

NANOTECNOLOGIA APLICADA NO COMBATE À CORROSÃO



Aldenir Henrique Ribeiro¹
 Carlos Eduardo José da Silva²
Leandro de Oliveira Vieira³

André César da Silva - Ten Cel Eng⁴

RESUMO

Para que a estabilidade dos metais possa ser preservada, é preciso eliminar os fatores que contribuem para o processo corrosivo. Neste contexto, a nanotecnologia e a nanociência vêm despontando como recursos multidisciplinares que ampliam o alcance do entendimento humano na compreensão de novas alternativas e soluções para as necessidades atuais. Este artigo visa relacionar o mecanismo da corrosão com a metalurgia e com as nascituras nanociência e nanotecnologia, como uma proposta de pesquisa mais aprofundada que viabilize um significativo aumento da segurança de voo e a redução dos custos diretos e indiretos a elas relacionados.

Palavras-Chave: Corrosão. Nanotecnologia. Nanociência. Metalurgia. Revestimento. Biocorrosão.

1 CFOE AV. Servia em 2006 no Parque de Material Aeronáutico de São Paulo, como Inspetor de Aeronaves e Mecânico de Voo. Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

2 CFOE AV. Servia em 2006 no 2º/3º Grupo de Aviação Base Aérea de Porto Velho, como Encarregado da Seção de Equipamento de Voo e NVG (Night Vision Google). Bacharel em Administração.

3 CFOE AV. Servia em 2006 no 2º/3º Grupo de Aviação Base Aérea de Porto Velho, como Mantenedor da Aeronave A-29. Licenciado em Matemática.

4 Leitor Técnico: Serve no Instituto de Estudos Avançados (IEAV), como Adjunto da Direção.

1 - O PROBLEMA DA CORROSÃO PARA A ATIVIDADE AÉREA

A deterioração espontânea dos materiais metálicos, causada pela sua interação físico-química com o meio operacional, representa alterações prejudiciais indesejáveis, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-os inadequados para o uso.

A indústria aeronáutica tem grande preocupação com a manutenção de aviões e helicópteros para evitar, ou minimizar, esses processos de deterioração que podem causar elevados custos diretos, indiretos e perdas de vidas humanas. A International Air Transport Association / Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) estimou, em 1983, que são gastos de dez a vinte e quatro dólares por hora de voo só na manutenção anticorrosiva, sem ser considerada a troca de peças corroídas. Cerca de 30% dos dólares gastos com manutenção estão relacionados com corrosão e 25% das quebras e trocas de componentes são causadas por ela.

2 - CORROSÃO E METALURGIA

É possível afirmar que a corrosão é um processo inverso ao da metalurgia (GENTIL, 2004). Enquanto esta última procura fornecer meios de estabilizar um material no meio em que vai ser utilizado, a primeira traz deterioração e perdas devido a um ataque químico ou eletroquímico, conforme a figura 1.

R. CFOE	Belo Horizonte	n.3	p. 39 - 52	2007
---------	----------------	-----	------------	------

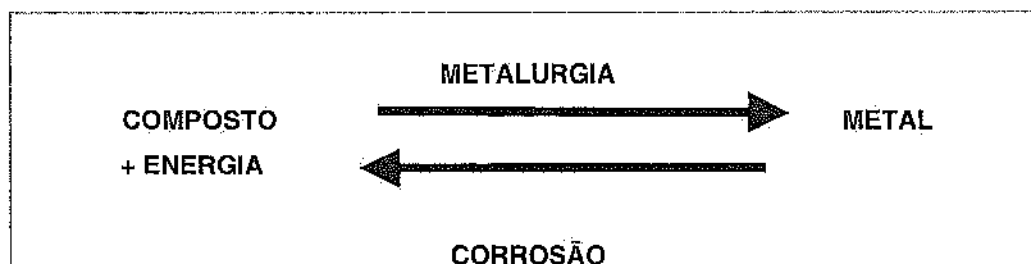


Figura 1: Diagrama de comparação entre a metalurgia e o processo da corrosão.

