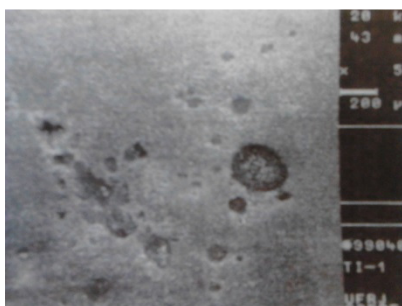


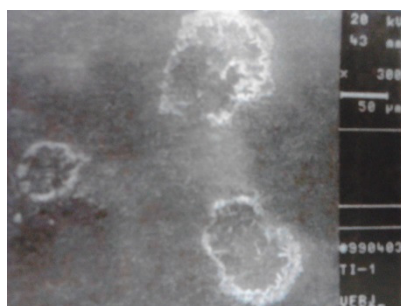
Figura 13 – titânio após 7 dias de exposição no mar.

Figura 14 - titânio (esquerda) e liga de cobre/níquel 90/10 (direita) após 25 dias de exposição no mar.

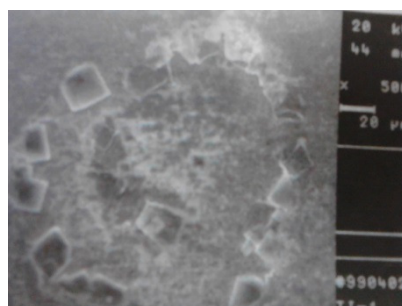
Os corpos de prova de titânio expostos no mar por 25 dias apresentaram corrosão localizada, na forma de pite como demonstra os ensaios metalográficos a seguir. O ataque da superfície está associado às incrustações de macrorganismos, conforme será apresentado no item seguinte. A figura 15 mostra uma região de superfície com vários pites e indicam alguns detalhes do ataque produzido.



(aumento original de 50X)



(aumento original de 300X)

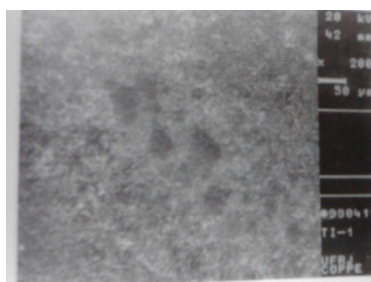


(aumento original de 500X)

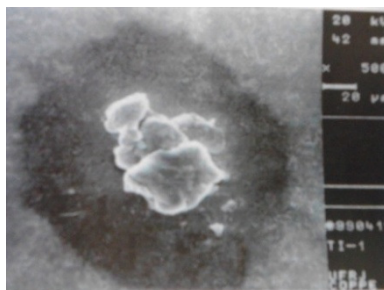
Figura 15- - Detalhe de pites na amostra de titânio com exposição no mar por 25 dias

A Figura 16 mostra o resultado das observações das amostras de titânio imersas na água do mar inoculada com larvas de cracas e nutrientes em 10 dias de exposição no ensaio de laboratório. Como pode ser verificado, o titânio sofreu corrosão, com formação de pites.

A morfologia do ataque parece ser diferente daquela observada nas amostras expostas no mar por longo tempo.



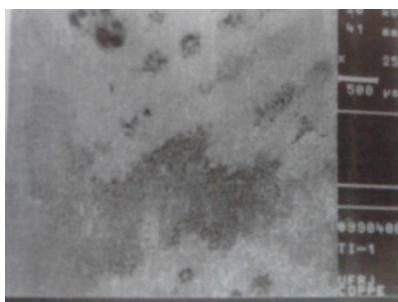
(aumento original de 200X)



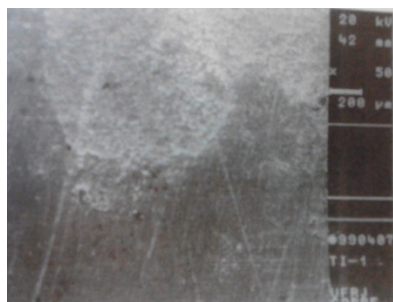
(aumento original de 500X)

Figura 16 - Região atacada na amostra de titânio imersa na água do mar inoculada com larvas de cracas e nutrientes. Ensaio de laboratório - 10 dias

O aspecto da superfície dos corpos de prova da liga Cu/Ni expostos no mar pode ser visto nas figuras 17. Como mostra esta figura, a liga sofre corrosão na água do mar, apresentando áreas atacadas ao lado de áreas sem ataque.



(aumento original de 25X)



(aumento original de 50X)

Figura 17- Região com vários pontos atacados na amostra da liga de cobre/níquel 90/10 exposta no mar por 25 dias

Os corpos de prova de titânio imersos nos meios 2 (água do mar sem larvas e com nutrientes) e 3 (água do mar esterilizada) não foram examinados por microscopia eletrônica. Entretanto, as observações feitas durante os experimentos revelaram ausência de corrosão do titânio nestes meios.

Por outro lado, todos os corpos de prova da liga Cu/Ni submetidas aos ensaios de laboratório apresentaram corrosão, à semelhança do que ocorreu na exposição no mar.

Avaliação de micro e " *macrofouling*" nos ensaios de laboratório.

As observações dos corpos de prova foram feitas durante os ensaios de laboratório, buscando identificar e quantificar macroorganismos fixados nas superfícies expostas.

