Corros. Prot. Mater., Vol. 28, Nº 3 (2009)

SENSORES DE CORROSÃO PARA AERONAVES

Artigo submetido em Março de 2009
e aceite em Junho de 2009

P. G. VENÂNCIO [1] [4] [*], R. A. COTTIS [2], R. NARAYANASWAMY [3] e J. C. S. FERNANDES [4]

Resumo

Os operadores comerciais e forças aéreas militares procuram cada vez mais uma maneira de reduzir os custos de manutenção das aeronaves e aumentar a disponibilidade das mesmas. Nesse sentido, o controlo e monitorização da corrosão numa aeronave será uma ferramenta importantíssima para o operador com vista à optimização da sua frota.

A OGMA, juntamente com o Instituto Superior Técnico (IST) e a Universidade de Manchester, está a desenvolver vários tipos de sensores de corrosão, específicos para várias áreas críticas previamente identificadas, para permitir uma monitorização da corrosão e melhor planificação do plano de manutenção das aeronaves.

No presente artigo faz-se uma revisão dos sensores actualmente em desenvolvimento e apresentam-se os estudos em curso no âmbito da cooperação acima referida.

Palavras-Chave: Sensores de Corrosão, Aeronaves, Alumínio

Corrosion Sensors for Aircraft Aging

Abstract

Commercial aircraft operators and military air forces are searching for a solution to reduce maintenance costs and increase the availability of their fleets. To achieve this objective, the control and monitoring of corrosion of the aircraft airframe will be an important tool for operators, in order to optimize their fleet.

OGMA, together with Instituto Superior Técnico (IST) and the University of Manchester, is developing several types of corrosion sensors for specific critical areas of an aircraft, which have been previously identified, in order to allow for corrosion monitoring and, thus, for a better aircraft maintenance schedule.

This paper contains a review of the sensors in development by other companies and by us, in the frame of the cooperation referred above.

Keywords: Corrosion Sensors, Aircraft Aging, Aluminium

1. INTRODUÇÃO

A corrosão custa anualmente à indústria aeronáutica milhares de milhões de euros em reparações e manutenção dos aviões [1], sendo grande parte destes custos devidos à ausência de informação sobre a extensão ou gravidade da corrosão existente.

A monitorização da corrosão e da sua progressão através de sensores permitiria minimizar o risco de falha provocada por corrosão da estrutura e, por outro lado, reduziria a necessidade de realizar paragens não programadas, permitindo uma manutenção proactiva das estruturas, com ganhos ao nível do controlo e do agendamento das operações. De facto, o conhecimento dos problemas localizados de corrosão de um avião pode contribuir para a optimização das escalas de

[1] Departamento de Engenharia e Projectos, OGMA, Indústria Aeronaútica de Portugal, 2615-173 Alverca, Portugal
[2] Corrosion and Protection Centre, School of Materials, Univ. of Manchester, P.O. Box 88, Sackville Street, Manchester, M60 1QD, UK
[3] Centre for Instrumentation and Analytical Science, Univ. of Manchester, Manchester, M60 1QD, UK
[4] ICEMS/DEQB, Instituto Superior Técnico, Univ. Técnica de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal
[*] A quem a correspondência deve ser dirigida, e-mail: paulo.venancio@ogma.pt

manutenção, permitindo que o esforço de manutenção seja concentrado nas zonas mais necessitadas.

Actualmente, muitas companhias aéreas e forças militares deixaram de ter unidades de manutenção próprias, passando a subcontratar toda a gestão das suas frotas ao fabricante ou a terceiros. Nos contratos estabelecidos o pagamento é normalmente função do tempo de operacionalidade das aeronaves, pelo que os prestadores destes serviços têm toda a vantagem em reduzir o tempo e os custos de manutenção necessários. Isto poderá ser conseguido através da monitorização "in-situ" dos processos de corrosão e fadiga, pelo que se torna necessário o desenvolvimento de unidades de monitorização simples e, preferencialmente, baratas, compostas de diferentes tipos de sensores, que possam obter a informação necessária e canalizá-la para unidades centrais de controlo. Por outro lado, embora os operadores sempre tenham procurado uma solução que minimize os custos associados à manutenção das aeronaves, essa necessidade é mais premente agora que as suas frotas estão a atingir a vida útil de projecto ("design life"). Na maior parte dos casos pretende-se que as aeronaves se mantenham a voar nos próximos anos, com segurança, o que tem vindo a provocar substanciais aumentos nos custos de manutenção associados à corrosão (Fig. 1). Devido a este envelhecimento das frotas, torna-se também necessária uma maior atenção aos efeitos da corrosão no comportamento dos materiais à fadiga, tendo sido publicados trabalhos recentes [2-4] que demonstram uma elevada redução da vida útil de projecto devida à presença de corrosão, em particular por picadas. Um sistema de monitorização eficiente que permita detectar a corrosão num estado inicial, a tempo de minimizar os seus efeitos, torna-se assim mais uma vez fundamental para evitar a degradação das propriedades mecânicas dos materiais. A futura eliminação do crómio hexavalente nos revestimentos e a falta de eficiência e confiança nas alternativas actuais, torna também imperativo a criação de métodos de monitorização eficientes.

Finalmente, o domínio e monitorização dos fenómenos de corrosão nas aeronaves permitirá construir novas estruturas, menos onerosas e mais fáceis de suportar e operar.

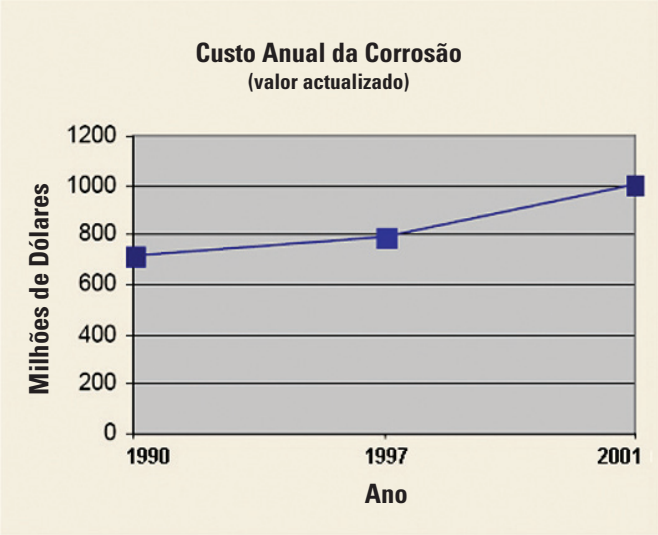


Fig. 1 - Evolução dos custos directos com corrosão na Força Aérea dos Estados Unidos (USAF) [1].