Fonte: Gentil, V. *Corrosão*. 4. ed, Rio de Janeiro: LTC, 2004.

Um material estável é aquele que pode subsistir em vários ambientes sem sofrer alterações químicas ou estruturais. Portanto, quando avaliamos a estabilidade de um material, devemos antes considerar as possíveis variações na sua composição e na sua estrutura interna durante a operação. Para que esta estabilidade possa ser preservada, é preciso eliminar os fatores que contribuem para o processo corrosivo, dentre os quais, o contato das superfícies metálicas, sob certas condições, com um eletrólito é o mais suscetível de intervenção preventiva. Esta intervenção é geralmente feita aplicando – se produtos químicos, como a própria pintura, que bloqueiam o contato da superfície com o eletrólito. Esta ação demanda, nos procedimentos normais, o manuseio de produtos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente; daí a necessidade de se buscarem novas soluções para a problemática apresentada.

A corrosão avança paralela e proporcionalmente ao desenvolvimento tecnológico, por isso as medidas para sua prevenção e combate não podem ser relegadas à segundo plano. São necessários,

R, CFOE	Belo Horizonte	n.3	p. 39 - 52	2007
---------	----------------	-----	------------	------

pois, investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos métodos que nos permitam agir eficazmente na prevenção e controle dos processos corrosivos.

3 - NANOTECNOLOGIA: A EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS

Neste contexto, a nanotecnologia e a nanociência vêm despontando como recursos multidisciplinares que ampliam o alcance do entendimento humano na compreensão de novas alternativas e soluções para as necessidades atuais. Assim, vislumbramos apresentar, de forma simples, como essas áreas da ciência podem nos auxiliar a diminuir exponencialmente os riscos envolvidos na atividade aérea, mais pontualmente quanto aos recursos materiais críticos.

O papel pioneiro e colaborativo do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) para a participação tecnológica do setor aeroespacial brasileiro está sendo desafiado pela emergência de tecnologias radicais, como as nanotecnologias, que se espera que modifiquem substancialmente a evolução das trajetórias tecnológicas do setor aeroespacial. As nanotecnologias são consideradas tecnologias disruptivas, visto que revolucionaram setores e indústrias. No sentido schumpeteriano⁴, essas criações modificarão setores industriais

⁴ A razão, segundo Joseph Schumpeter, para que a economia saia de um estado de equilíbrio e entre em um boom (processo de expansão) é o surgimento de alguma inovação, do ponto de vista econômico, que altere consideravelmente as condições prévias de equilíbrio. A introdução de uma inovação no sistema econômico é chamada por Schumpeter de "ato empreendedor", realizada pelo "empresário", visando à obtenção de um lucro. O lucro é o motor de toda a atividade empreendedora, segundo o autor, o qual trata o lucro não como a simples remuneração do capital investido, mas como o "lucro extraordinário", isto é, o lucro acima da média

fundamentalmente, destruindo aquelas empresas ou até setores que não sejam capazes de reinventar-se para poder participar das novas trajetórias tecnológicas que se desenham. Quando estiver plenamente desenvolvida, a nanotecnologia será a base da nova revolução tecnológica, possivelmente a mais benéfica e, todavia, a mais perturbadora da história humana.

Este artigo visa, pois, relacionar o mecanismo da corrosão com as nascituras nanociência e nanotecnologia, como uma proposta de pesquisa mais aprofundada que viabilize um significativo aumento da segurança de vôo e a redução dos custos diretos e indiretos a elas relacionados.

4 - A REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS NANOTECNOLOGIAS

As nanociências e nanotecnologias se referem, respectivamente, ao estudo e as aplicações tecnológicas de objetos e dispositivos que tenham ao menos uma de suas dimensões físicas menor que, ou da ordem de, algumas dezenas de nanômetros, segundo dizem os autores Melo e Pimenta (2004). O termo grego "*nano*" significa anão; assim, um nanômetro (1nm) corresponde a um billionésimo de um metro. Estes autores explicam que há novas propriedades físicas e químicas ausentes em um mesmo material, quando de tamanho microscópico ou macroscópico, e que são observadas na nova escala nanométrica.