Nos corpos de prova de titânio que estavam imersos no meio 1, foi observado a fixação das larvas de craca, a partir do 7º dia de exposição, sendo contabilizado ao final do ensaio um total de 34 cracas, em uma área de exposição de aproximadamente 8 cm².

Nos corpos de prova da liga Cu/Ni, imerso no meio 1, foi observado logo no início dos ensaios que as larvas não resistiram a toxidez do meio, em função da presença de íons de cobre dissolvidos e vieram a morrer prematuramente.

Ao final dos ensaios foi observada a mudança da coloração do meio, que ficou azulado caracterizando a presença de íons de cobre na solução. Sendo que a superfície do corpo de prova permaneceu sem nenhuma incrustação.

Não houve fixação das larvas nos meios 2 e 3, pois os mesmos foram usados como controle do experimento e não continham larvas.

A avaliação do biofilme formado foi feita no final do experimento, quando os corpos de prova foram examinados no laboratório de microbiologia do IEAPM, para identificação dos microrganismos presente no biofilme.

Os corpos de prova de titânio foram logo colonizados por uma população variada de microrganismos como tetraselmis, cocci, narícula, mixococcus, micrococcus e pseudomonas, que passaram a habitar no biofilme formado interagindo com o substrato do metal propiciando ancoragem para fixação de macroorganismos.

Os corpos de prova foram primeiramente colonizados pelas bactérias coccoides que são capazes de se reproduzirem com baixo nível de nutrientes produzindo material extracelular.

Após a formação do filme bacteriano, foi criada a condição necessária para o desenvolvimento das diatomáceas e outras microalgas que passaram a predominar no biofilme conforme mostra a figura 13.

6.0 CONCLUSÃO

O cobre e suas ligas geralmente fornecem boa resistência ao " *biofouling*". A presença de íons de cobre na interface óxido-água é efetiva na prevenção da aderência de organismos marinhos.

Os tubos de titânio apesar de serem mais resistentes que os de cobre, são mais suscetíveis à formação de " *fouling*" em seu interior, visto que a velocidade de desenvolvimento das incrustações pode vir a ser 3 vezes mais rápida, devido à inexistência de óxido de cobre, composto altamente tóxico para formas de vida marinha.

Os resultados dos experimentos nos mostraram que na liga de cobre/níquel 90/10 não houve fixação de cracas tanto nos experimentos de laboratório quanto no mar, evidenciando o poder de rejeição dos organismos marinhos a este metal que os atinge de forma letal.

Já em relação ao titânio, vimos que tanto no mar quanto em laboratório houve a fixação das cracas e foi encontrado indícios de formação de pites evidenciado pela microscopia eletrônica de varredura na região de onde retiramos as cracas fixadas. Isto nos conduz a uma reflexão sobre a necessidade de dedicarmos mais tempo à pesquisa do comportamento deste material de modo a termos um entendimento mais amplo a respeito deste fenômeno.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Leite, Nelri Ferreira, Efeitos da Incrustação de Macroorganismos sobre Materiais de Centrais Nucleares que Utilizam Água do Mar nos Sistemas de Refrigeração (Rio de Janeiro) 1999. X, 78 p.29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1999)
- [2] - Videla, H. A. "Corrosion microbiologica y biofouling en sistemas industriales". Manual pratico de biocorrosion y biofouling para la industria. pp 4-26 1995.
- [3]- Videla, H.A., Gomez de Saraiva, S.G., de Mele, M.F.L. MIC of Heat Exchanger Materials in Marine Media Contaminated with Sulphate-Reducing Bacteria, CORROSION/92, Paper No. 189, NACE International, Houston, TX.

[4] Lacombe, D. ; Monteiro, W. Desenvolvimento larvário de balanídeos em laboratório – *Balanus amphitrite* (var.amphitrite). Memórias do Instituto Oswaldo Cruz 70(2): pp. 176 – 206, 1972

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Paulo Artur Pimentel Tavares da Silva, nascido em São José dos Campos/SP em 01/07/1970, concluiu o curso de Engenharia Química pela Escola de Química da UFRJ em 1996. Concluiu MBA de Gerenciamento de Empreendimentos com ênfase em Condicionamento e Comissionamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas FGV (2009). Trabalhou desde 1996 na Divisão de Proteção Radiológica como técnico, engenheiro e supervisor até 2003 na Eletrobras Eletronuclear nas Usinas de Angra 1 e 2. Trabalha como Engenheiro de Sistemas na Gerência de Desempenho de Sistemas e de Reator de Angra 1 – Eletrobras Eletronuclear, desde 2003. Participou de vários Congressos e Seminários apresentando trabalhos técnicos contribuindo para divulgação do Setor Nuclear nos meios acadêmicos e empresariais.

Nelri Ferreira Leite, nascido no Rio de Janeiro em 27/08/1959, concluiu o curso de Engenharia Química pela Escola de Química da UFRJ em 1984. Obteve o título de Mestre em Ciências (M.Sc.) no Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ na área de Corrosão, concluiu MBA de Gestão Empresarial com Ênfase em Negócios pela Fundação Getúlio Vargas. Trabalhou durante 2 anos na Indústria Aeronáutica desenvolvendo atividades de manutenção de aeronaves como Oficial da Força Aérea Brasileira, atua na área Nuclear desde 1986 desenvolvendo atividades de Projeto de sistemas e otimização de processos das Centrais Nucleares de Angra 1 e Angra 2. Participou de vários Congressos apresentando trabalhos técnicos contribuindo para divulgação do Setor Nuclear nos meios acadêmicos e empresariais.