2. TÉCNICAS DE MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO

Existem várias técnicas disponíveis para a monitorização de corrosão em estruturas de aeronaves, que podem ser divididas em quatro categorias: medição directa da taxa de corrosão; medição da corrosividade do meio; detecção de produtos de corrosão e medição de variáveis ambientais que, introduzidas num modelo de previsão, permitem inferir sobre a corrosão esperada. A medição do potencial electroquímico, pH, temperatura, iões específicos, condutividade, são parâmetros típicos de medições. Cada tipo de sensor tem as suas vantagens para uma aplicação específica.

Na monitorização da degradação de uma estrutura por corrosão pode optar-se por duas vias distintas: a medição da velocidade de corrosão instantânea que ocorre no momento da medição ou a medição da perda cumulativa de material. De acordo com Ansuini [5], ambos os tipos são necessários para uma eficiente monitorização da corrosão, pelo que, dado que a maior parte dos equipamentos de corrosão utiliza apenas uma destas vias, poderá ser necessário instalar dois equipamentos independentes. No entanto, Ansuini [5] fabricou um sensor capaz de realizar as duas medições, em que a velocidade de corrosão é monitorizada pela técnica de resistência de polarização linear e a perda cumulativa de material é determinada pelo método de variação de resistência eléctrica. A USAF adaptou a ideia para construir um sensor que se encontra actualmente em intensivos testes de voo.

No presente trabalho assume-se que é possível uma melhor monitorização indirecta, utilizando apenas um método, desde que o sensor seja construído do mesmo material da estrutura a monitorizar, tenha as dimensões correctas e produza um sinal simples de detectar (ex.: a fractura do filamento do sensor). A utilização de um sensor com um material diferente da estrutura a monitorizar apenas dará indicações qualitativas da existência de um ambiente que poderá provocar

corrosão, mas para se ter uma indicação quantitativa será necessário utilizar um sensor do material a monitorizar.

O desenvolvimento de um programa de controlo e monitorização de corrosão irá necessitar dos dados fornecidos por sensores espalhados por toda a aeronave. Este dados, associados a informação estatística, poderão ajudar o operador a decidir quando e onde inspeccionar uma área. O conceito de Controlo Estatístico de Processos que é utilizado, por exemplo, na indústria química, é aplicável nos programas de manutenção de aeronaves. Um programa mais complexo e integrado de sensores de corrosão em aeronaves implicará um tratamento estatístico das medições realizadas.

Vários dos métodos discutidos anteriormente permitem uma monitorização contínua da corrosão. A maioria das técnicas utilizadas consiste em métodos electroquímicos, mas como estas técnicas estão sujeitas a pequenas flutuações electroquímicas na superfície do sensor, podem existir variações que não são inerentes ao fenómeno do processo de corrosão. São estas variações, juntamente com as alterações provocadas pelo ambiente, que fazem a utilização de meios estatísticos imperativa para determinados métodos. A implementação dos sensores na aeronave e, em particular, a forma de comunicação entre os sensores e a unidade de processamento central é também objecto de investigação. De facto, os progressos actuais na electrónica e a crescente miniaturização dos equipamentos poderão permitir dotar o sensor de uma boa capacidade de processamento de dados, podendo a comunicação ser efectuada através de diversos tipos de sistemas, com especial atenção para os sistemas sem fios ("wireless").

2.1. Sensores em desenvolvimento

2.1.1. Sensores ópticos

Actualmente, existem em estudo e desenvolvimento dois tipos de sensores ópticos: de medição indirecta da corrosividade do ambiente, utilizando o mesmo material da estrutura a monitorizar ou um material diferente, mas que se consiga relacionar o seu processo de corrosão com o do material da estrutura a analisar; e de detecção directa dos produtos de corrosão na estrutura.

Sensores ópticos de medição indirecta

Os sensores ópticos metalizados desenvolvidos para a monitorização da corrosão em estruturas aeronáuticas [6-10] utilizam uma fibra óptica, na qual se remove localmente o revestimento e a bainha ("cladding"), expondo o núcleo da fibra (Fig. 2) que é depois revestido com um filme metálico, passando a constituir a zona sensível do sensor. Os materiais depositados são os mais diversos, incluindo o níquel-fósforo [9] e o cobre [6], depositados por métodos químicos (*electroless*), e o alumínio puro [6,8] aplicado por deposição física de vapor (PVD – Physical Vapor Deposition). O funcionamento destes sensores parte da teoria de propagação da luz em fibras ópticas. A luz irá propagar-se ao longo da fibra óptica consoante a reflexão interna da fibra e o ângulo de entrada da luz na fibra (ângulo de aceitação θ_a). A bainha, com um índice de refracção inferior ao do núcleo, tem a função de impedir a fuga de luz para o exterior. Consoante a fibra utilizada, uma das suas características é o ângulo máximo de entrada que, quando ultrapassado, leva a que a reflexão interna deixe de ser total.

Na região sensível, onde a bainha é removida, é depositado um metal que consoante o ângulo de entrada da luz na fibra óptica, irá absorver uma parte da luz, provocando uma atenuação no sinal de saída (Fig. 3). Inicialmente, a zona sensível apresenta um filme metálico uniforme depositado sobre o núcleo da fibra (Fig. 4) e, à medida que o filme metálico corrói e se desagrega (Fig. 5), o sinal de saída irá aumentar devido à redução da luz absorvida na zona sensível até atingir

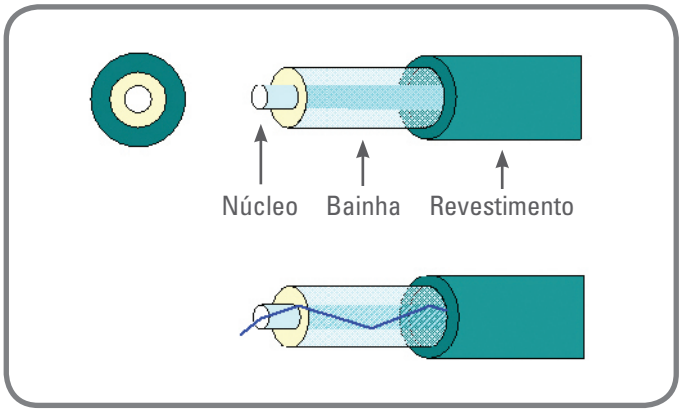


Fig. 2 - Constituição de uma fibra óptica.

