

PROPOSTA DE MANUTENÇÃO DO REATOR DO FUTURO SUBMARINO NUCLEAR

PAULO APICELO DE SOUZA PEREIRA*
Professor

SUMÁRIO

Introdução
Objetivo
Desenvolvimento
Resultados Finais
Conclusões

INTRODUÇÃO

O Brasil tem investido na área nuclear ao longo de várias décadas, com o propósito de dominar essa fonte de energia e as tecnologias utilizadas no seu uso em diferentes aplicações. Dentre estas devem se destacar a produção de energia, com o domínio do ciclo do combustível nuclear, a operação de reatores nucleares e os usos na medicina, na agricultura, na indústria convencional e na propulsão nuclear.

Em países desenvolvidos, como Estados Unidos da América (EUA), França, Inglaterra, Suíça, Canadá e Japão, a energia nuclear é responsável por grande parte da energia elétrica total instalada. O mundo possui 443 reatores de potência instalados, sendo 300 do modelo PWR (Pressurized Water Reactor), segundo relatório da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) [1].

Na aplicação naval, e no caso das embarcações militares, a instalação nuclear mostrou determinadas vantagens insuperá-

* Mestre e doutor em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe-UFRJ). Professor e pesquisador do Instituto de Ciência e Tecnologia – Universidade Federal Fluminense. Trabalhou, de 2009 a 2014, como engenheiro de Tecnologia Militar na Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (Cogesn).

veis pelas instalações de propulsão convencionais, sobretudo no caso dos submarinos. Uma das vantagens é a independência energética, pois, devido ao longo período entre “reabastecimentos”, a embarcação tem uma autonomia limitada apenas por necessidades da tripulação e por desgastes das máquinas, podendo se deslocar para uma zona de conflito sem necessidade de uma embarcação de apoio ou base para reabastecimento, segundo as palavras de Santos [2]. Outra vantagem da propulsão nuclear, e que é vital quando se fala em submarinos, é a independência do ar, que torna o submarino praticamente invisível, pois este não necessita vir à cota periscópica para recarga de baterias, situação em que o submarino fica vulnerável a um ataque.

A razão de ser de um submarino de propulsão nuclear é a dissuasão, o que a sua simples existência é capaz de assegurar. A importância de tê-lo no rol do nosso Poder Naval pode ser mais bem compreendida ao atentar-se para a magnitude dos interesses marítimos do Brasil. Com um litoral em torno de 8,5 mil quilômetros de extensão, extraímos do mar mais de 90% do nosso petróleo – cerca de 2,5 milhões de barris por dia. Da mesma forma, grande parte do nosso comércio exterior, entre exportações e importações, é feito por via marítima.

OBJETIVO

A aplicação da propulsão nuclear, devido ao fenômeno da radiação, requer características de segurança e habitabilidade distintas daquelas exigidas das embarcações convencionais. De modo a garantir a integridade e a operacionalidade da instalação de propulsão nuclear, são exigidas de seus equipamentos maior confiabilidade e maior disponibilidade, implicando maior peso e maior número de equipamentos devido à redundância que é

demandada pelos sistemas da instalação. Além disto, a instalação propulsora nuclear requer maior rigor nos procedimentos de inspeção e manutenção.

Este trabalho propõe uma ferramenta para inspecionar a superfície e medir a camada de óxido em tubos de revestimento de Elementos Combustíveis (EC) nucleares irradiados de reatores de propulsão nuclear do tipo PWR, com o intuito de verificar a condição real do óxido, após a remoção definitiva destes combustíveis para a Piscina de Combustíveis Usados (PCU) nas paradas programadas do submarino. Nas usinas de Angra I e II, que possuem o mesmo tipo do reator que será instalado no submarino, simulava-se o efeito da corrosão em códigos computacionais de empresas estrangeiras. O END Correntes Parasitas já é utilizado na inspeção superficial das varetas dos EC de Angra I e II para verificar a integridade da superfície, quanto à existência de mossas, perda de espessura ou outras descontinuidades e também nos tubos internos dos geradores de vapor.

A corrosão e a consequente perda de material destes tubos iniciam-se na oxidação, que é a terceira maior causa de falhas dos elementos combustíveis em usinas nucleoeletricas, e, como na propulsão naval, estes elementos fazem parte da segunda barreira física de proteção contra vazamento de radionúcleos; por isso, então, almeja-se desenvolver uma ferramenta para sua inspeção, pois a vareta deve ser estanque e íntegra para reter os resíduos gasosos restantes.

DESENVOLVIMENTO

Breve Histórico do Programa Nuclear da Marinha

De 1976 a 1978, amadureceu na Marinha a ideia de que o Brasil deveria se preparar para construir um submarino

com propulsão nuclear, importante instrumento naval de dissuasão e defesa. Admitiu-se que seria indispensável a tecnologia própria, porque nenhuma grande potência a transferiria (Estados Unidos, Rússia, França, Reino Unido e China). Avaliado o cenário tecnológico nacional, a Marinha juntou-se ao Instituto de Pesquisas Energéticas e

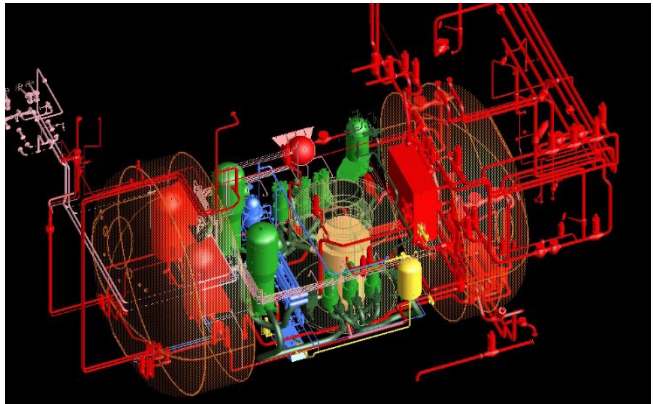


Figura 1 – Ilustração da instalação propulsora projetada para o Labgene

Nucleares (Ipen) no desenvolvimento do ciclo do combustível e do reator, tendo sido adotada a ultracentrifugação para o enriquecimento. O projeto das ultracentrífugas, especificamente, começou a ser pensado em 1978 e foi iniciado de fato a partir de 1980, sendo que em 1982 a MB assinou contrato com o consórcio alemão IKL/HDW/Ferrosstaal, dando início ao Programa de Construção de Submarinos Convencionais.