Com isso, enquanto a nanociência busca entender a razão para a

exigida pelo mercado para que haja novos investimentos e transferências de capitais entre diferentes setores.

R. CFOE	Belo Horizonte	n.3	p. 39 - 52	2007
---------	----------------	-----	------------	------

mudança de comportamento dos materiais, a nanotecnologia busca se aproveitar das novas propriedades que surgem na escala nanométrica para desenvolver produtos e dispositivos voltados para vários tipos de aplicações tecnológicas.

Embora a aplicação tecnológica de objetos na escala nanométrica seja bastante recente, a nanotecnologia está presente na natureza há bilhões de anos, desde quando os átomos e moléculas começaram a ser organizados em estruturas mais complexas que terminaram por dar origem à vida. De fato, existe uma infinidade de exemplos de nanossistemas biológicos que podem ser identificados na natureza. Já o interesse pelo estudo e desenvolvimento sistemático de objetos e dispositivos na escala nanométrica das nanociências e nanotecnologia como uma atividade científica teve seu marco histórico associado à palestra proferida pelo físico americano Richard Feynman, em 1959, intitulada “Há mais espaços lá embaixo”. Feynman (que veio a receber o prêmio Nobel de Física em 1965, por suas contribuições ao avanço da teoria quântica) sugeriu que um dia o homem conseguiria manipular objetos de dimensões atômicas e assim construir estruturas de dimensões nanométricas segundo seu livre arbítrio. (MELO; PIMENTA, 2004, p. 14).

Melo e Pimenta (2004) descrevem que existem dois procedimentos gerais para se obterem materiais na escala nanométrica. O procedimento de baixo para cima (*bottom-up*), consiste em construir o material a partir de seus componentes básicos, ou seja, seus átomos e moléculas; isto se aplica à criação de estruturas orgânicas, inorgânicas e mesmo híbridas, átomo por átomo, molécula por molécula como se fossem tijolos. Eles vão sendo empilhados e unidos até que a estrutura esteja completa. Em um

R. CFOE	Belo Horizonte	n.3	p. 39 - 52	2007
---------	----------------	-----	------------	------

esquema de baixo para cima, é possível construir um nano-objeto pela deposição lenta e controlada de átomos sobre uma superfície bastante polida e regular. Muitas vezes, os átomos depositados se organizam espontaneamente, formando estruturas bem definidas de tamanho nanométrico. Ao contrário do procedimento “*bottom-up*”, também é possível fabricar um objeto nanométrico pela eliminação do excesso de material existente em uma amostra maior do material, utilizando-se as técnicas de litografia⁵. (MELO; PIMENTA, 2004, p. 15).

A engenharia foi muito rápida em adaptar o conhecimento adquirido em nanoescala e, em muitos casos, tem liderado em reconhecer as sinergias transdisciplinares disponíveis. Assim, ciências dos materiais, bioengenharia e engenharia elétrica, estão todas, rapidamente, tornando-se componentes de uma superdisciplina: a nanoengenharia. Desse modo, segundo Williams (2002), sistemas nanoengenheirados serão aqueles em que se pode desenhar a mais ampla gama de propriedades – o que, por sua vez, significa que construir qualquer coisa com controle a nível nanométrico será a maneira mais eficiente possível de produzi-la. O

5 Essa técnica foi inventada por Alois Senefelder - um jovem ator e escritor de teatro alemão - por volta de 1796, quando buscava um meio de impressão para seus textos e partituras e se deparava com o desinteresse dos editores. Acabou inventando um processo químico novo, mais econômico e menos demorado que todos os outros meios conhecidos na época. A ação de desenhar/escrever sobre pedra já era conhecida; o crédito de Senefelder é ter equacionado os princípios básicos da impressão a partir da mesma. Apoiou-se em textos encontrados em Nuremberg, sobre as experiências de Simon Schmidt, sacerdote e professor bávaro, sendo este o primeiro a pensar a pedra como matriz reprodutora. A Litografia foi usada extensivamente nos primórdios da imprensa moderna no século XIX para impressão de toda sorte de documentos, rótulos, cartazes, mapas, jornais, dentre outros, além de possibilitar uma nova técnica expressiva para os artistas. Pode ser impressa em plástico, madeira, tecido e papel. Sabe-se que o primeiro pintor que se utilizou com sucesso da técnica de litografia foi Goya, em sua série *Touradas*, de 1825. Este expediente artístico atingiu seu apogeu nas últimas décadas do século XIX, quando diversos autores franceses como Renoir, Cézanne, Toulouse-Lautrec, Bonnard, dentre outros, promoveram uma renovação da litografia em cores.