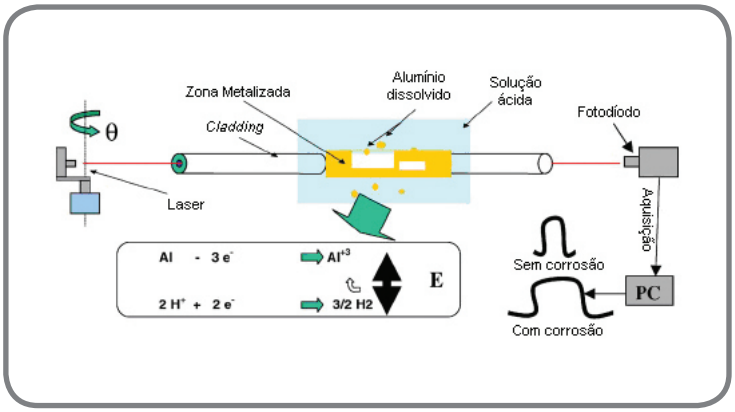


Fig. 3 - Princípios ópticos da detecção de iões alumínio [6].

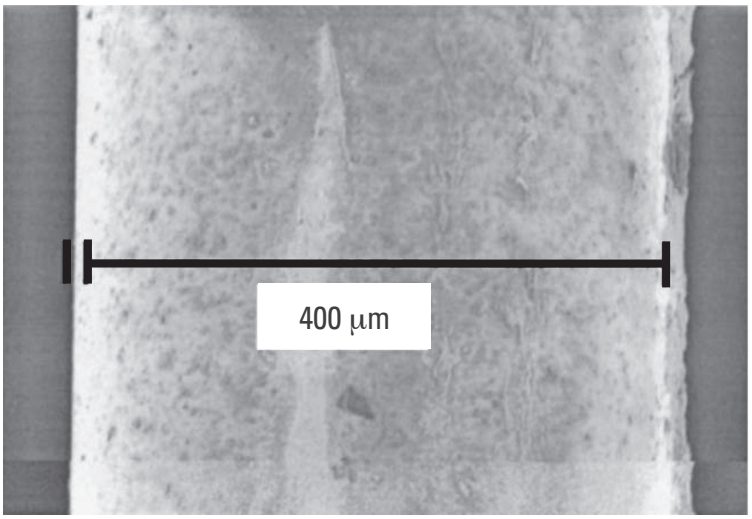


Fig. 4 - SEM da zona metalizada, níquel-fósforo, da fibra óptica sem ataque [9].

um sinal de saída estável, quando todo o material metálico da zona sensível se tiver desagregado da fibra óptica.

Se o metal depositado for o mesmo da estrutura a monitorizar, o revestimento metálico terá, em princípio, um comportamento semelhante [6,8]. Pelo contrário, no caso de se utilizar um material diferente [6,9] é necessário encontrar relações entre o sinal emitido pelo sensor e a velocidade de corrosão do metal a monitorizar.

Com base num trabalho experimental desenvolvido, Saying Dong *et al.* [8] concluíram que estes sensores apresentam algumas limitações, já que o sinal detectado praticamente não variou ao longo de 12 dias de exposição numa câmara de nevoeiro salino, o que poderia dever-se ao facto de os produtos de corrosão não se terem desagregado da fibra, por falta de um ambiente aquoso que ajude à sua remoção. Por outro lado, os revestimentos até agora utilizados nestes sensores não correspondem às ligas utilizadas na indústria aeronáutica. Por exemplo, o alumínio puro tem mecanismos de corrosão diferentes das ligas de alumínio mais utilizadas [11-17], sendo difícil encontrar correlações entre a resposta do sensor e a taxa de corrosão da estrutura base.

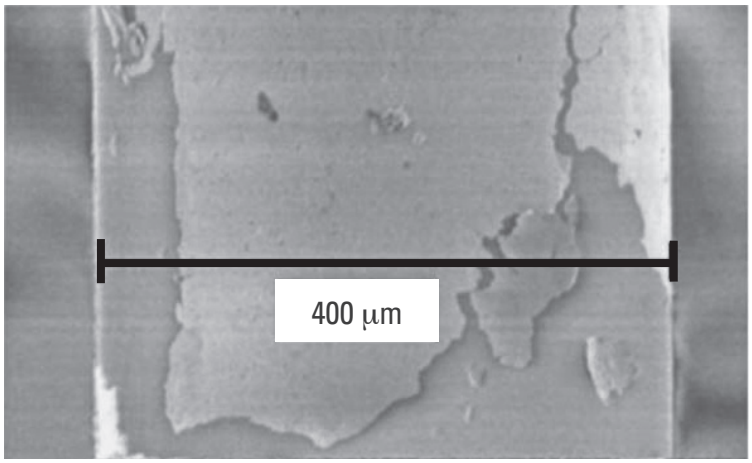


Fig. 5 - SEM da zona metalizada, níquel-fosfóro, após 1 hora em contacto com uma solução de 10^{-3} M H_3PO_4 [9].

Sensores ópticos de medição directa dos produtos de corrosão

Os sensores de fibra óptica, devido ao seu pequeno diâmetro, flexibilidade e capacidade de detecção remota, são uma excelente opção para monitorizar zonas de difícil acesso numa aeronave, como o interior de uma junta estrutural [18]. Os sensores ópticos que estão a ser desenvolvidos para a detecção directa de iões resultantes do processo de corrosão associam à fi bra óptica a tecnologia de fluorescência [18].

Resumidamente, o funcionamento dos sensores consiste da ligação à fibra de um polímero que interage com o ião em causa, levando a uma alteração do sinal óptico emitido pela fibra num comprimento de onda que é característico da presença do ião referido. Uma grande vantagem da técnica de fluorescência é que permite detectar concentrações muito baixas do produto a analisar [18-22].