A segunda parte do Programa envolveu a capacidade de projetar um submarino convencional derivado do projeto IKL original, ainda operacional, que veio a ser o atual *Tikuma* (S-34).

Brasil e França firmaram, em 2008, um acordo para viabilizar a produção do primeiro Submarino Brasileiro de Propulsão Nuclear (SN-BR), o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (Prosub). Além da concepção do SN-BR, há ainda o complexo sistema de apoio em terra ao submarino, na cidade de Itaguaí (RJ).

O Centro Industrial Nuclear de Aramar (Cina), em Iperó (SP), abriga o Laboratório de Geração Nucleoelétrica (Labgene), de onde sairá o primeiro reator nuclear 100% brasileiro – os de Angra I e II são, respectivamente, norte-americano e alemão.

A principal aplicação do Labgene será aprimorar o projeto e construir uma réplica para o primeiro submarino nuclear brasileiro [3]. No prédio principal, está sendo montada uma réplica em escala real das seções do submarino responsável pela propulsão nuclear, para testar cada detalhe do reator, dos motores e de todos os sistemas da embarcação envolvidos na propulsão, além de treinar a tripulação.

Fundamentos dos Submarinos de Propulsão Nuclear

Nos reatores nucleares industriais ou de propulsão naval do tipo PWR, a reação de fissão nuclear acontece dentro de varetas que compõem uma estrutura chamada elemento combustível. Estes reatores são térmicos (os nêutrons térmicos de baixa energia causam a maioria das fissões), chamados também de reatores de potência (com o propósito de gerar energia) e refrigerados e moderados a água leve, usando urânio enriquecido, conforme Pereira [4]. O reator tipo PWR foi adotado pelo Brasil na construção de suas centrais nucleares e do futuro SN-BR. Os reatores pressurizados a água são os mais largamente utilizados na geração

de energia, devido às boas características da água como refrigerante e como moderador, aliadas à sua simplicidade, com baixo custo, grande confiabilidade e facilidades de controle. Devido a estas características, os PWR são predominantes na propulsão de embarcações.

Os materiais combustíveis básicos para geração de energia nuclear, encontráveis na natureza, são o urânio e o tório. Outro material de importância, mas obtido por irradiação do urânio, é o plutônio (Pu). Dos principais isótopos fissionáveis – U-233, U-235, Pu-239 e Pu-241 –, somente o U-235 ocorre naturalmente, em concentrações menores que 1% em massa (0,71%). O restante é composto praticamente do U-238, o qual é fissionável. O enriquecimento isotópico é a operação de enriquecimento do urânio que tem por propósito aumentar a concentração do urânio 235 do urânio natural. Maiores aprofundamentos e outros conceitos importantes podem ser vistos em Tauhata, Salati e Prinzió [5], Murray [6] e Böhm e Holzer [7].

A principal diferença entre o submarino de propulsão convencional e o de propulsão nuclear é que o primeiro dispõe de um banco de baterias e de geradores acoplados a motores de combustão externa a diesel, enquanto no nuclear os geradores são interligados à turbina de propulsão que recebe o vapor superaquecido do reator. O sistema de propulsão de um submarino está ligado aos bancos de baterias, e o gerador diesel recarrega tais baterias.

Pode-se dividir uma instalação nuclear tipo PWR em dois circuitos distintos:

primário (à direita, onde estão o reator, o gerador de vapor e o pressurizador) e secundário (no meio da figura, onde estão as turbinas e o condensador), conforme mostra a Figura 2.

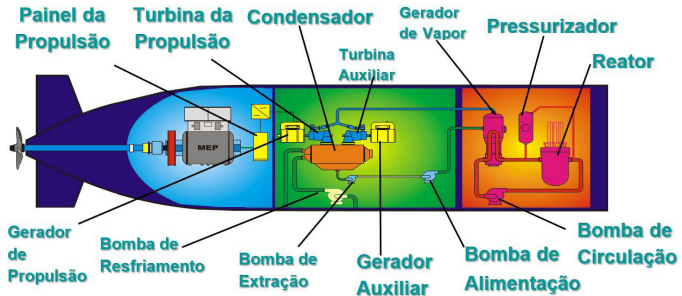


Figura 2 – Instalação Propulsora Nuclear (IPN)

No circuito primário é onde ocorre a geração de calor por meio da fissão nuclear e onde fica contida a maioria dos equipamentos que trabalham diretamente com o refrigerante. A tubulação ligada à saída do reator é dita perna quente, e aquela ligada à saída do gerador de vapor, passando pelas bombas de circulação e voltando para o reator, é dita perna fria. A fronteira entre os circuitos primário e secundário da planta é o conjunto de tubos dos geradores de vapor. Nestes equipamentos ocorre a transferência de calor com o resfriamento do refrigerante primário e a geração de vapor no refrigerante secundário. Os geradores de vapor se colocam como pontos críticos da planta. Falhas nestes equipamentos podem resultar em contaminação do circuito secundário e eventual liberação de radionuclídeos para o ambiente externo.

O circuito secundário de um submarino nuclear opera com o mesmo princípio das plantas nucleares convencionais a vapor, sendo composto basicamente de turbina, condensador, bombas de condensado e bombas de alimentação. A caldeira

é substituída pelo gerador de vapor do circuito primário, e o condensador é resfriado pela água do mar.

Apresentação do Elemento Combustível

A busca de materiais para uso em elementos combustíveis nucleares, que apresentem baixa seção de choque para absorção de nêutrons e, no caso de tubos de revestimento dos EC, que mostrem boa resistência mecânica e à corrosão, levou ao estudo do zircônio [8]. Este metal, por não apresentar boas qualidades mecânicas a altas temperaturas a que é submetido em regime de trabalho num reator, é estudado para formar ligas que melhorem suas propriedades mecânicas. Dessas ligas, uma das mais utilizadas hoje em dia é

o Zircaloy-4, que é predominantemente usado nos reatores de Angra I e II.

Os tubos de revestimento do combustível, fechados em ambas as extremidades por meio de tampões soldados, servem para fixar o combustível, protegendo-o da ação corrosiva e destrutiva do refrigerante, impedem a liberação de produtos de fissão para o refrigerante e garantem, em razão de suas propriedades mecânicas especiais, segurança na manipulação, assim como irradiação intensa e econômica do dióxido de urânio (UO₂).