avanço das pesquisas em nanotecnologia é crescente e os resultados mais precisos, em escala nanométrica, propiciam o desenvolvimento de novos produtos e sistemas de alto impacto tecnológico. (KNOBEL, 2004).

Silva (2004) considera a amplitude de aplicações da Nanotecnologia na pesquisa e desenvolvimento nas áreas aeronáutica e aeroespacial a partir da utilização de materiais nano estruturados leves, resistentes e termicamente estáveis em aeronaves, foguetes, estações espaciais e plataformas de exploração planetária ou solar, o que, conseqüentemente, resulta em um grande número de inovações, produtos e riquezas decorrentes. Explana ainda sobre a necessidade de se criar e consolidar um centro de excelência de nanotecnologia no setor aeroespacial, e vale lembrar que em 2004 foi realizado o primeiro *workshop* de nanotecnologia, no ITA, com o intuito de prospectar oportunidades que possam ter aplicações no setor aeroespacial e de defesa.

5 - NANOMATERIAIS PARA O CONTROLE DA CORROSÃO

A corrosão dos metais tem efeitos econômicos e ambientais muito difundidos. O custo anual da corrosão foi estimado em \$276 bilhões de dólares, nos Estados Unidos da América (EUA). A corrosão é também uma séria questão para o departamento de defesa norte americano (DOD); é a maior fonte de custos do ciclo de vida dos equipamentos, custando ao DOD aproximadamente \$20 bilhões de dólares por ano. Atualmente os cromatos hexavalentes são os mais eficazes inibidores da corrosão; entretanto, são cancerígenos e as regulamentações logo

R; CFOE	Belo Horizonte	n.3	p 39 - 52	2007
---------	----------------	-----	-----------	------

proibirão a sua utilização na maioria dos revestimentos.

Por isso, existe um grande interesse no desenvolvimento de superfícies que não somente forneçam atividade biocida, mas que também sejam de fácil limpeza e até autolimpantes. A maioria destes revestimentos adquire sua capacidade biocida/autolimpante incorporando nanopartículas específicas: basicamente a prata (Ag) e o óxido de titânio (TiO_2). O nano- TiO_2 é usado para desenvolver pinturas anti-UV (ultravioleta), anti-bactericidas e autolimpantes. Estas possuem propriedades hidrófobas autolimpantes. Esta ação autolimpante ajuda na manutenção de importantes superfícies e a acelerar o processo de secagem. (SAJI; THOMAS, 2007, p. 54).

A evolução microbial em uma superfície pode causar a corrosão, sujeira, odor e até sérios problemas de saúde. Uma pesquisa européia está investigando como impedir o acúmulo dos organismos em superfícies sob circunstâncias marinhas para evitar a biocorrosão. O projeto objetiva utilizar o nanoestruturamento para reduzir significativamente a adesão dos organismos às superfícies em ambientes aquáticos, para controlar, assim, o processo de contaminação sem o uso de biocidas tóxicos tais como os compostos do cobre que impedem a contaminação matando organismos. A nanoestruturação de superfícies altera as suas propriedades e busca sinalizar que o local não é apropriado para o desenvolvimento de microorganismos. O projeto tem como objetivo sintetizar novos polímeros nanoestruturados que são estáveis sob condições marinhas. A criação de superfícies nanoestruturadas pode oferecer uma solução inovativa e ecologicamente viável ao problema de biocorrosão. A pesquisa desenvolveu novos sistemas de revestimento biocidas que prolongam

esta atividade immobilizando tais aditivos em nanopartículas; os biocidas engajados são projetados para serem liberados no ambiente somente quando necessitados, assim estendendo a vida ativa do biocida.