2.1.2. Sensores metálicos

A força aérea dos Estados Unidos da América (USAF) é um dos principais interessados em encontrar um sensor de corrosão eficiente e barato. Na sua extensa frota, com aeronaves de diversos fabricantes, muitas já ultrapassaram a sua vida útil de projecto ("design life"), não se prevendo, no entanto, a sua substituição. Em 2001 a USAF estimou que os custos anuais associados à manutenção das aeronaves devido a problemas de corrosão ascendia a 1000 milhões de dólares. O objectivo do programa que está a ser desenvolvido – *Anticipate and Manage Corrosion Damage* - é reduzir este custo em 40% [23].

A USAF tem vindo a fazer um esforço para produzir sensores de corrosão no seu laboratório de Battele, em simultâneo com o desenvolvimento de métodos estatísticos para o tratamento de dados e algoritmos que permitam prever a evolução da corrosão [23-26]. Os sensores em causa (Figs. 6 e 7) são construídos em aço e cobre, muito mais sensíveis à corrosão atmosférica

do que os materiais a monitorizar, logo o sensor irá ter uma degradação significativa antes de o material da estrutura a monitorizar começar a deteriorar-se.

A perda cumulativa de material por corrosão é determinada por medição da resistência eléctrica de um eléctrodo exposto ao ambiente corrosivo. À medida que a secção do eléctrodo é reduzida por corrosão, a sua resistência aumenta proporcionalmente. As variações de temperatura são compensadas com a existência de um segundo eléctrodo do mesmo material e resistência, mas protegido do ambiente. O circuito medirá o aumento da resistência do eléctrodo activo em relação ao eléctrodo protegido [5,27]. Não existe literatura detalhada sobre o funcionamento do sensor desenvolvido pela USAF, mas pressupõe-se pelos dados disponibilizados que seja este o seu funcionamento.

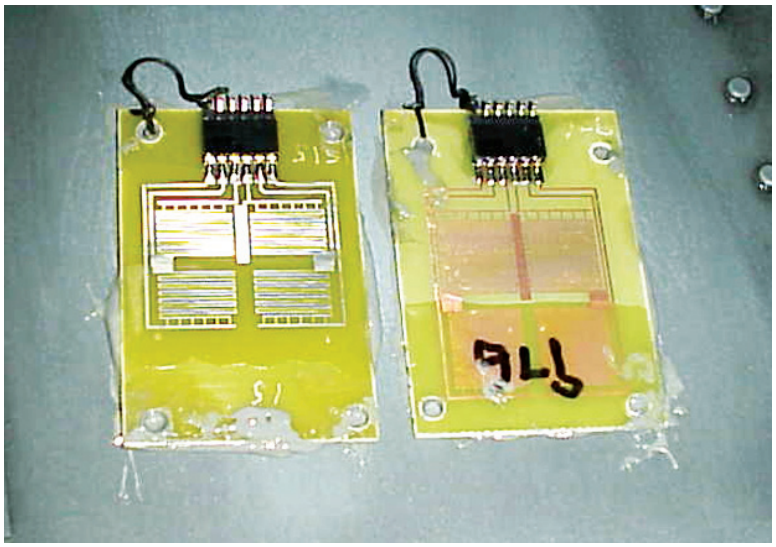


Fig. 6 - Sensores de 2 metais (Cobre e Aço) [25].

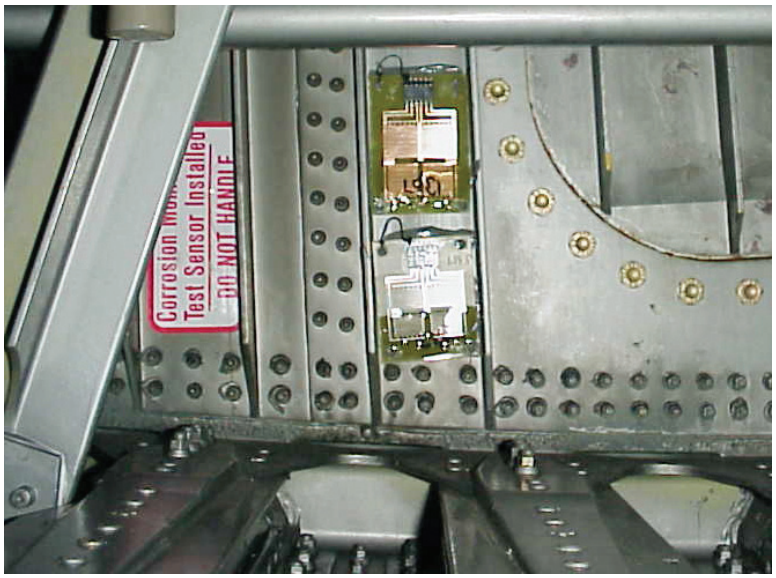


Fig. 7 - Colocação de sensores na aeronave C-130 [25].

2.1.3. Sensores piezoeléctricos

Os principais fabricantes de equipamento de origem (OEM - *Original Equipment Manufacturers*), tais como *Airbus*, *Embraer*, *Boeing* e *BAE Systems*, têm vindo a preocupar-se com a monitorização dos processos degradativos, tendo desenvolvido um programa conjunto, denominado *Structural Health Monitoring* (SHM). Um aumento da segurança e fiabilidade, associado à extensão da vida das aeronaves para além do tempo de vida útil do projecto, são as forças motoras para o desenvolvimento deste programa. Com o SHM será possível uma monitorização permanente e "in-situ" de áreas que só seriam inspeccionadas periodicamente, nas rotinas de inspecção, por métodos convencionais de ensaios não destrutivos. Mais uma vez, esta monitorização contínua torna-se especialmente importante em estruturas que já ultrapassaram o tempo de vida útil do projecto, mas é óbvio que a inclusão do sistema SHM numa aeronave nova também irá diminuir em muito os custos de manutenção. Este programa será importantíssimo num futuro próximo e poderá mudar os planos de manutenção das aeronaves, mas, por enquanto, os sensores têm sido desenvolvidos apenas com o objectivo de detectar problemas relacionados com fadiga e consequentes fracturas.

Um sistema completo de monitorização terá, contudo, que ser constituído por uma componente que monitorize a detecção de fracturas e outra componente que monitorize a evolução de corrosão.

Os sensores até agora desenvolvidos no âmbito do SHM podem indirectamente detectar o aparecimento de corrosão em áreas muito pequenas, ou seja, apesar de terem sido desenvolvidos para a detecção de fracturas e problemas relacionados com fadiga, também conseguem detectar alterações na superfície da estrutura (fractura do filme protector, inicio de corrosão) [28], visto que o funcionamento dos sensores parte de um método simples de vibração, em que os sensores piezoeléctricos funcionam como actuadores e receptores que enviam, recebem e diagnosticam os sinais de vibração (Fig. 8).