A Figura 3 apresenta esquematicamente os componentes do elemento combustível para o reator de Angra I, similar ao que será usado no submarino num comprimento e em quantidades menores.

Este artigo visa à análise pós-irradiação do EC, em que a vareta apresenta oxida-

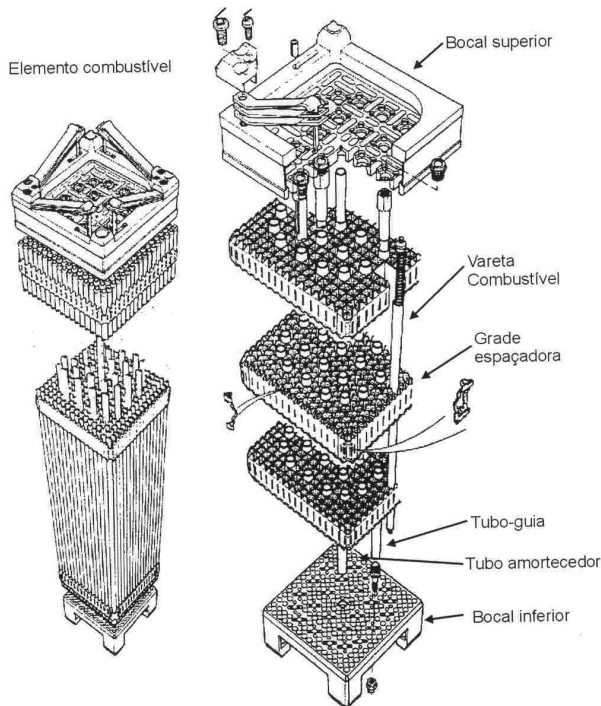


Figura 3 – Apresentação do Elemento Combustível de Angra I [4]

ção superficial e precisa ser mensurada para que o critério de projeto da corrosão (17% da espessura total ou 100 microns de espessura) não seja ultrapassado. Neste trabalho utilizaram-se amostras oxidadas artificiais criadas em laboratório simulando as condições termodinâmicas do reator em operação, dada a dificuldade de operar e inspecionar EC irradiados reais.

Perrota [9] informa que, depois de feitos os estudos de falhas nos elementos combustíveis dos reatores PWR de Angra I e II, chegou aos seguintes mecanismos principais e causas raízes de falhas: corrosão, defeitos de fabricação, hidratação primária e secundária, atrito grade espaçadora-vareta e atrito por debris. Dando ênfase ao fenômeno químico da oxidação, que é o alvo principal deste trabalho, há a necessidade de uma ferramenta eficaz que avalie sua condição e espessura real durante o ciclo de vida do submarino nuclear.

Após a análise das principais falhas em EC, ressaltou-se a importância da Engenharia de Manutenção para a IPN e as medidas para aumento da confiabilidade operacional do meio naval, que também dependem das medidas de inspeção e testes, necessárias para preservar a segurança operacional e para atingir um alto fator de disponibilidade. Deve ser dedicada atenção especial à vigilância do estado das barreiras físicas de retenção de materiais radioativos, em particular das regiões do envelope estanque do Circuito Primário. Onde possível, devem ser feitos testes em amostras removíveis que foram expostas a condições similares ou aceleradas durante os mesmos ciclos de funcionamento [10]. Isso foi feito com amostras artificiais na dissertação de Pereira [4], e a proposta é fazer o mesmo para as IPN.

A sequência atual de testes e ensaios não destrutivos nos EC das usinas nucleares de Angra I e II (reator tipo PWR) pode

ser aplicada nos EC da IPN no espaço dentro da futura base de Itaguaí, no prédio chamado “Ilha Nuclear”, durante a Parada para Manutenção Geral (PMG). São eles:

1. determinação da atividade do refrigerante do primário durante operação – é medida pela radiação gama por meio de detectores de cintilação que fazem parte dos sistemas de processamento nuclear;

2. In-mast Sipping Test – é um teste de vazamento realizado dentro do mastro da máquina de recarga responsável pelo içamento e pela movimentação do elemento combustível na área do reator e piscina de armazenamento temporário. Ele contém contadores de radiação Geiger-Müller que identificam vazamentos, caso existam, nas paredes ou nos tampões das varetas, confirmando ou não a integridade das mesmas;

3. exame visual – é feito no elemento combustível por meio de câmeras filmadoras preparadas para trabalharem submersas e fixadas na máquina de recarga. Neste exame procura-se verificar o estado geral do EC, das superfícies externas das grades, bocais e varetas. Auxilia na identificação de marcas de *fretting* ou atrito, depósitos nas superfícies das varetas, amassamentos ou deformações, desalinhamentos de varetas e grades, aparência geral das soldas dos tampões, incrustações ou colorações típicas de oxidação;

4. análise da integridade e medição da camada de óxido por Correntes Parasitas – após a constatação de falha de um EC no In-mast Sipping Test, deve-se averiguar qual vareta apresenta vazamento. Para isso, durante as paradas de rotina das usinas, conforme foi descrita no procedimento feito pela antiga Siemens [11], recorre-se à inspeção da integridade por Correntes Parasitas de cada uma das varetas do EC suspeito dos reatores da Eletronuclear, usando uma unidade de reparo montada numa das paredes da

piscina de combustíveis usados, chamado de Faru (Fuel Assembly Repair Unit), que consiste basicamente de um elevador com sistemas de fixação do EC, que o recebe da posição de armazenagem e levanta, com auxílio de ponte rolante, cada vareta de sua posição original para inspeção por bobinas envoltivas.

As inspeções são conduzidas utilizando-se bobinas circunferenciais convencionais, pelas técnicas da frequência simples, sem mistura de sinais, em arranjo diferencial, com diâmetros adequados às dimensões dos tubos e com um dispositivo mecânico de centralização das varetas no interior das bobinas.

