

COMPORTAMENTO EM FADIGA DO AÇO ABNT 4340 COM DEPOSIÇÃO DE CÁDMIO

1

Mauro Pedro Peres¹

Herman Jacobus Cornélis Voorwald²

José Elias Tomazini³

Jorge Luiz Rosa⁴

Resumo

Na indústria aeronáutica é muito comum na montagem de peças, ter-se em contato peças de aço e de alumínio. Este tipo de montagem faz com que ocorra um problema muito sério que é o da corrosão galvânica, que surge quando há o contato de dois metais com potenciais elétricos diferentes. Neste caso o alumínio será o anodo de sacrifício para o aço, ocorrendo assim uma violenta corrosão para o alumínio, acarretando em grandes prejuízos para os componentes aeronáuticos e comprometendo toda a aeronave.

Uma solução encontrada para o problema, foi a introdução de uma pequena camada (da ordem de microns) de cádmio entre as peças de aço e de alumínio, que serão montadas juntas. Com a colocação da camada de cádmio entre as duas peças, o processo de corrosão galvânica é praticamente interrompido, pois o cádmio e as ligas de alumínio da série 7000 de uso aeronáutico tem potenciais elétricos muito próximos. Desta forma a quase totalidade das peças de aço na indústria aeronáutica são cadmiadas.

Este trabalho tem por objetivo, mostrar a influência do cádmio na resistência à fadiga do aço ABNT 4340, onde para estudar o seu comportamento em fadiga foram realizados ensaios de flexão rotativa em corpos de prova do material base sem recobrimento e com recobrimento de cádmio eletrodepositado com e sem tratamento térmico de desidrogenação à 190°C por 3 horas. Para tanto, foram traçadas as curvas SxN (diagrama de Wöhler), também foram feitas análises das superfícies fraturadas em microscópio eletrônico de varredura, no qual havia uma microssonda acoplada para verificar se houve a difusão de cádmio para o material base.

Palavras-Chave: FADIGA, FRAGILIZAÇÃO, ELETRODEPOSIÇÃO

CONEM 2004 - III CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA

10 a 13 de Agosto de 2004 - Belém - PA

^{1,3} Professor Assistente Doutor / UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

² Professor Titular / UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

⁴ Mestrando / UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

INTRODUÇÃO

O alumínio devido à abundância do seu principal minério a bauxita e de suas propriedades, é o metal mais importante após o ferro. A aplicação do alumínio e suas ligas são praticamente ilimitadas, pode-se dizer que não há setor industrial que não os empregue.

A grande utilização do alumínio na indústria aeronáutica, se dá por uma série de razões, sendo as mais importantes a resistência à corrosão e o baixo peso que ele oferece. [1,2]

Na indústria aeronáutica é muito comum, na montagem de peças, ter-se em contato peças de aço e de alumínio. Esse tipo de montagem pode provocar um problema muito sério que é o da **corrosão galvânica**, que surge quando há o contato de dois metais com potenciais elétricos diferentes. Neste caso, o alumínio será o anodo de sacrifício para o aço, ocorrendo assim uma violenta corrosão do alumínio, acarretando em grandes prejuízos para os componentes aeronáuticos e comprometendo toda a aeronave. [3, 4]

Uma solução encontrada para o referido problema foi à introdução de uma pequena camada (da ordem de microns) de cádmio entre as peças de aço e de alumínio que serão montadas juntas. Com a colocação da camada de cádmio entre as duas peças, o processo de corrosão galvânica é praticamente interrompido, pois o cádmio e as ligas de alumínio da série 7000 de uso aeronáutico tem potenciais elétricos muito próximos. Desta forma, a quase totalidade das peças de aço na indústria aeronáutica são cadmiadas. Isto se faz devido ao fato de que o cádmio funciona como um anodo de sacrifício, aumentando, desta maneira, a "proteção corrosiva do aço".