No entanto, para monitorizar uma estrutura maior que uma junta ("lap

joint") seriam necessários muitos sensores, tornando esta técnica inviável. Logo, será necessário desenvolver um sistema de monitorização de corrosão eficiente, independente do sistema de detecção e monitorização de fracturas.

2.2. Sensores em desenvolvimento no IST / OGMA / Universidade de Manchester

O desenvolvimento de sensores para a indústria aeronáutica está a ser estudado no âmbito de um projecto de colaboração entre o Instituto Superior Técnico (IST), a University of Manchester e a OGMA. Pretende-se neste projecto estudar e/ou desenvolver sensores de diversos tipos, estando prevista a realização de testes laboratoriais e também a colocação de sensores em aeronaves, de modo a estudar a sua evolução em condições reais.

2.2.1. Sensores metálicos (medição de resistência eléctrica e ruptura final do sensor)

Os sensores metálicos são construídos por dois processos, resultando em dois tipos de sensores distintos: a partir de uma chapa da liga de alumínio que se pretende monitorizar (2024 T3 ou 7075 T6) e através da deposição, por PVD, de um filme fino de uma pseudo liga, que se pretende o mais semelhante possível às ligas convencionais mencionadas.

O sensor mais "convencional", construído a partir de uma chapa da liga a monitorizar com a espessura escolhida, será cortado às dimensões pretendidas numa máquina de jacto de água (Fig. 9). Para facilitar o corte do sensor, a chapa de alumínio é colada, com um adesivo estrutural específico, a uma chapa de acrílico que posteriormente também facilitará a colocação do sensor na estrutura da aeronave. A espessura mínima dos sensores construídos a partir da chapa é limitada a 0,2 mm, o que levanta problemas na detecção das variações de resistência do sensor e no estabelecimento da sua relação com a evolução de corrosão na estrutura. Desta forma o sinal final que se pretende neste sensor é a ruptura do filamento (Fig. 10) e que essa ruptura indique que existe corrosão numa fase inicial na superfície da estrutura a monitorizar. Pretende-se que os sensores tenham um comportamento o mais aproximado possível à liga a monitorizar, para assim ter uma previsão com a máxima fiabilidade. Desta forma, e dado que numa aeronave a estrutura base é normalmente submetida a conversão crómica química e pintada com um primário com cromatos, o sensor deveria ser submetido aos mesmos tratamentos. Contudo, para se ter alguma margem de segurança, e prevendo-se falhas comuns no filme de primário na estrutura a monitorizar, tais como zonas em volta dos elementos de ligação, áreas com espessura incorrecta em que o filme fractura devido a vibrações ou fractura do filme devido a ciclos térmicos [31-34], os sensores foram construídos aplicando-se apenas conversão crómica química. Para se obter sensores menos espessos e, assim, com uma secção menor e, consequentemente, uma maior resistência eléctrica, opta-se pela construção dos sensores através da

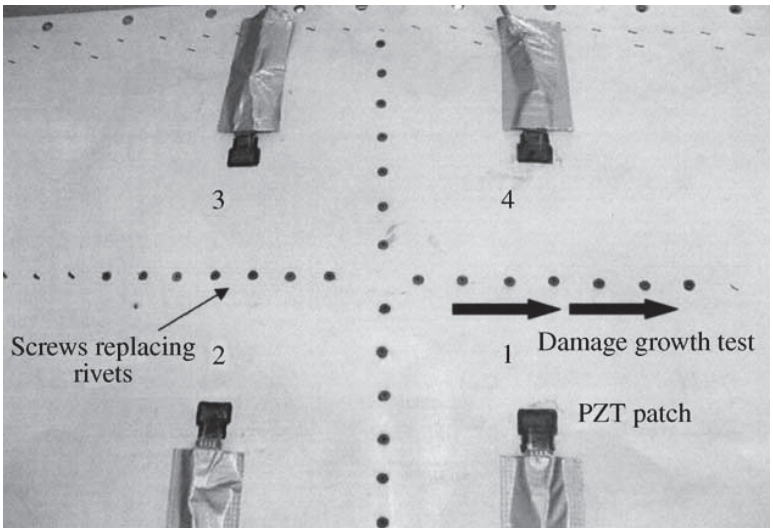


Fig. 8 - Quatro sistemas piezoeléctricos que agem como actuadores e sensores, enviando e recebendo sinais de vibração [28].

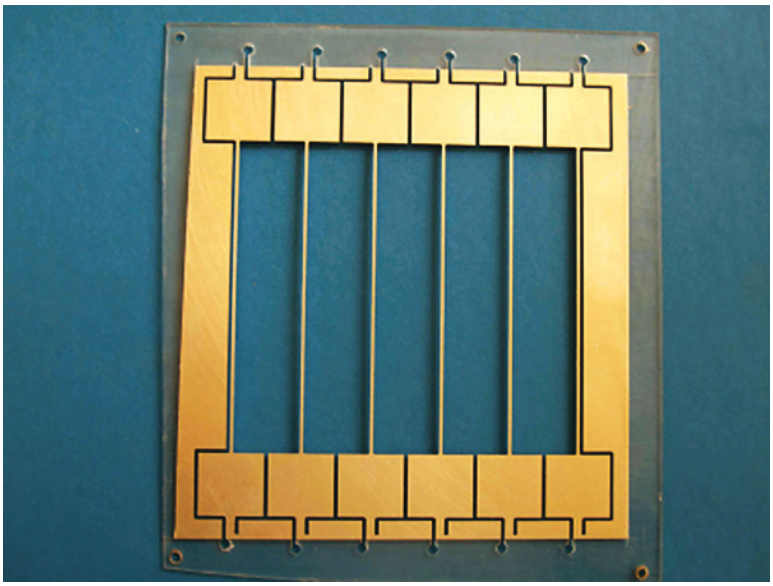


Fig. 9 - Sensores metálicos de liga de alumínio 2024 T3.