A outra aplicação, neste caso, inovadora e considerada pelo autor como a contribuição científica deste trabalho, é a medição de camada de óxido das paredes das varetas, que Pereira [4] desenvolveu usando a Técnica das Correntes Parasitas baseada no efeito *lift-off*, que é capaz de medir com precisão protótipos de varetas de Zircaloy oxidados artificialmente, usando bobinas desenvolvidas e projetadas especialmente para esta aplicação. No submarino nuclear, ela poderá ser realizada ao fim da vida útil dos EC para verificar as condições reais da oxidação nas varetas e contribuir com a atualização e aperfeiçoamento dos critérios de projeto. Para os EC usados nos reatores PWR, esta inspeção pode ser feita nos intervalos das recargas e trocas de posições destes elementos.

Corrosão em Elementos Combustíveis

A propriedade que possuem certos metais e ligas de resistirem à corrosão e à oxidação a temperaturas diferentes da ambiental deve-se à formação de uma camada de óxido sobre a superfície do metal, à natureza desse óxido, sua aderência ao metal-base, sua permeabilidade, sua com-

posição química, sua estrutura, seu ponto de fusão e seu ponto de volatilização, do que depende a maior ou menor capacidade do metal resistir à oxidação e ao ataque do meio circunvizinho. Em se tratando de elemento combustível nuclear para reatores PWR, a corrosão é uniforme na superfície do revestimento.

Segundo Paiva [8], uma fração do hidrogênio liberado no decorrer da oxidação é absorvida pelo metal devido à sua grande afinidade com o zircônio, depois de passar através do óxido. Após exceder a capacidade de dissolução na liga, a fração de hidrogênio se separa na forma de hidreto de zircônio, dentro da estrutura cristalina. Água e vapor atacam o Zircaloy, e o processo de formação do óxido envolve liberação de hidrogênio, que é absorvido e dissolvido no metal, segundo a equação:



Quando o metal se satura de hidrogênio, resulta na formação de outra fase no metal, o hidreto de zircônio que se precipita. O efeito importante disso é baixar a ductilidade do material, contribuindo ainda para a formação de trincas e fissuras. A camada de óxido gerada protege o material e se comporta com uma barreira diante do ingresso de hidrogênio. Entretanto, quando esta camada se torna muito grossa (da ordem de 20 μm), podem aparecer fissuras, ao mesmo tempo em que diminui a eficiência de transferência de calor através da parede do revestimento. O maior efeito da corrosão na integridade dos tubos de revestimento resulta de dois processos:

- a formação de camadas de ZrO_2 causa a perda de espessura no revestimento; e
- a absorção de hidrogênio pela liga de zircônio causa fragilização no revestimento.

Os fatores que afetam as reações descritas incluem a temperatura da superfície,

a química e a microestrutura do material do revestimento, o resfriamento local e a química do refrigerante.

A Westinghouse Electric Company desenvolveu o código PAD [12], para ser a principal ferramenta de projeto e avaliação da *performance* das varetas combustíveis para reatores PWR de usinas nucleares. O código calcula interativamente os efeitos inter-relacionados de temperatura, pressão, comportamento elástico e plástico do revestimento, liberação de gases de fissão, densificação e inchaço das pastilhas em função do tempo e da potência do reator. No projeto da vareta para as usinas nucleares, os critérios de projeto para o revestimento das varetas devem obedecer aos seguintes parâmetros, segundo o PAD [12]:

- A temperatura da interface metal-óxido não deve exceder 400° C no revestimento do Zircaloy-4 e 415° C no Zirlo®.

- A estimativa de hidrogênio capturado no revestimento das duas ligas não deve exceder 600 ppm em volume médio no fim da vida.

- O estado permanente na oxidação do revestimento das duas ligas deve ser considerado no cálculo da oxidação total no caso de Loca (Loss of Coolant Accident).

O critério de aceitação Loca 10 CFR 50.46 diz que a oxidação máxima local não deve exceder 17% da espessura do revestimento.

- A espessura máxima do óxido não pode exceder 100 µm.

Estes critérios estão de acordo com a norma ASME, seção III. O modelo utilizado pelo código pode ser visto na referência [12].

Esta ferramenta computacional é usada pela Indústria Nucleares do Brasil (INB) para análise e acompanhamento quantitativo da camada de óxido dos elementos combustíveis queimados das usinas. Entretanto, durante as paradas das usinas, é feita também a inspeção visual da superfície destes elementos; porém é impossível mensurar a oxidação através de sistemas comuns de TV. Sugere-se que sistemas similares de TV também possam ser usados nos submarinos operados pela Marinha do Brasil.

Análise de Segurança da Instalação Propulsora Naval

Para evitar o escapamento de radioatividade, as centrais nucleares e os submarinos nucleares são projetados usando-se o conceito de barreiras múltiplas. Elas representam uma sequência de obstáculos (nem todos físicos) para bloquear a passagem de material radioativo proveniente do combustível, ou onde possa se originar, para a população ou o ambiente circundante. Na Figura 4 observa-se um diagrama em que são esquematizadas as barreiras múltiplas e suas relações. O foco do trabalho será na segunda barreira.

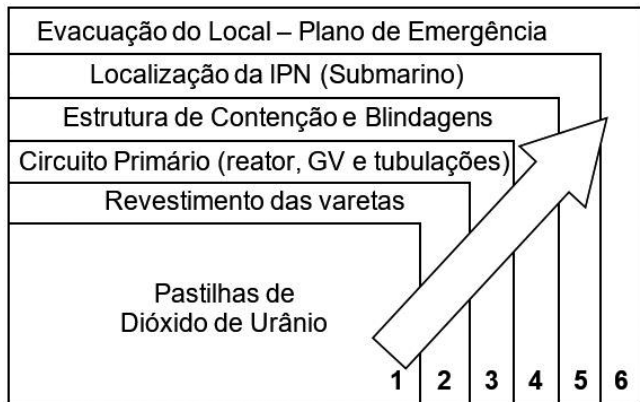


Figura 4 – Barreiras Múltiplas de uma Central e de uma IPN

– 1ª barreira

O dióxido de urânio (UO₂) é um material cerâmico e retém os produtos de fissão sólidos – 98% da radioatividade gerada durante a operação da IPN. Os produtos de fissão voláteis e gasosos Kr, Xe e I (volátil, comporta-se como gás) são liberados lentamente do material cerâmico. A liberação de produtos de fissão voláteis (e dos sólidos) é inibida pela segunda barreira.