Pesquisas recentes têm apresentado uma nova classe de nanomateriais aditivos para revestimentos. Estes materiais têm sua superfície modificada para projetar melhorias de propriedades específicas. Nanopartículas podem ser utilizadas em uma variedade de aplicações incluindo inibidores da corrosão livres de cromato, aditivos biocidas, e revestimentos aditivos antiderrapantes. Estas nanopartículas são versáteis, e podem ser utilizadas em muitos tipos de revestimentos diferentes (colas-epóxi, poliuretanos e latexes).

Recentemente, foram desenvolvidas nanopartículas-base, os inibidores orgânicos da corrosão que são altamente eficazes e livres de cromato. Estas nanopartículas têm os inibidores orgânicos da corrosão ancorados à superfície que são provocados para se liberar pelo próprio processo da corrosão. Quando ancorados, os inibidores da corrosão não são solúveis, mas quando liberados migram para inibir a corrosão na superfície do metal. Estes materiais fornecem excelente resistência à corrosão nos primers epóxi aplicados nas ligas de alumínio de alta resistência. As nanopartículas se comportaram tão bem quanto os materiais à base de cromato em testes com névoa de sal de 3000 horas e nos testes, ainda mais difíceis, de 1000 horas expostos à corrosão filiforme, conforme explicitado na figura 2.

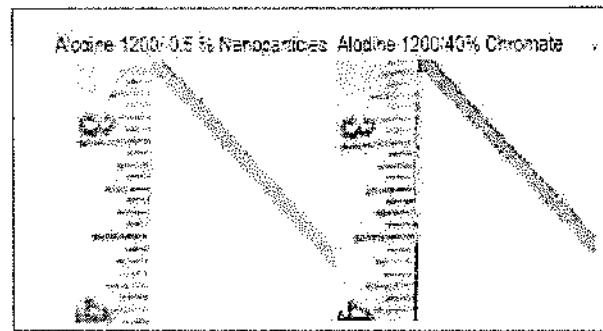


Figura 2; Revestimento de nanopartículas (esquerda) combina o desempenho de cromatos solúveis (direita) num teste de corrosão filiforme de 1000 horas, numa liga de alumínio Al-2024.

Fonte: TDA Research, Inc.

Os revestimentos arquitetônicos - que representam mais de 50% do volume do mercado - incorporam aditivos biocidas que retardam o ataque de algas e fungos. Estes revestimentos biocidas exterminam micróbios e fungos lenta e firmemente, liberando o biocida da película quando seca. Infelizmente, este mecanismo é também responsável pela desativação final da atividade biocida; uma vez que o biocida é lavado ou retirado do revestimento, toda a proteção contra os micróbios está perdida. Normalmente, a atividade biocida dura somente em torno de 18 meses, e mesmo menos em ambientes quentes e úmidos como os litorais Nordeste e Sudeste do Brasil. Uma vez que os biocidas são retirados, um revestimento novo deve ser reaplicado para reobtenção da proteção antifungos.

Contudo, pesquisas recentes vêm desenvolvendo um novo sistema de revestimento biocida que prolonga a sua atividade através da imobilização de aditivos desta substância em uma nanopartícula. Com tecnologias avançadas de nanopartículas, os biocidas encaixados são

projetados para se liberarem no ambiente somente quando necessário, estendendo assim o ciclo de vida da atividade biocida. Estes biocidas engajados eliminam a contaminação indesejada da área circunvizinha e permanecem dentro de um revestimento por muito mais tempo.

Os revestimentos antiderrapantes são importantes para a segurança no avião, onde as operações de manutenção envolvem andar ao longo das asas. Os tratamentos antiderrapantes atuais são geralmente revestimentos orgânicos misturados com grandes volumes de aditivos tais como areias ou plásticos que fazem a superfície mais áspera. Isso tem muitos inconvenientes, incluindo o aumento do arrasto, do peso e prejuízos aerodinâmicos. As superfícies extremamente ásperas são também difíceis de limpar. Hoje já existe um avançado revestimento antiderrapante usando aditivos especificamente projetados da fricção de nanopartículas. Estes revestimentos são de pequeno peso com baixo arrasto, e combinam o desempenho antiderrapante da lixa número 80.