deposição de uma pseudo-liga por PVD, usando um material cerâmico como substrato (carboneto de silício). O material a depositar pode provir de um alvo da mesma liga ou, alternativamente, podem usar-se vários alvos, cada um correspondendo a um dos elementos de liga do depósito a produzir, calculando-se a proporção entre os vários materiais de modo a resultar na composição desejada. Contudo, a deposição por PVD leva à produção de uma solução sólida metaestável (Figs. 11 e 12), pelo que será necessário um tratamento térmico posterior que simule o tratamento térmico usado nas ligas convencionais, de forma a obter as propriedades e estruturas características dos materiais a monitorizar. A construção de pseudo-ligas de alumínio por PVD tem vindo a ser utilizada para estudar o comportamento à corrosão das ligas de alumínio [14-15, 29-30], em particular das ligas 2024 T3 e 7075 T6, e respectiva influência das partículas intermetálicas (Al_2CuMg). As deposições por PVD serão realizadas na empresa *Tecnologia e Engenharia do Materiais* (TeandM) e serão construídos sensores de um filamento, semelhantes aos construídos a partir da chapa (Fig. 9), mas com as espessuras de 12 μm e 20 μm. A utilização destas espessuras permitirá analisar variações na resistência eléctrica do filamento. A interpretação desse sinal irá dar indicações sobre um possível início e progressão de corrosão na estrutura.

Em princípio, o sensor deveria produzir um sinal de aviso quando a estrutura da aeronave estivesse ainda em bom estado, mas no limiar da ocorrência de corrosão. Este objectivo é demasiado ambicioso, já que esse limiar é muito difícil de definir. Assim, opta-se por considerar que o sensor deverá dar um sinal positivo quando já exista corrosão na superfície da aeronave mas ainda a um nível que se considere desprezável e que seja reparável por simples remoção dos produtos de corrosão e aplicação de um revestimento anti-corrosivo (conversão química + primário) na

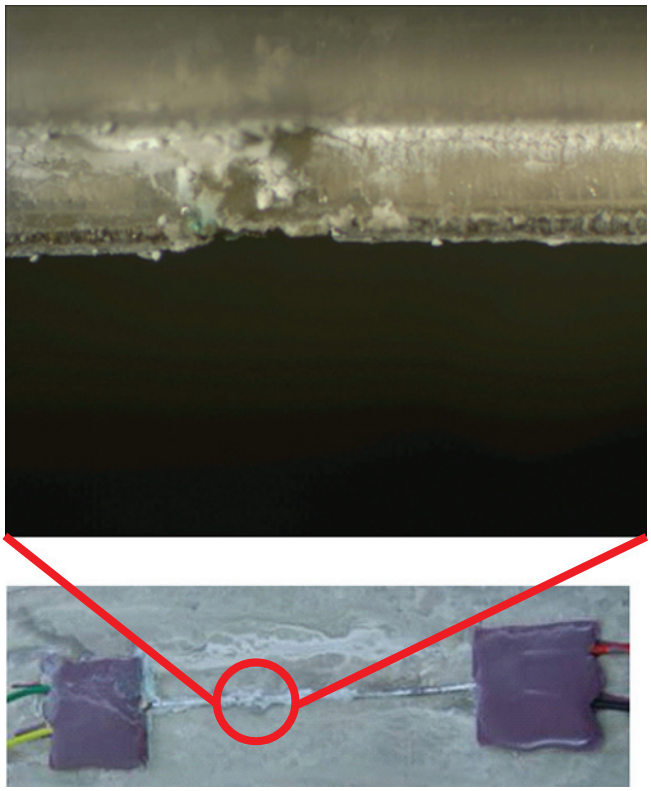


Fig. 10 - Ruptura de sensor metálico durante um ensaio de teste de corrosão acelerado.

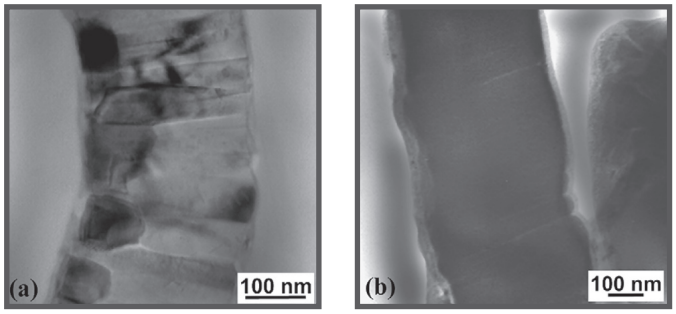


Fig. 11 - Micrografia TEM de pseudo-ligas [15]: a) Al-4 wt.%Cu e b) Al- 55 wt.% Cu-10 wt.% Mg.

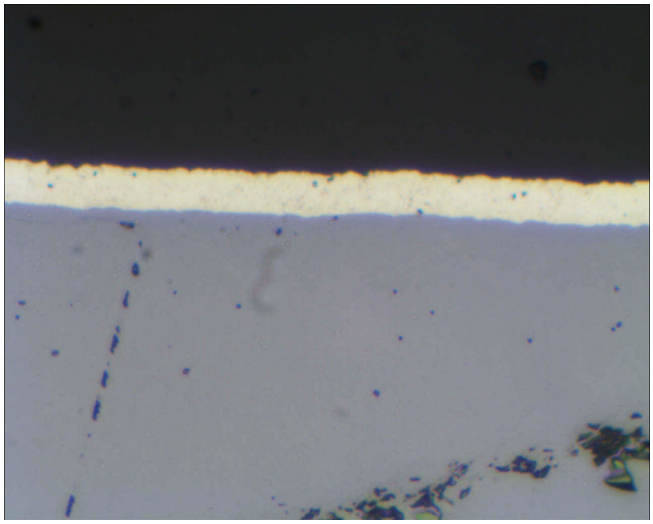


Fig. 12 - Micrografia (400x) de um filme de 12 μm da pseudo-liga de Al 2024 T3 depositada por PVD num substrato de carboneto de sílicio.

área, sem ser necessário proceder a uma reparação estrutural.

2.2.2 Sensores ópticos em juntas ("Lap joints")

Uma estrutura aeronáutica é normalmente fabricada a partir de ligas de alumínio de alta resistência unidas por elementos de ligação metálicos. Nas zonas de ligação das estruturas (*lap joints*) o alumínio é anodizado ou submetido a uma conversão química crómica, sendo depois aplicado um primário com cromatos. Os elementos de ligação e os furos são protegidos por uma massa vedante, também com cromatos, mas, no entanto, continuam a ser as zonas com mais problemas de corrosão das aeronaves [35-37]. O serviço da aeronave provoca nestas áreas danos no revestimento, devido à concentração de tensões em volta dos furos dos elementos de ligação, bem como devido aos ciclos térmicos e fadiga. A existência de fracturas no revestimento devido a estes factores vai contribuir significativamente para a evolução da corrosão nesta zona. Sabe-se que no interior destas áreas o inicio de corrosão está associado a uma mudança de pH ou, obviamente, à formação de iões de alumínio, que podem ser detectados por sensores específicos para cada material [10, 20-21, 38-40]. É nesta produção de iões Al^{3+} ou na alteração do pH local que se baseiam os sensores ópticos apresentados em seguida.