– 2ª barreira

O revestimento das varetas de Zircaloy ou aço inoxidável. Embora sujeito à cuidadosa inspeção, o revestimento pode ocasionalmente desenvolver fissuras, principalmente ao final do ciclo, causadas, entre outros motivos, pela corrosão. Como resultado, pequena quantidade de radioatividade escapa para o refrigerante. Portanto, esta barreira é o local de aplicação principal do trabalho: propor o uso da Técnica de Correntes Parasitas na inspeção superficial das varetas dos elementos combustíveis que são inseridos no reator da IPN do submarino nuclear, de modo a contribuir para a evolução da confiabilidade operacional e segurança desta barreira.

Teoria de Correntes Parasitas

Neste item inicia-se a explicação da técnica de inspeção que visa contribuir para a 2ª barreira de contenção, que se trata dos revestimentos dos EC. Trata-se do ensaio por correntes parasitas que consiste em induzir correntes elétricas numa peça eletricamente condutora, através de um campo eletromagnético variável, e em observar a interação entre as correntes

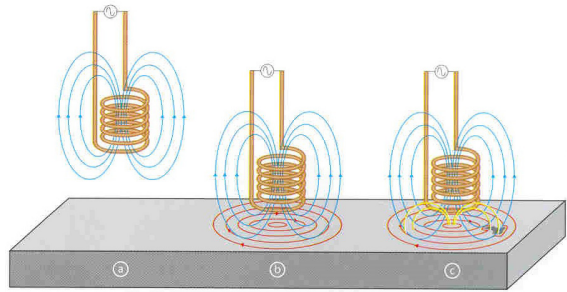


Figura 5 – Campo magnético alternado induzindo correntes elétricas

induzidas e o material. As correntes parasitas são geradas no material por meio de bobinas, quando são excitadas por correntes elétricas variáveis. Detalhes podem ser vistos em Pereira [4] e Soares [14].

Como se pode observar na Figura 5, há na subsuperfície do corpo de prova uma superposição dos campos magnéticos indutor e induzido, ambos influenciando a bobina, gerando nesta um sinal que traz as características elétricas, magnéticas e geométricas da amostra. Pode-se considerar que a bobina e a amostra formam uma só unidade, e o sinal medido nela depende das características geométricas da bobina, da frequência da corrente excitadora, das propriedades elétricas e magnéticas do material da amostra, das dimensões da amostra e da existência de descontinuidades na amostra. A análise dessas dependências leva à conclusão de que o método de ensaio por correntes parasitas pode ser aplicado para determinação das dimensões da amostra (espessura metálica e espessura de revestimentos metálicos e não metálicos – inclusive oxidação), determinação de materiais e detecção e avaliação de falhas.

No ensaio por correntes parasitas, os elementos sensores do ensaio não destrutivo são as bobinas, as quais, em diferentes formas, arranjos e tamanhos, compõem

diversos tipos de sondas, para diferentes aplicações, e também podem variar em número. Numa inspeção, quando se utiliza o campo magnético gerado fora da bobina, exatamente na região de um dos polos magnéticos, diz-se que a sonda é superficial.

Quando a bobina de ensaio é superficial, o termo usado para descrever o efeito que a variação do espaçamento existente entre ela e a peça provoca na formação do sinal é denominado *lift-off*. Assim, pode-se usar este efeito para medir espessuras de camadas de revestimento não condutor, tais como tintas, camadas anodizadas ou camadas de óxidos, colocadas sobre metais condutores.

A Técnica da Análise de Fase é a responsável pela análise da grandeza chamada impedância, que é lida no instrumento do inspetor. A técnica é fundamentada nos diagramas de plano de impedâncias, em que se observam os efeitos das variações de condutividade, de distância sonda-amostra, de frequência e de espessura do material.

Experimento de Oxidação Forçada para a criação de Corpos de Prova

Para medição e teste da bobina, não foi permitido utilizar as varetas dos elementos que estavam em uso ou já estocadas nas piscinas de combustíveis usados das usinas nucleares, pois elas continham os resíduos do decaimento radioativo do urânio e não havia no Brasil, na época deste experimento, células quentes para manuseio destes elementos. Assim, foi desenvolvido um procedimento experimental para criação, em laboratório, da oxidação do ZrO_2 semelhante à encontrada *in situ*. Para a medição da camada oxidada, a vareta poderia estar vazia, e, por isso, amostras de Zircaloy-4 certificadas e novas foram usadas neste experimento.

Este tópico propõe-se a descrever como foi o experimento laboratorial para a criação de corpos de prova oxidados de Zircaloy-4, cuja camada foi medida em microscópio, com o intuito de servirem de padrões para a definição de uma correlação para a bobina superficial de medição de camada de óxido. O ZrO_2 cresce sobre o Zircaloy-4 nas condições do reator e comporta-se como um dielétrico; portanto, pode-se utilizar o método de correntes induzidas para a avaliação de espessuras deste tipo de óxido, executando medidas de *lift-off* ao medir a distância entre o sensor e o material condutor.

Investigou-se a linearidade do sistema, preparando-se um dispositivo mecânico de fixação das bobinas e apoio dos corpos de prova, mediante o qual se observou que a tensão induzida no secundário é uma função linear da distância entre a sonda e o metal (*lift-off*).

Segundo Hillner e Chirigos [15], a substituição de Li^+ por Zr^{4+} em camadas de óxido ocorria facilmente durante a reação de corrosão por causa do tamanho similar dos íons Li^+ e Zr^{4+} , o que acelera a corrosão. Por isso, foi utilizado o hidróxido de lítio como catalisador da reação.

A preparação de corpos de prova foi baseada no artigo de Perrotti [16], em que tubos de revestimento de 300 mm são expostos dentro da autoclave, para ensaio de corrosão acelerada, em solução de $LiOH$ a 350 °C, 2000 ppm diluído em um litro de água desmineralizada a 170 bar. Essas condições termodinâmicas de ensaio são similares às dos reatores em operação. Esta técnica permite obter espessuras de óxido mensuráveis; posteriormente, foram cortados corpos de prova de 5 mm e embutidos em resina (baquelite), preparada para ensaio metalográfico para a medição direta da espessura do óxido por microscopia óptica, com um aumento máximo de 1.650 vezes.