Esquematicamente, uma montagem aeronáutica correta de peças, para que não haja problema de corrosão galvânica, deve ser da forma mostrada na Figura 1. [5]

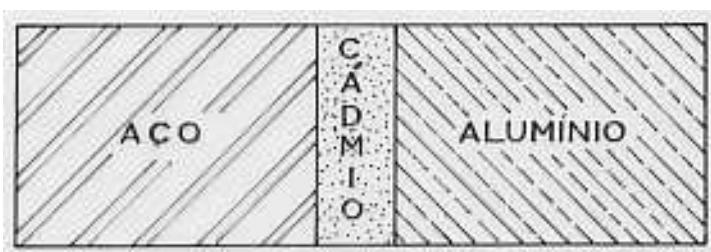


Figura 1 - Esquema de montagem aeronáutica de peças.

Com a cadmiagem das peças, resolveu-se o problema da corrosão mais, por outro lado, pode-se estar criando um novo problema, que é o da **difusão do cádmio no aço em altas temperaturas**.

Apesar dos componentes aeronáuticos geralmente serem projetados para trabalharem na faixa de temperaturas de 54°C a 135°C, há casos nos aviões em que algumas peças trabalham em altas temperaturas, como por exemplo, peças próximas de motores e no caso de decolagem abortada ou pouso de emergência, ou até mesmo em frenagem normais.

Normalmente, estes efeitos são mais nocivos quanto maior for a resistência do material. No caso em questão, o material estudado é o aço ABNT 4340 de uso

aeronáutico por ter uma alta resistência mecânica, daí seu emprego no trem de pouso do avião.

Como no processo de cadmiagem há a introdução de hidrogênio na peça, é necessário fazer um tratamento de desidrogenação para retirá-lo. Este tratamento é feito em estufas que trabalham com temperaturas controladas de até $300^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é verificar a possível **difusão do cádmio** no material e se a mesma causa modificações na **resistência à fadiga** do aço ABNT 4340, quando exposto a temperaturas elevadas. Componentes aeronáuticos geralmente estão submetidos a cargas dinâmicas alternadas (fadiga). Daí a grande importância do conhecimento da vida em fadiga do aço em estudo.

Desta forma a fadiga será abordada como o principal objetivo do trabalho, sendo a causa principal da falha do material. Para estudar o comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 foi feito um estudo bastante amplo e criterioso, onde foram realizados ensaios de flexão rotativa em corpos de prova do material base e do material base com cádmio eletrodepositado sem tratamento e com tratamento térmico de desidrogenação à 190°C por três horas. Após obtida a resistência à fadiga (número de ciclos) para cada amostra, nas três condições, foram traçadas as curvas SxN (Diagrama de Wöhler) para a caracterização da vida em fadiga do material. Foi realizado também o ensaio de fragilização, para verificar a ocorrência da fragilização por hidrogênio. Utilizando-se de um microscópio eletrônico de varredura, foi verificada a ocorrência de alterações nos mecanismos de fratura, quando comparadas com as fraturas do material base, e do material base com cádmio, com e sem o tratamento de desidrogenação, e também com a utilização de uma microssonda foi possível fazer uma verificação qualitativa de cada elemento na região superficial da fratura. Através desta verificação, foi possível saber se houve ou não a difusão do cádmio no material base.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Material

O material objeto deste estudo é o aço ABNT 4340, de uso aeronáutico, que é um aço de baixa liga com elevadas propriedades mecânicas e boas características em fadiga.

Foi realizada a análise química pela ELEBE, comprovando que o material encontra-se dentro das especificações desejadas.

Confecção dos Corpos de Prova

A partir do material como recebido foram confeccionados todos os corpos de prova, sendo estes: corpos de prova para o ensaio de impacto, ensaio de tração, ensaio de fragilização e para o ensaio de fadiga por flexão rotativa. A confecção de todos os corpos de prova se deu de acordo com as normas existentes para a fabricação dos mesmos e seguindo os mais rigorosos controles de fabricação aeronáutico de peças.