Os sensores foram fabricados removendo os revestimentos exteriores na extremidade da fibra óptica até se chegar ao núcleo (Fig. 2), depositando-se nessa área um polímero específico, que funciona como receptor para a detecção do ião Al^{3+} ou da alteração de pH (ião H^{+}). No caso da detecção do ião de alumínio utilizando a tecnologia de fluorescência, o polímero existente na ponta reagirá com o ião Al^{3+} e, quando excitado a um comprimento de onda predefinido, emitirá por florescência um sinal (Fig. 13) que será detectado por um espectrofotómetro a que a fibra óptica estará ligada [20-22]. O polímero em causa poderá ser optimizado para a aplicação pretendida [18-22] e pode ser depositado na ponta da fibra ou utilizando a mesma metodologia, em vários pontos ao longo da fibra, desde que o polímero depositado tenha um índice de refracção semelhante à bainha (*cladding*) existente na fibra, para receber a radiação evanescente.

Este tipo de sensor, com base numa técnica de detecção de produtos de corrosão, poderá ser facilmente utilizado numa aeronave, desde que se consiga miniaturizar os seus componentes, em particular o espectrofotómetro. Com os equipamentos comercialmente disponíveis, é possível construir um sistema com as dimensões pretendidas, fiável e robusto, para a utilização em aeronaves. Nas aeronaves C-130 e P-3 estão já definidas zonas (Fig. 14) em que poderá ser aplicada esta tecnologia. Trata-se de áreas sujeitas a elevados esforços estruturais, pelo que têm limites muito reduzidos para remoção de produtos de corrosão, ou seja, é recorrente aquando a inspecção dessas áreas a corrosão ter evoluído bastante, ultrapassando os limites admissíveis para realizar uma reparação, e obrigando à substituição das peças. Desta forma, a utilização de sensores nestas áreas é especialmente indicada, podendo permitir uma significativa redução dos custos de manutenção, já

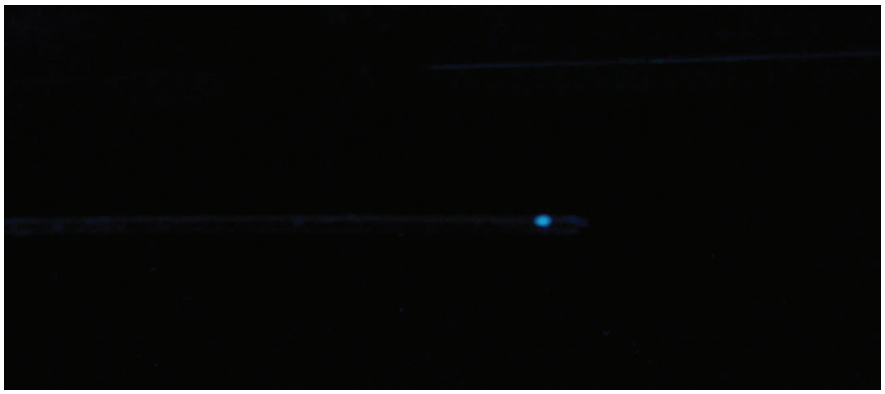
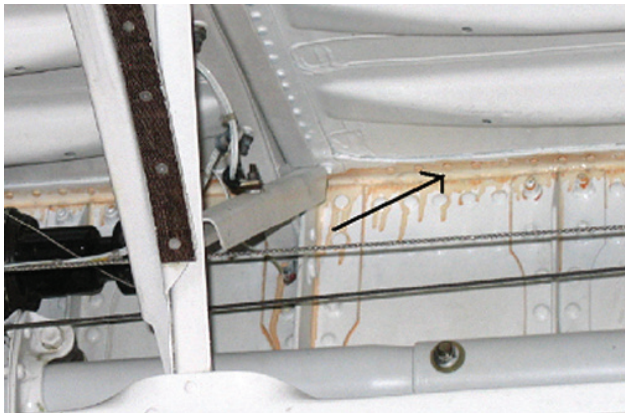


Fig. 13 - Fibra óptica com polímero depositado na presença de uma gota de solução com iões de alumínio sobre luz UV.



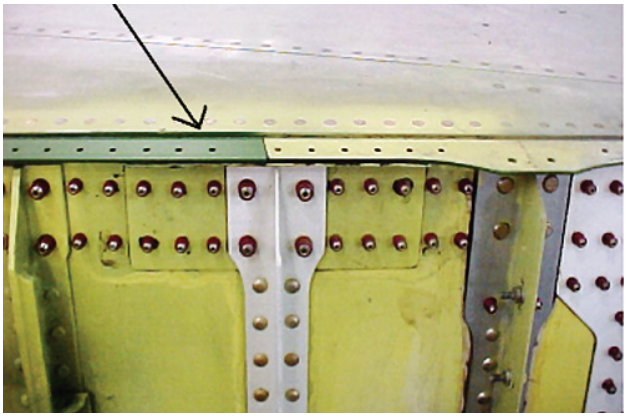


Fig. 14 - Pormenores da "Lap Joint" da "Rear Spar" com problemas de corrosão, onde serão colocados sensores ópticos para detecção de Al^{3+}.

que a detecção antecipada de corrosão permitirá efectuar reparações antes de ser atingido um limite crítico.

3. CONCLUSÃO

A possibilidade da monitorização e previsão da evolução da corrosão numa estrutura de uma aeronave é uma ferramenta que alterará os planos de manutenção preventiva actualmente em vigor para uma manutenção mais proactiva das aeronaves, ganhando o operador em segurança de voo e, principalmente, em redução de custos de manutenção.

O sistema de sensores de corrosão em desenvolvimento será constituído por diferentes tipos de sensores, consoante a zona da aeronave a monitorizar. Terá de ser simples, barato, com um sinal fácil de interpretar, deve poder ser espalhado por várias zonas da aeronave, e não um sensor "exótico", difícil de manufacturar, caro e com um sinal difícil de interpretar.