Além disso, essa tecnologia permite que sejam incorporados os aditivos da fricção de nanopartículas diretamente na formulação do revestimento. Na maioria dos tratamentos antiderrapantes tradicionais o grão é aplicado na pintura ainda molhada e rolada na pintura, porque seria inviável misturá-lo dentro da tinta, antes da pintura. Os nanoaditivos podem ser pré-misturados e a pintura pode facilmente ser aplicada pulverizando ou pincelando sem a necessidade de trabalho adicional após a aplicação da pintura. Estes revestimentos antiderrapantes podem ser usados para revestir aviões militares naquelas áreas onde se necessita de um atrito mais elevado, sem aumentar o peso do avião ou danificar o desempenho da fuselagem. Esta tecnologia está sendo avaliada atualmente na Boeing

Company, nos helicópteros da Bell Helicopter Textron Inc. e na Marinha dos EUA (NAVY).

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inovadora nanotecnologia, com sua proposta potencialmente ilimitada, traz soluções práticas que impedem o progresso dos processos químicos e eletroquímicos da corrosão. As perspectivas da nanotecnologia indicam que ela poderá vir a ser aplicada em tudo o que é feito pelo ser humano, permitindo que melhoremos quase tudo o que fazemos atualmente e que seja criada uma infinidade de novos materiais e dispositivos que nem podemos imaginar hoje. A dimensão e a profundidade das mudanças é uma incógnita. Porém, há fortes indícios de que é necessário prospectar, mapear e monitorar as nanociências e nanotecnologias com o intuito de fortalecer a capacitação tecnológica em nichos que contribuam para o desenvolvimento econômico.

Por essas razões, o Brasil, e em particular a Força Aérea Brasileira, não pode agir de forma simplesmente reativa aos acontecimentos internacionais, mas sim assumir uma postura estratégica capaz de transpor a velocidade das inovações tecnológicas. Assim, o grave problema da corrosão poderá ser combatido eficazmente, assegurando-se não somente um sensível aumento no fator segurança da aviação, mas também serão salvaguardados interesses financeiros, pela expressiva economia dos recursos gastos, e garantida a soberania tecnológica nacional.

7 - REFERÊNCIAS

COOK, R. **Nanomaterials for coatings**. Disponível em: <<http://www.tda.com/Library/docs/Nanomaterials%20for%20Coatings%20517-04.pdf>> Acesso em: 20 jun 2007.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

KNOBEL, M. Nanoredes. **Parcerias Estratégicas**. Brasília, n.18, agosto, p.99-104, 2004.

MELO, C. P.; PIMENTA, M. Nanociências e nanotecnologia. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, n.18, agosto, p.9-22, 2004.

MOURA, E. ; URBINA , L. M. S. ; SILVA , A. C. **Uma visão estratégica sobre o curso de nanotecnologia do ITA**. São José dos Campos: CTA, 2005.

SAJI, V. S.; THOMAS, J. **Nanomaterials for corrosion control**. Disponível em: <<http://www.ias.ac.in/currsci/jan102007/51.pdf>> Acesso em: 20 jun 2007.

SILVA, A. C. Nanotecnologia: uma iniciativa recomendada para a Aeronáutica. **Air and Space Power Journal**, Alabama, p. 61-67, jan./mar. 2004.

SILVA, C. G. Nanotecnologia: o desafio nacional. **Parcerias Estratégicas**, São José dos Campos: CTA, n.18, p.5-8, 2004.

WILLIAMS, Stanley. **Entrevista ao Senado dos EUA sobre Nanotecnologia, 2002**. Disponível em: <<http://www.inovaca.unicamp.br/politicact/integra-stan.shtml>> Acesso em: 20 jun 2007.

R. CFOE	Belo Horizonte	n.3	p. 39 - 52	2007
---------	----------------	-----	------------	------