Preparou-se uma seção quadrada de grade de inonel de 5 por 5 células utilizada como dispositivo para fixação de 12 seções de tubos de revestimento. Quatro seções identificadas de tubo de 30 mm de comprimento serviram como amostras de ganho de peso. Pesou-se a massa obtida com a oxidação, e fez-se uma comparação com a literatura internacional.

Para a medição da camada de óxido dos tubos, era necessário preparar a amostra para análise metalográfica, conforme as figuras 6, 7 e 8. Seccionavam-se cinco milímetros na parte inferior do tubo para embutimento. As amostras eram prensadas, marcadas na baquelite para manter a rastreabilidade dos corpos embutidos e polidas, conforme as normas do laboratório da INB para análise metalográfica. Após, levava-se ao microscópio com régua graduada em microns e media-se, em três pontos equidistantes, a camada de óxido de cada um deles. Em seguida, eram registradas as medidas obtidas.

Foram realizadas 11 etapas de ganho de peso e dez de medição de camada de óxido, e em cada etapa foram registradas as datas e horas de início e fim, as horas acumuladas, os corpos de prova retirados e o diâmetro médio de cada tubo medido no microscópio. A concentração da solução de 2000 ppm de LiOH foi feita pelo controle do pH a cada retirada do conjunto para análise.

RESULTADOS FINAIS

Verificou-se, nesta experiência, que a medição exata da camada de óxido é uma tarefa difícil, pois, apesar de a corrosão ser classificada como uniforme ao longo da superfície, na prática há uma variação pequena desta medida entre as amostras mensuradas com o mesmo número de horas acumuladas. Nas amostras espe-



Figura 6 – Prensa



Figura 7 – Polidor



Figura 8 – Microscópio com régua

cíficas de ganho de massa de oxidação, calculou-se o ganho de peso em mg/dm². Dividindo o peso total pelo número de dias ($888 \text{ horas} / 24 \text{ horas} = 37 \text{ dias}$), chegou-se à média de aproximadamente 39,66 mg/dm² por dia. Comstock [17] fez esse mesmo teste a longo prazo e constatou que a espessura de óxido formada é

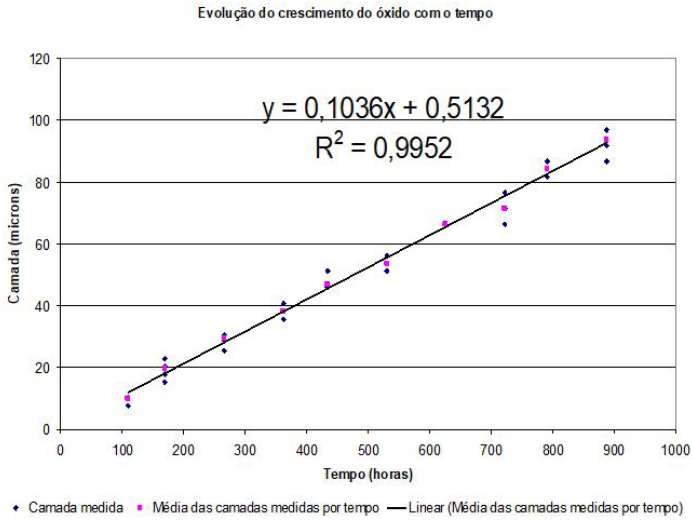


Figura 9 – Evolução do crescimento do óxido com o tempo

uma correlação direta com o peso ganho usando a proporção de 1 μm equivalente a 15 mg/dm^2 . Verificando os dados obtidos neste experimento, concluímos que o erro foi de apenas 0,95% em relação aos dados do mesmo autor, quando usou-se a amostra de maior espessura.

A evolução do crescimento do óxido com o tempo pode ser vista na Figura 9, elaborada em MS Excel 2003. O R-quadrado da regressão mede a proporção da variabilidade em Y, que é explicada por X. Um valor de R-quadrado muito próximo de 1 indica uma forte relação entre as duas variáveis, apesar de a re-

lação poder ser positiva ou negativa. O R-quadrado de 0,9952 revela a forte tendência da lei de oxidação ser linear, conforme a equação mostrada.

Outra visualização dos resultados deste experimento é comparar a evolução das camadas oxidadas nas fotos tiradas no microscópio. Para duas amostras de tubos, podemos ver dois aumentos distintos, conforme a Figura 10. A cor branca das fotos é o tubo de Zircaloy-4, e a escura é a baquelite. É importante ressaltar que as fissuras na face externa dos tubos mostram como as paredes da superfície podem perder material.



Figura 10 – Comparação de uma amostra com 110 horas de ensaio e aumento de 825 x, e outra com 888 horas de ensaio e aumento de 82,5 x

O desenvolvimento completo da bobina para uso submerso nas condições em que o elemento combustível se encontra (imerso na piscina de combustíveis usados das usinas nucleares) requer alterações de projeto para torná-la à prova de água, usando Teflon ou PVC. O meio em que ela foi projetada e testada (ar ambiente) possui propriedades físicas (permeabilidade magnética e condutividade) diferentes daquelas encontradas na água, mas, como antes de qualquer inspeção, há o balanceamento da impedância da bobina com a impedância do equipamento de inspeção. Isso permite a aplicação da bobina projetada para qualquer condição, inclusive imersa em condições reais na piscina ou no reator.

Na medição de espessuras de camadas de óxido, depositadas sobre varetas de elementos combustíveis, por questões de praticidade dessas medições, opta-se pela utilização de sondas superficiais do tipo “caneta”. A natureza da medição que se deseja fazer exige a utilização de sonda em arranjo absoluto. Neste trabalho utilizou-se um equipamento que opera

com o sistema de ponte de impedâncias, e, dentro deste sistema, é necessário para o bom funcionamento do equipamento que se tenha, pelo menos, duas bobinas, interligadas entre si em arranjo diferencial, como é mostrado na Figura 11.