Juntamente com o desenvolvimento dos sensores será necessário estudar e testar modelos de previsão de corrosão, utilizando os dados obtidos pelos sensores nos modelos, conseguindo assim para cada aeronave um acompanhamento individual da corrosão na estrutura.

Finalmente terá de ser integrado em qualquer um dos sistemas de detecção de fractura (fadiga) que estão já a ser comercializados.

Referências

[1] D. T. Peeler *in Proceedings of 6th Joint FAA/DOD/NASA Aging Aircraft Conference*, September, San Francisco, USA (2002).

[2] K. van der Walde and B. M. Hillberry, *Int. J. Fatigue*, 29, 1269 (2007).

[3] M. Liao, G. Renaud and N. C. Bellinger, *Int. J. Fatigue*, 29, 677 (2007).

[4] K. van der Walde and B. M. Hillberry, *Int. J. Fatigue*, 30, 106 (2008).

[5] F. Ansuini *in Proceedings of CORROSION 1991*, March, NACE, Cincinatti, USA (1991).

[6] M. Benounis and N. Jaffrezic-Renault, *Sensor Actuat. B - Chem.*,100, 1 (2004).

[7] M. C. Hebbron, S. J. Harris, C. Neill, S. Wagstaff and D. G. Dixon *in Proceedings of EUROCORR 2005*, Setembro, Lisboa, Portugal (2005).

[8] S. Dong, Yanbiao Liao and Qian Tian, *Corros. Sci.*, 48, 1746 (2006).

[9] S. Abderrahmane, A. Himour, R. Kherrat, E. Chailleux, N. Jaffrezic-Renault and G. Stremsdoefer, *Sensor Actuat. B - Chem.*, 75, 1 (2001).

[10] M. P. Sibi and Z. Zong, *Prog. Org. Coat.*, 47, 8 (2003).

[11] K. K. Sankaran, R. Perez and K. V. Jata, *Mat. Sci. Eng. A - Struct.*, 297, 223 (2001).

[12] T. S. Huang, G. S. Franke, B. Farahbakhsh and D. Peeler *in Proceedings of the 6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, September, San Francisco, USA (2002).

[13] S. T. Pride and J. R. Scully, *J. Electrochem. Soc.*, 141, 3028 (1994).

[14] C. Blanc, B. Lavelle and G. Mankowski, *Corros. Sci.*, 39, 495 (1997).

[15] C. Blanc, A. Freulon, M. Lafond, Y. Kihn and G. Mankowski, *Corros. Sci.*, 48, 3838 (2006).

[16] A. R. Trueman, *Corros. Sci.*, 47, 2240 (2005).

[17] D. D. Macdonald and G. R. Engelhardt *in Proceedings of the 6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, September, San Francisco, USA (2002).

[18] G. McAdam, P. J. Newman, I. McKenzie, C. Davis and B. R. W. Hinton, *Structural Health Monitoring*, 4, 47 (2005).

[19] C. J. Stephenson and K. D. Shinizu, *Polym. Int.*, 56, 482 (2007).

[20] Y. Chen, J. J. Brazier, M. Yan, P. R. Bargo and S. A. Prahl, *Sensor Actuat. B - Chem.*, 102, 107 (2004).

[21] Sing Muk Ng and R. Narayanaswamy, *Anal. Bioanal. Chem.*, 386, 1235 (2006).

[22] M. Ahmad and R. Narayanaswamy, *Sens. Actuators*, B 81, 259 (2002).

[23] R. Kinzie *in Proceedings of the 6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, September, San Francisco, USA (2002).

[24] W. H. Abbot and R. Kinzie *in Proceedings of the 9th Joint Aging Aircraft Conference*, March, Atlanta, USA (2006).

[25] W. H. Abbot, M. Staham and R. Kinzie, *Overview of USAF Corrosion Sensor Program.*

[26] M. M. Altynova, R. G. Kelly, J. R. Scully and D. T. Peeler *in Proceedings of the 6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*, September, San Francisco, USA (2002).

[27] S. K. Chawla, T. Anguish and J. H. Payer, *in Proceedings of CORROSION 1991*, NACE, March, Cincinatti, USA (1991).

[28] T. Mickens, M. Schulz, M. Sundaresan, A. Ghoshal, A. S. Naser and R. Reichmeider, *Mech. Syst. Signal Pr.*, 17, 285 (2003).

[29] Y. Liu, P. Skeldon, G. E. Thompson, H. Habazaki and K. Shimizu, *Corros. Sci.*, 47, 341 (2005).

[30] Y. Liu, A. M. Arenas, S. G. Garcia-Vergara, P. Skeldon, G. E. Thompson, K. Shimizu and H. Habazaki, *Corros. Sci.*, 47, 145 (2005).

[31] F. H. Scholes, S. A. Furman, A. E. Hughes, T. Nikpour, N. Wright, P. R. Curtis, C. M. Macrae, S. Intem and A. J. Hill, *Prog. Org. Coat.*, 56, 23 (2006).

[32] S. A. Furman, F. H. Scholes, A. E. Hughes and D. Lau, *Prog. Org. Coat.*, 56, 33 (2006).

[33] F. H. Scholes, S. A. Furman, A. E. Hughes and T. A. Markley, *Corros. Sci.*, 48, 1812 (2006).

[34] S. A. Furman, F. H. Scholes, A. E. Hughes, D. N. Jamieson, C. M. Macrae and A. M. Glenn, *Corros. Sci.*, 48, 1827 (2006).

[35] J. A. González, E. Otero, A. Bautista, E. Almeida and M. Morcillo, *Prog. Org. Coat.*, 33, 61 (1998).

[36] N. C. Bellinger, J. P. Komorowski and T. J. Benak, *Int. J. Fatigue*, 23, S349 (2001).

[37] M. A. Wahab, J. H. Park, M. S. Alam and S. S. Pang, *J. Mater. Process Tech.*, 17, 211 (2006).

[38] M. Ghandehari and C. S. Vimer, *NDT and E Int.*, 37, 611 (2004).

[39] J. Rayss and G. Sudolski, *Sensor Actuat. B - Chem.*, 87, 397 (2002).

[40] F. J. Arregui, Z. Ciaurriz, M. Oneca and I. R. Matias, *Sensor Actuat. B - Chem.*, 96, 165 (2003).