Corpos de Prova de Fadiga por Flexão Rotativa

Teve-se um cuidado bastante especial na confecção dos corpos de prova para os ensaios de fadiga por flexão rotativa, sendo estes preparados em duas

etapas: a primeira, realizada na UNESP/FEG, que consistiu em desbastar o material, pegando-o como fornecido com um diâmetro de 15,8 mm e deixando-o com 13 mm e no comprimento estabelecido pela norma. A segunda etapa foi realizada pela ELEBE em tornos CNC para garantir a repetibilidade dos corpos de prova. Todo o processo de confecção destes corpos de prova seguiram as dimensões que constam na Figura 2, e estão de acordo com as especificações do fabricante do equipamento. Esta segunda etapa só foi feita após a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, para que os corpos de prova adquirissem uma dureza da ordem de 38 a 42 HRc, pois, os mesmos se encontravam com a dureza do material como fornecido, que era 20 HRc, e também para prevenir de um possível empenamento dos corpos de prova.

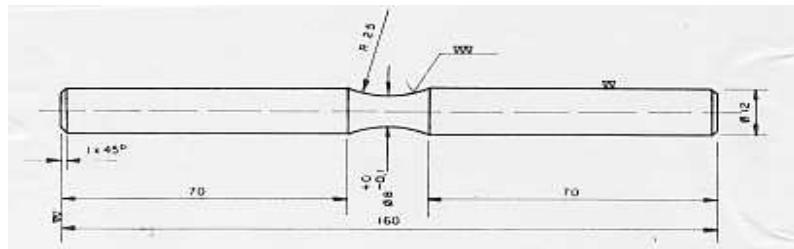


Figura 2 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de fadiga por flexão rotativa.

A etapa seguinte foi a realização de um tratamento térmico de alívio de tensões a 190°C por 4 horas, segundo a norma EMBRAER NE 40-044. Este tratamento é indicado para peças endurecidas por têmpera, de modo a reduzir tensões induzidas devido a operações de usinagem, e também preparar a peça antes da operação de eletrodeposição. Na seqüência fez-se uma inspeção dimensional e logo após uma inspeção por partículas magnéticas.

A penúltima etapa na preparação dos corpos de prova é o processo de eletrodeposição com o cádmio (cadmiagem).

Cádmio / Cadmiagem

Elemento químico metálico de cor branca prateada com pequenos reflexos azuis é maleável e mole [6]. O cádmio é utilizado em operações de recobrimento superficial, principalmente para proteger o ferro e o aço da corrosão.

O cádmio e seus vapores são altamente tóxicos, daí seu uso ser muito restrito e nunca podendo estar em contato com alimentos.

É um processo de eletrodeposição que consiste na deposição de uma camada de cádmio sobre a superfície dos corpos de prova, cujo objetivo é a proteção contra corrosão.

No processo de cadmiagem os banhos são de composições simples, contendo um sal de cádmio em forma de complexo duplo de cianeto de sódio e cádmio e cianeto de sódio e hidróxido de sódio. Os anodos de cádmio são encontrados em forma de bolas com pureza de 99,9% [7].

A última etapa na fabricação dos corpos de prova é o tratamento de desidrogenação. O tratamento de desidrogenação foi realizado a uma temperatura de $190 \pm 5^\circ\text{C}$ por um tempo de 3 horas.

Ensaios Mecânicos

Os ensaios de tração, impacto e dureza, foram realizados na ELEBE, para caracterizar as propriedades mecânicas do material e pelos valores médios

encontrados verifica-se que as propriedades mecânicas obtidas após o tratamento térmico de têmpera e revenimento estão de acordo com as condições de projeto.

Ensaio para Verificação da Fragilização por Hidrogênio

Este ensaio foi realizado na ELEBE conforme procedimento EMBRAER PE - 5.06-002 e norma ASTM - F - 519 [8]. Após o tempo de 200 horas de exposição à carga, nenhum dos corpos de prova apresentou ruptura, o que garante que os corpos de prova não foram fragilizados.

Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa

Este ensaio foi realizado na UNESP/FEG e o equipamento utilizado foi o equipamento de flexão rotativa modelo UBM 520/86/9 da VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig. A rotação de ensaio foi de 3.000 rpm, estando de acordo com os parâmetros recomendados pelo fabricante.

O equipamento para realização dos ensaios de fadiga é dotado de 4 cabeçotes. Adotou-se, que seria mantido sempre o mesmo cabeçote para um mesmo valor de carga, para as três diferentes condições a que foram submetidas as amostras.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ensaios de Fadiga

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa estão apresentados na Tabela 1.

Tensão Aplicada		Número de Ciclos para Fratura [$\times 10^2$]			Número de Ciclos para Fratura (valor médio) [$\times 10^2$]		
% σ_e	[MPa]	Material Base	Material Base c/ Cádmio	Material Base c/ Cádmio Desidrogenado	Material Base	Material Base c/ Cádmio	Material Base c/ Cádmio Desidrogenado
90	1006	58	47	54	61	58	56
	1006	69	58	58			
	1006	85	42	53			
	1006	59	78	59			
	1006	32	66	56			
75	838	357	206	321	377	282	248
	838	249	410	283			
	838	206	391	223			
	838	461	225	146			
	838	456	309	283			
	838	708	186	236			
	838	204	248	247			
60	671	3126	1621	1933	4885	1234	2317
	671	6039	1009	1317			
	671	1456	1107	3487			
	671	927	1231	2882			
	671	7226	1186	2405			
	671	10537	1247	1876			
58,5	654	9048	6054	7084	9260	5269	6705
	654	10182	5328	5675			
	654	8754	4672	7227			
	654	9128	5021	6833			

Tabela 1 - Valores obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa.

Para a determinação do limite de resistência à fadiga do material, foram ensaiados cdp's com 45% e 50% da tensão limite de escoamento do material, verificando que as amostras atingiram 10^7 ciclos sem que ocorresse a fratura, após o que foram retiradas da máquina. Deste modo, pode-se concluir que o limite de resistência à fadiga do material encontra-se a um nível de tensão entre $50\% \sigma_e < \sigma_{máx} < 60\% \sigma_e$. Assim, limitou-se o campo de trabalho para o intervalo compreendido entre 90% e 58,5% da tensão limite de escoamento do material. Não se fará aqui uma análise detalhada e pormenorizada dos resultados, no entanto, da análise da Tabela 1, observa-se uma clara tendência sobre o efeito da eletrodeposição de cádmio com posterior tratamento de desidrogenação, na resistência à fadiga por flexão rotativa no aço estudado.

É importante também salientar que as superfícies de fratura foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura e através de uma microssonda acoplada ao microscópio, fez-se a identificação qualitativa dos elementos presentes nas amostras.