No centro de cada bobina existe um núcleo de material ferromagnético, uma haste cilíndrica, com diâmetro de 2,5 mm, obtida de um arame de solda, que concentra todo o campo magnético gerado no interior da bobina e que é amplificado, aumentando consideravelmente a intensidade desse campo, possibilitando que a bobina seja montada num carretel de pequenas dimensões, com poucas espiras. A indutância medida em cada sonda foi de 15,9 μH , o que leva a uma frequência fundamental de 500 kHz. Quando acoplada ao equipamento modelo MAD 8D, do fabricante Eddy Current Technology, Inc. (ECT), é possível operar na faixa de frequência de 150 kHz a 1.100 kHz. O equipamento utilizado é microprocessado, de até quatro canais de frequência, cada um deles com a frequência variando de 55 Hz até 4 MHz, possui controle de ganho e de fase, sensibilidade e filtro de frequência para supressão de ruídos destas mais baixas. Permite fazer análise, baseada em medidas de amplitude e fase dos sinais de indicações detectadas, e gravações e reproduções dos parâmetros de ensaio e de todos os sinais de indicações.

Na Figuras 12, pode-se observar, no interior de uma das bobinas, a de referência, a inserção de um pequeno tubo metálico, feito de Zircaloy, sem qualquer oxidação e com diâmetro externo e espessura iguais aos das amostras que contêm camadas de óxido. A outra sonda, a de ensaio, foi

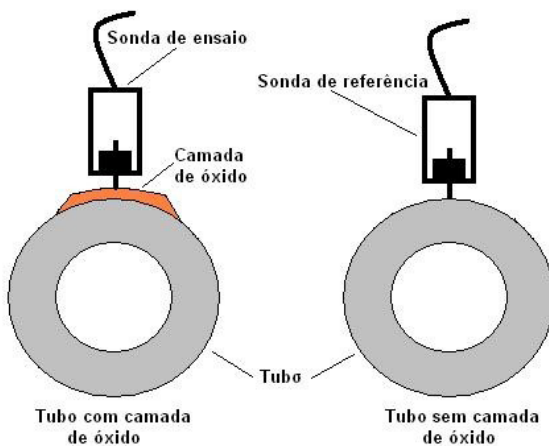


Figura 11 – Desenho mostrando a utilização de sondas superficiais do tipo “caneta”



Figura 12 – Fotografia das duas sondas tipo “caneta”, em arranjo diferencial

montada sobre uma base especialmente projetada para receber as amostras de tubos de Zircaloy que contêm camadas de óxido, com diferentes espessuras.

No circuito eletrônico do aparelho de ensaio, as sondas são conectadas a uma ponte de impedância, semelhante a uma ponte de Wheatstone, sendo, cada uma delas, um braço dessa ponte, como visto na Figura 13. Uma vez acopladas à ponte, esta pode ser equilibrada eletricamente (balanceamento) através de ajustes nas impedâncias Z_3 e Z_4 , pois estas são resistores variáveis. Antes de promover os ajustes de Z_3 e Z_4 , para se obter o balanceamento da ponte de impedâncias, posiciona-se na sonda de ensaio uma amostra (tubo de Zircaloy), sem qualquer camada de óxido. Depois de promover o balanceamento da ponte, a tensão elétrica residual que aparece nos terminais A e B é zero ou próxima de zero. Isto significa, para o sistema aparelho de ensaio X son-

das, que o meio que envolve a sonda 1 (de referência) é igual ao meio que envolve a sonda 2 (de ensaio). Assim, se a amostra de tubos de Zircaloy, sem camada de óxido, é substituída por uma outra contendo camada de óxido de determinada espessura, a ponte é desbalanceada e a tensão elétrica existente nos terminais A e B deixa de ser nula, assumindo um determinado valor que dependerá da espessura da camada de óxido da amostra colocada na sonda de ensaio. Pode-se então associar as alterações de tensão elétrica existente na ponte de impedância com as espessuras das camadas de óxido existentes nas diferentes amostras deste trabalho.

Foi registrada em cada uma das oito amostras de tubos de Zircaloy uma variação de espessura em função da camada de óxido na superfície criada artificialmente. De acordo com os ajustes dos parâmetros de ensaio feitos na calibração, foi capturada a tela do programa com o sinal

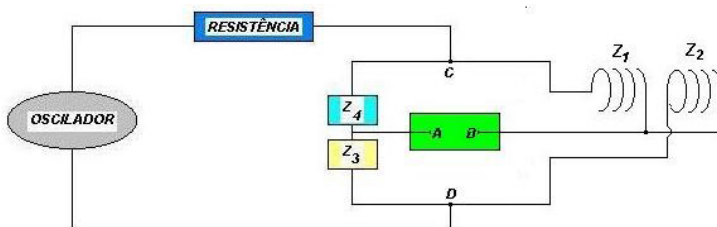


Figura 13 – Ponte de impedâncias dos equipamentos de correntes parasitas atuais

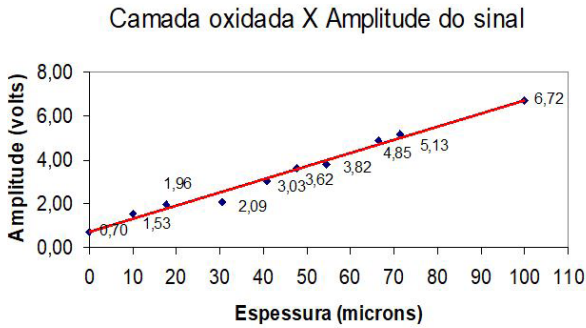


Figura 14 – Correlação entre a camada oxidada e a amplitude do sinal

correspondente ao desbalanceamento da ponte de impedância que cada amostra com diferentes espessuras provocou.

As medidas obtidas são uma grandeza vetorial. A origem do vetor é o tubo sem camada oxidada, e o fim dele é valor do efeito *lift-off* máximo, dado pela espessura da camada oxidada. Na Figura 14 é apresentada uma correlação entre as medidas feitas da amplitude em volts, associadas a cada espessura em microns da camada de óxido. Cabe ressaltar que esta reta foi extrapolada até 100 microns, que é o limite de projeto para EC de acordo com o PAD [12].

Proposta de Equipamento na base dos submarinos

Para alcançar o objetivo da medição da camada de óxido dos elementos combustíveis que estiverem sendo removidos do reator do submarino, deverá ser construído um dispositivo fixado numa das paredes da piscina de combustível com mecanismo de movimentação do braço de leitura

contendo a bobina, na direção da altura, largura e profundidade do mesmo. Esse local deverá ser na Ilha Nuclear onde o submarino atracará para reparo na base da Marinha. Procedimentos específicos devem ser feitos por pessoas qualificadas no ensaio por Correntes Parasitas e com pleno conhecimento de falhas em elementos combustíveis.