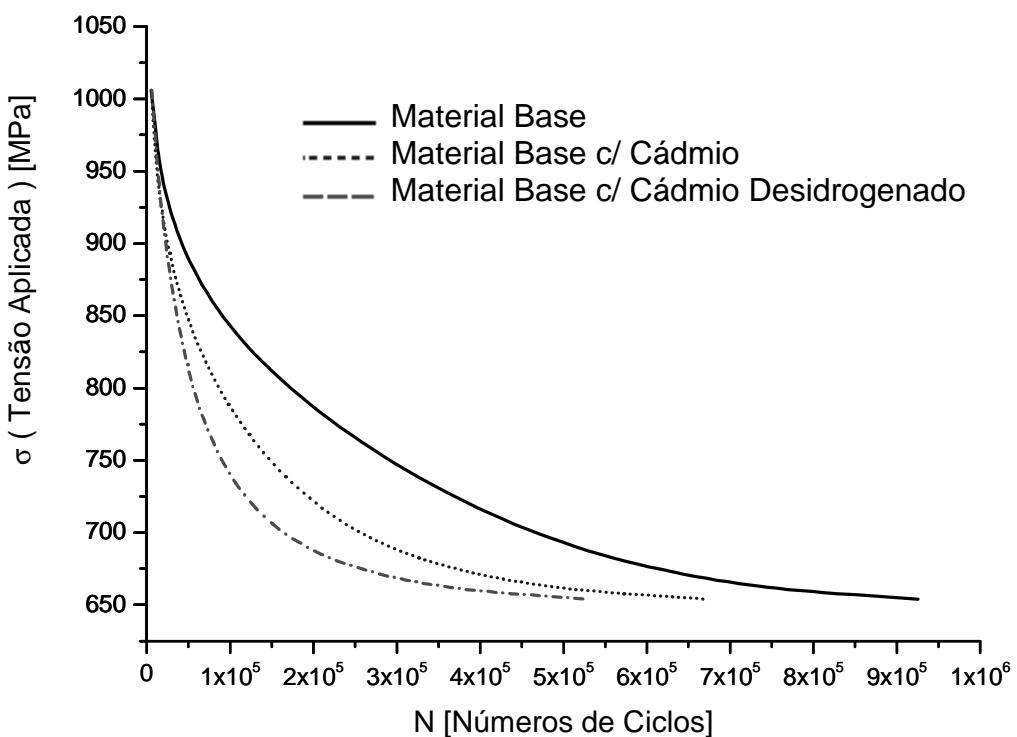


Figura 3 - Curvas σ - N para o material base, material base com cádmio e material base com cádmio sem desidrogenar.

Análise de Fratura e Microssonda

Foi realizada uma série de fotografias da superfície de fratura, utilizando microscopia eletrônica de varredura com o objetivo de analisar os seguintes aspectos:

1. o sucesso no processo de eletrodeposição de cádmio utilizado pela ELEBE e a homogeneidade da camada eletrodepositada;
2. espessura da camada de cádmio eletrodepositada;
3. gradiente de concentração de cádmio ao longo da secção transversal da amostra;
4. aspecto das superfícies de fraturas nas três condições estudadas; e

5. pontos prováveis de nucleação das trincas por fadiga.

A Figura 4a representa a superfície de fratura do material base para uma tensão máxima de 60% da tensão do limite de escoamento. Pode ser observado um aspecto característico de fratura por flexão rotativa para amostras solicitadas a níveis de tensão próximo do limite de fadiga. Não há, aparentemente, qualquer efeito que possa ter influenciado na resistência em fadiga deste corpo de prova.

Para as condições de tratamento de cadmiagem sem e com posterior tratamento de desidrogenação, as Figuras 4b e 4c, indicam, a superfície de fratura e a região de provável início da trinca para uma tensão máxima igual a 60% da tensão de escoamento do material. Uma comparação destas com a do material base indica grande similaridade no aspecto da superfície de fratura.

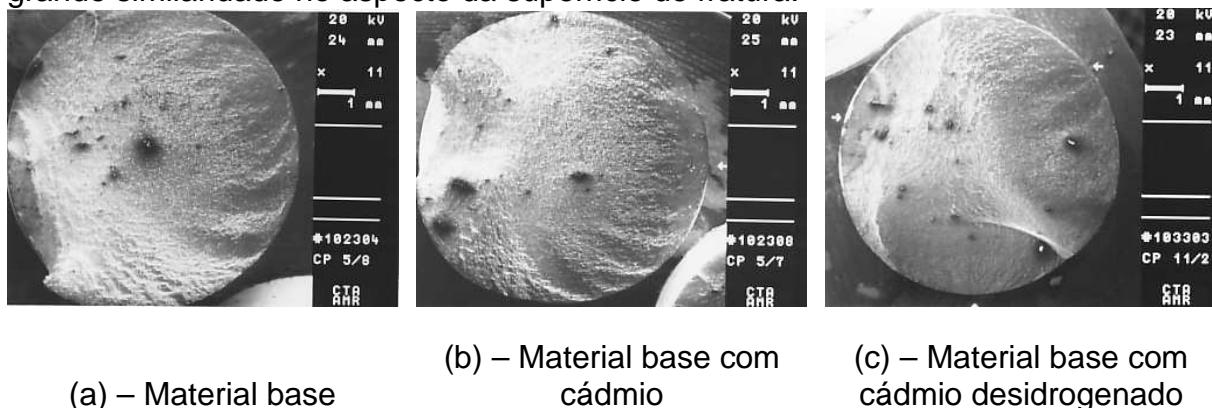


Figura 4 – Fotografia da superfície fraturada, ensaiada com $\sigma = 60\%$ do σ_e

Relativamente a fragilização do material e face ao resultado do processo de cadmiagem, os ensaios realizados indicam que, após os tratamentos de desidrogenação a 190°C a mesma não ocorre. Deste modo, qualquer alteração no comportamento em fadiga das amostras estará relacionado ao processo de cadmiagem e ao posterior tratamento de desidrogenação, e não mais à fragilização por hidrogênio, resultante do processo de eletrodeposição.

A garantia do sucesso na deposição do cádmio foi uma grande preocupação no procedimento experimental do trabalho e, deste modo, tornou-se a prioridade em termos do perfeito desenrolar de cada uma das etapas do processo. A confirmação de que a espessura da camada de cádmio encontra-se dentro do especificado pode ser observado na Figura 5, que mostra uma espessura de 8,23 μm . A Figura 6 indica o gradiente da eletrodeposição de cádmio ao longo da secção transversal da amostra para o tratamento de desidrogenação de 190°C por 3 horas.



Figura 5 – Fotografia da espessura da camada de cádmio

Através da microssonda acoplada ao microscópio eletrônico de varredura foi possível observar que, para a região R₁ o pico de cádmio é bastante acentuado, enquanto que na região R₂ a sua presença não é mais identificada, e que na região 3, a 1,5 µm da superfície cadmiada, já não é mais detectada a presença do mesmo.

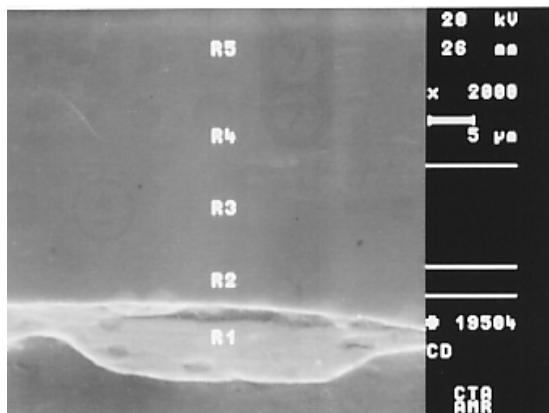


Figura 6 – Fotografia mostrando as regiões onde foram realizadas as identificações dos elementos químicos presentes na região da fratura.

CONCLUSÕES

1. A coerência obtida nos dados experimentais deve-se a qualidade aeronáutica utilizada em cada uma das etapas no processo de confecção das amostras.
2. Após os tratamentos térmicos realizados na ELEBE o material atingiu as propriedades mecânicas de projeto.
3. Nos ensaios de fragilização, realizados segundo a norma ASTM - F - 519, verificou-se que, após a desidrogenação na temperatura de 190°C por 3 horas, não ocorreu a fragilização por hidrogênio do material.
4. Observou-se que o tratamento de eletrodeposição de cádmio resultou em camadas com espessura de 8,23 µm., dentro dos padrões aeronáuticos exigidos.
5. No levantamento do elemento químico presente observou-se que o cádmio se encontra próximo à superfície de amostra (1 µm). Analisando-se ao longo da secção transversal, constatou-se a não presença deste elemento a partir de 1,5 µm da superfície.
6. As curvas σ-N indicaram que existe influência da desidrogenação na resistência à fadiga do aço ABNT 4340 que sofreu eletrodeposição de cádmio.
7. Com isso, conclui-se que a finalidade dos processos de cadmiagem é plenamente atendido, no que diz respeito à proteção galvânica induzida pelo mesmo. Os tratamentos de desidrogenação posteriores à eletrodeposição de cádmio são importantes e necessários. No entanto, da análise dos dados experimentais criteriosamente feita, indica que a influência na resistência à fadiga para as condições estudadas no presente trabalho, não comprometem a resistência à fadiga do material, ou seja, a preocupação quanto a fragilização por hidrogênio/cádmio e a sua influência na vida em fadiga do componente não deve ocorrer.
8. Relativo à análise da superfície de fratura foi verificado que, para os cdp's do material base, os valores de vida em fadiga obtidos foram coerentes com os níveis de solicitações empregados; isto é, não há qualquer efeito que possa ter fortemente influenciado a resistência à fadiga das amostras.
9. Conclusão semelhante pode ser feita com relação aos cdp's que foram desidrogenados. É interessante lembrar que, em algumas amostras, a rugosidade