Uma unidade de reparo similar ao Faru citado para a inspeção da superfície das varetas por Correntes Parasitas dos reatores de Angra deverá ser desenvolvida na Ilha Nuclear para os SN-BR, juntamente ao dispositivo de medição de

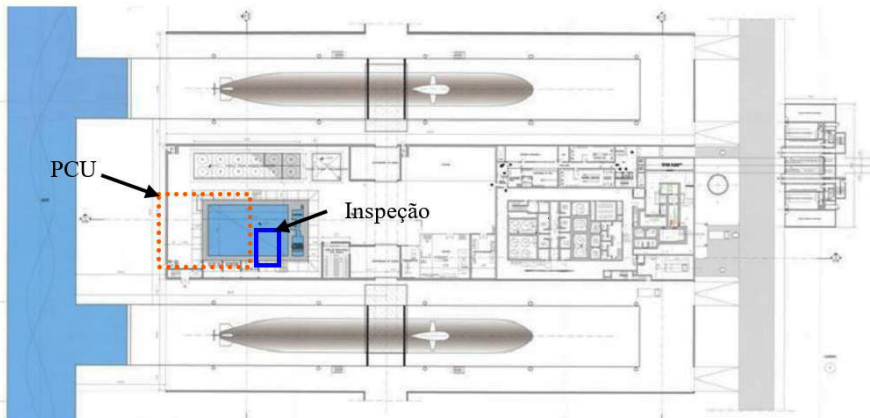


Figura 15 – Local de inspeção e armazenamento dos combustíveis nucleares na Ilha Nuclear

óxido externa ao submarino, numa PCU, próximo ao local de inspeção visual e verificação de vazamentos (Sipping Test), como ilustra a Figura 15.

CONCLUSÕES

A energia nuclear vem sendo largamente utilizada no mundo inteiro para geração de eletricidade. No caso da indústria naval militar, a propulsão nuclear encontrou grande aceitação, por tornar as plataformas militares praticamente independentes, podendo se deslocar por grandes distâncias a altas velocidades sem necessidade de reabastecimento. Por estas vantagens, a propulsão nuclear tornou-se extremamente atrativa para submarinos, sendo que atualmente se encontram em operação aproximadamente 170 unidades.

É um trabalho de pesquisa teórica e experimental desenvolvido por Pereira [4] em 2007, pois adapta uma ferramenta desenvolvida originalmente para ser usada em usinas nucleares para instalações propulsoras de submarinos, com a confecção de protótipo e amostras em laboratório. Uma bobina foi projetada para a medição da camada oxidada nas varetas de elementos combustíveis de usinas nucleares, e propôs-se a aplicação nos combustíveis dos submarinos. Visa criar um aplicativo industrial de baixo custo e elevado retorno para a garantia da integridade. O mecanismo de acionamento automático não foi feito, pois engloba conceitos de automação e controle.

A aplicação prática e os conhecimentos teóricos abordados neste trabalho procuram contribuir com o desenvolvimento tecnológico e a soberania da indústria militar e nuclear no Brasil.

CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:

<CIÊNCIA & TECNOLOGIA>; Combustível; Energia Nuclear; Submarino Nuclear;

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Power Reactors in the World, Viena, 2020.
- [2] SANTOS, Anilton de Jesus. “Considerações no Projeto de Embarcações com Propulsão Nuclear”. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.
- [3] SINAVAL. Disponível em: <http://sinaval.org.br/2020/08/como-esta-o-projeto-do-submarino-nuclear-brasileiro/> Acesso em: 17 dez. 2020.
- [4] PEREIRA, Paulo Apicelo de Souza. “Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas visando à Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis”. Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, março de 2007.
- [5] TAUHATA, L.; SALATI, P.A.; PRINZIO, R. Di. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. Décima revisão, Instituto de Radioproteção e Dosimetria/CNEN, Rio de Janeiro, junho de 2014.
- [6] MURRAY, Raymond L. *Nuclear Energy – An introduction to the concepts, systems and applications of nuclear process*. Fifth edition, Editora Butter Worth-Hunemann, 2001.
- [7] BÖHM, Werner; HOLZER, Rolf. “Reatores a Água Pressurizada para Centrais Nucleares”. Tradução informal do original alemão “Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke” feita pela Nuclebrás, KWU, Erlangen, Alemanha, 1974.

- [8] PAIVA, José Roberto Tavares de. “Propriedades Mecânicas das Ligas Zircaloy-4, Coppe/ Nuclebrás”. Projeto Urânio, Rio de Janeiro, novembro de 1975.
- [9] PERROTA, José Augusto. Apostila do Curso de Capacitação para Inspeção Visual de Combustíveis PWR Irradiados. Ipen, São Paulo, 2002.
- [10] GUIMARÃES, Leonam dos Santos. “Síntese de Doutrina de Segurança para Projeto e Operação de Submarinos Nucleares”. Tese de doutorado, USP, São Paulo, 1999.
- [11] Relatório de Trabalho Siemens B13/89. “Inspeção de elementos combustíveis queimados”. Hanal, Alemanha, 1981.
- [12] PAD, Fuel Rod Design Code, Westinghouse, EUA, 2005.
- [13] MANHÃES, Tatyanna Barreira. “A Atividade de Licenciamento no Submarino com Propulsão Nuclear: uma Análise Comparativa”. *Revista Pesquisa Naval*, Brasília-DF, n. 30, 2018, pp. 23-29.
- [14] SOARES, Adolpho. *Correntes Parasitas*, 1ª edição, Abende, São Paulo, 2005.
- [15] HILLNER, E.; CHIRIGOS, J. N. “The effect of LiOH and related solutions on the corrosion rate”. *Bettis Atomic Power Laboratory Report*, WAPD-TM-307, 1962.
- [16] PERROTI, A.; LANZANI, L.; MARENGO, J. A.; CORONEL P.; SPINOSA, C., Ruch, M. *Evaluacion no destructiva de espesores de oxido em zircaloy*, Argentina, 2004.
- [17] COMSTOCK, Robert J.; MOTTA, Arthur T.; YILMASBAYHAN, Aylin, “Structure of zirconium alloy oxides formed in pure water with synchrotron radiation and optical microscopy: relation to corrosion rate”, *Journal of Nuclear Materials* 324, 2004.