superficial, apesar de controladas por padrões aeronáuticos exerce influência na nucleação de trincas por fadiga.

BIBLIOGRAFIA

1. PEEL, C. J., Aluminum alloys for airframes limitations and developments, Materials Science and Technology, p. 1169-1175, 1986.
2. SANDERS JR., T.H., STALEY, J. T., Review of fatigue and fracture research on high strength aluminum alloys, Aluminum Company of America (ALCOA), 1985.
3. NEVILL, B. T., An alternative to cadmium: vapor deposition of aluminium, plating and surface finishing, p. 14-19, january 1993.
4. MUEHLBERGER, D. E., REILLY, J. J., Improved equipment productivity increases application for vapor deposition of aluminium, p. 19-28, AAA Plating and Inspection, Inc., 1998.
5. PERES, M. P., Estudo do efeito do tempo e da temperatura de desidrogenação na resistência à fadiga do aço ABNT 4340 que sofreu eletrodeposição de cádmio, Tese de doutorado, UNESP/FEG, 1996.
6. PARMEGGIANI, L., Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, v. 1, 3 ed., International Labour Office, ilust., 1989.
7. EDE, EMBRAER Divisão de Equipamentos, Tratamento geral de superfícies, SLP/SP.
8. Norma ASTM - F - 519, padronização dos corpos de prova de fragilização.

Siglas e abreviaturas:

UNESP – Universidade Estadual Paulista
FEG – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
ELEB – EMBRAER/LIEBHERR EQUIPAMENTOS DO BRASIL SA

FATIGUE BEHAVIOUR OF STEEL ABNT 4340 WITH CADMIUM ELECTROPLATED

2

Mauro Pedro Peres¹

Herman Jacobus Cornélis Voorwald²

José Elias Tomazini³

Jorge Luiz Rosa⁴

Abstract

In the aeronautical industry contact between steel and aluminium in mechanical components, is very common. This kind of assemble may cause galvanic corrosion due to the interaction of two metals with different electric potential. In this case, aluminium will corrode, resulting in damage in the aeronautical component which compromise the aircraft safety.

The solution for this problem is the presence of cadmium interlayer (some microns) between steel and aluminium, which will avoid galvanic corrosion because aluminium alloys of series 7000 and cadmium have similar electric potential. Therefore steel pieces in the aeronautical industry are cadmium electroplated.

This research has the objective to show the influence of cadmium electroplating on the rotating bending fatigue strength of ABNT 4340 steel. Sample of base material, base material cadmium electroplated and base material cadmium electroplated heat treated at 190°C for 3 hours to avoid hydrogen embrittlement, were prepared to obtain SxN curves(Wöhler's diagram). Surface fracture analysis was performed by the use of SEM (Spectrum electronic microscopy) and the diffusion of cadmium in the substrate was also evaluated.

Key-Words: FATIGUE, EMBRITTLEMENT, ELECTROPLATING

CONEM 2004 - III NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING

august 10 - 13, 2004 - Belém - PA - Brazil

^{1,3} Professor Assistente Doutor / UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

² Professor Titular / UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

⁴ Mestrando / UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá