

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Análise de Falha de Arruelas Cônicas Utilizadas em Trilhos de Fixação de Bancos Automotivos

Moreto, J. A.^{1*}, Bose Filho, W. W.², Spinelli, D.³, Ruchert, C. O. F. T.⁴.

Abstract

The present work aimed to investigate the possible causes of failure occurred in conical washers during the mounting of screw and washers on the seat rails. The conical washers are made from SAE 1070 carbon steel and subjected to the following heat treatment: austempering treatment and acid zinc – coating process at room temperature. The work followed the usual methodology employed in failure analysis, including chemical and macrographic analyses, optical microscopy, hardness and microhardness analyses, scanning microscope electron and energy – dispersive X-ray spectroscopy. The fractographic and metallographic analyses showed the development of a blistering process, both superficial and sub-superficial occurred during the austempered zinc – coating washers. It was identified that the washers failed by hydrogen embrittlement process. The cause of failure was the lack or inadequacy of the baking treatment to eliminate hydrogen soon after the zinc – coating process.

Keywords: conical washers, hydrogen embrittlement, zinc – coating process.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo apontar as possíveis causas de falha ocorrida em arruelas cônicas, durante o processo de montagem do conjunto parafuso e arruela em trilhos de fixação de bancos em veículos automotivos. As arruelas cônicas são fabricadas em aço carbono SAE 1070 e submetidas aos tratamentos térmicos: tratamento de austêmpera e tratamento de zincagem ácida na temperatura ambiente. O trabalho seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas, incluindo análise química, análise macrográfica, microscopia ótica, análise de dureza e perfil de microdureza, microscopia eletrônica de varredura e EDX. As análises metalográficas e fractográficas evidenciaram um processo de empolamento (blistering), ambos superficial e sub-superficialmente nas arruelas austemperada e zincadas. Foi identificado que as arruelas falharam pelo mecanismo de fragilização por hidrogênio. A mais provável causa da falha foi a ausência ou insuficiência do tratamento de cozimento para eliminação do hidrogênio imediatamente após o processo de zincagem.

Palavras-chave: Arruelas cônicas, fragilização por hidrogênio, processo de zincagem.

Introdução

Este artigo trata de Análise de Falhas de tubos de arruelas cônicas utilizadas em trilhos de fixação de bancos automotivos. A metodologia de Análise do Tipo e Efeito de Falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), é uma metodologia que objetiva avaliar e minimizar riscos por meio da análise das possíveis falhas (determinação da

causa, efeito e risco de cada tipo de falha) e implantação de ações para aumentar a confiabilidade.

O principal objetivo da análise de falhas é evitar novas falhas. A investigação deve determinar as causas básicas da falha e essa informação deve ser utilizada para permitir a introdução de ações corretivas e/ou preventivas que impeçam a recorrência do problema.

Esta dimensão da qualidade, a confiabilidade, tem se tornado cada vez mais importante para os consumidores, pois, a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada pelo serviço de assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, causa, no mínimo, uma insatisfação ao consumidor ao privá-lo do uso do produto por determinado tempo. Além disso, cada vez mais são lançados produtos em que determinados tipos de falhas podem ter conseqüências drásticas para o consumidor. É importante salientar que em muitos dos casos, o custo de uma manutenção preventiva ou até mesmo preditiva é inferior ao custo de uma manutenção corretiva, portanto, em termos econômicos é de suma importância evitar a parada de equipamentos.

A função do componente ou do equipamento deve ser considerada na análise, uma vez que conceituamos falha como a ocasião em que o componente ou equipamento não é mais capaz de executar a sua função com segurança. Analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar porque ele não mais executa sua função com segurança.

Uma análise de falhas que não serve de subsídio para um conjunto de ações corretivas tem utilidade nula. Por outro lado, se não for possível determinar as causas físicas da falha não será possível introduzir melhorias no sistema.

Outro mecanismo muito importante é o trincamento induzido por hidrogênio "*hydrogen induced cracking*". A presença de hidrogênio no interior dos materiais pode alterar o seu comportamento modificando as suas propriedades mecânicas, podendo a liga sofrer fraturas frágeis inesperadas, dependendo de certas características do material, do meio e do teor de hidrogênio absorvido. O hidrogênio induz o surgimento de fraturas retardadas como conseqüência do aparecimento de numerosas trincas superficiais, que são nucleadas ao longo do processo de desgaseificação, ou seja, a saída do hidrogênio sob a forma gasosa do material.

Procedimentos Experimentais

- Análise macrográfica;
- Análise química;
- Análise metalográfica;
- Análise de dureza e perfil de microdureza;
- Análise fratográfica por MEV;
- Análise por energia dispersiva de raios-X (EDX).

Resultados e Discussões

Análise Macrográfica

A análise macrográfica de uma das arruelas danificada durante a operação de montagem do conjunto parafuso/arruela está mostrada na **Figura 1**. Nesta figura, observa-se a ocorrência

de várias trincas radiais que não apresentam ramificações significativas, isto é, comportam-se como se fosse uma trinca única. Este aspecto é típico do processo de trincamento assistido pelo hidrogênio.

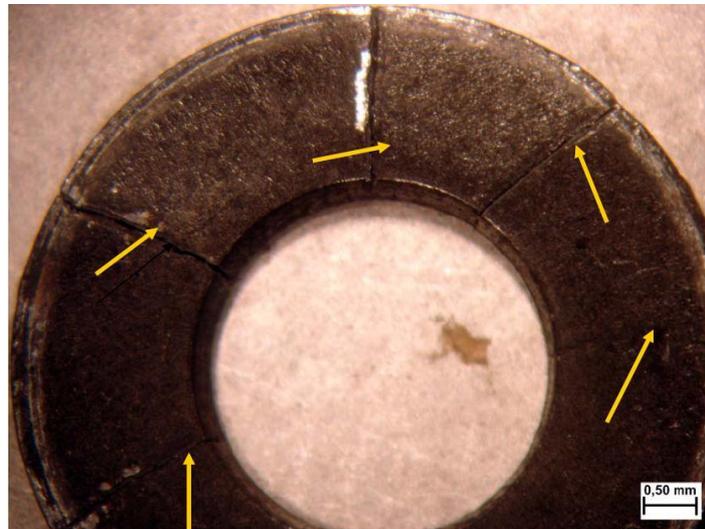


Figura 1 - Fotomicrografia mostrando várias trincas radiais formadas na face da arruela durante a operação de aperto do conjunto parafuso/arruela para a fixação do trilho para apoio e regulagem de bancos de automóveis automotivos. As trincas estão indicadas pelas setas.

Análise Micrográfica

Foram realizadas várias análises micrográficas em amostras obtidas de arruelas que sofreram os processos de tratamentos de (i) austêmpera e zincada e fraturada em serviço, (ii) somente austemperada e (iii) austemperada e zincada, sem, contudo, sofrer aplicação de esforço de torque de montagem. A finalidade destas análises foi a de detectar a existência de trincas nucleadas nas proximidades da superfície provocadas por estes tratamentos, que pudessem, a priori, elucidar o trincamento generalizado ocorrido nas arruelas durante a aplicação do torque de montagem. As fotomicrografias apresentadas a seguir mostram e discutem os achados micrográficos encontrados durante estas análises.

As fotomicrografias apresentadas nas **Figuras 2 e 3** mostram o aspecto microestrutural obtidos nas regiões das bordas da arruela na condição de somente austemperada, próximas ao furo e ao diâmetro externo. Nota-se a existência de uma microestrutura complexa constituída de bainita, martensita e austenita retida, com as bordas das regiões do furo e do diâmetro externo apresentando irregularidades próprias do processo de estampagem. Não foram observadas trincas nucleadas e nem defeitos em toda a extensão das regiões analisadas, nas arruelas enviadas nesta condição de tratamento. Este resultado descarta a possibilidade de ocorrência de nucleação de trincas superficiais nas arruelas, durante a operação de tratamento térmico de austêmpera.



Figura 2 - Fotomicrografia mostrando o aspecto microestrutural de uma região da arruela somente austemperada, próxima ao furo. Ataque Nital 2%.



Figura 3 - Fotomicrografia mostrando o aspecto microestrutural de uma região da arruela somente austemperada, próxima ao diâmetro externo. Ataque Nital 2%.

As fotomicrografias apresentadas nas **Figuras 4 a 5** mostram o aspecto microestrutural encontrado em regiões das bordas próximas ao furo de arruelas, nas seguintes condições de tratamentos: austemperada e zincada, e fraturada durante a montagem e somente na condição de austemperada e zincada. Observa-se a existência de uma microestrutura complexa constituída de bainita, martensita e austenita retida, com as bordas apresentando trincas e vazios próximos à superfície, muito provavelmente oriundas de danos introduzidos durante o processo de tratamento de zincagem ácida.

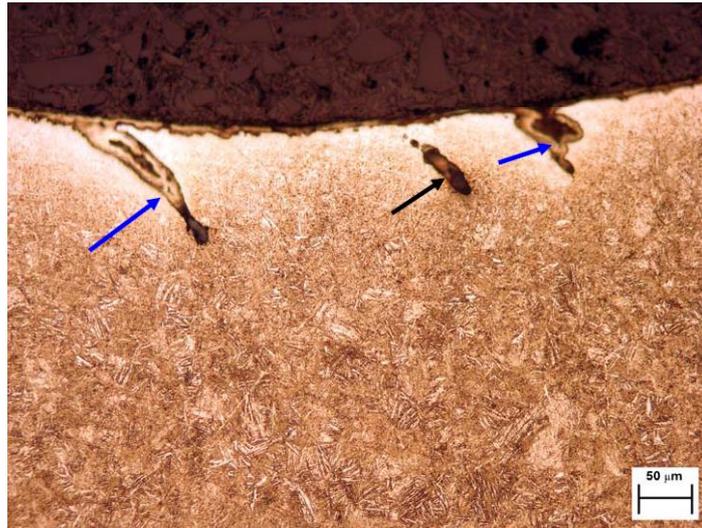


Figura 4 - Fotomicrografia obtida na borda lateral da arruela austemperada, zincada e fraturada durante a montagem. Observa-se a existência de trincas que foram nucleadas próximas à camada, com as suas paredes recobertas com Zn. As trincas estão indicadas por setas azuis e o vazio está indicado por uma seta preta. Ataque Nital 2%.

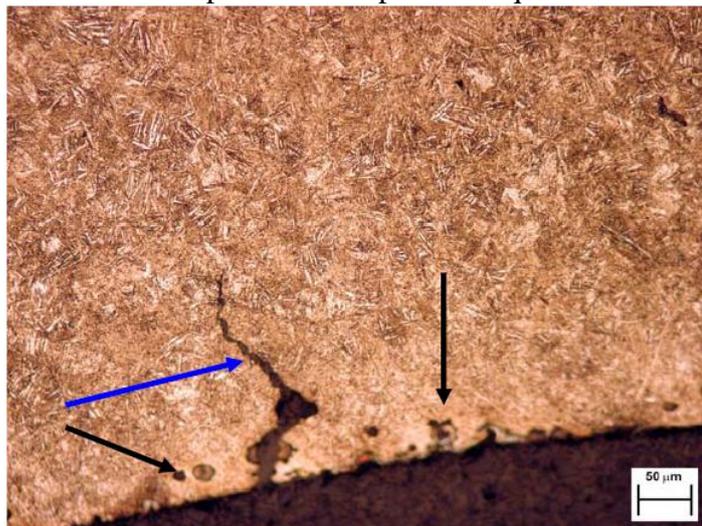


Figura 5 - Fotomicrografia obtida na borda do furo de uma arruela austemperada e zincada, fraturada durante a montagem, onde se pode claramente observar a existência de uma trinca que foi nucleada e propagada a partir de um defeito superficial semelhante a um vazio. A seta azul indica a trinca e as setas pretas indicam os vazios. Ataque Nital 2%.

A **Figura 6** apresenta a micrografia correspondente a **Figura 5** sem ataque metalográfico. Observa-se claramente a existência dos vazios localizados superficialmente e internamente, que foram produzidos pelo fenômeno conhecido como empolamento (blistering). A seta azul indica a trinca e as setas pretas indicam os empolamentos.

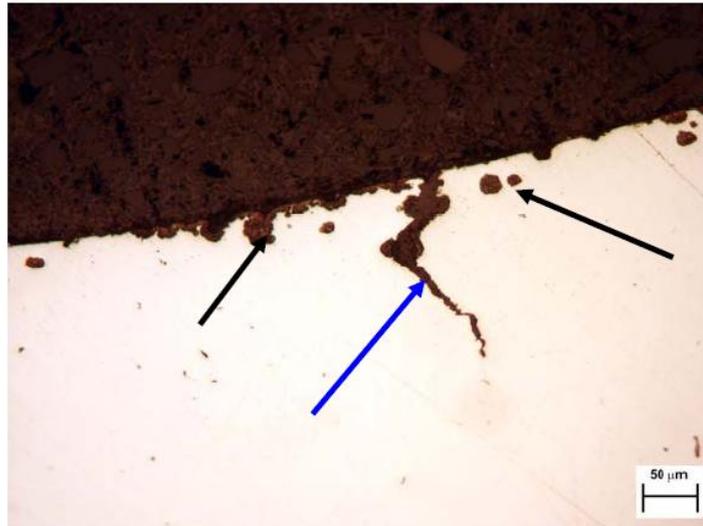


Figura 6 - Micrografia sem ataque metalográfico indicando o fenômeno de empolamento.

As fotomicrografias apresentadas pelos resultados da análise metalográfica mostram com grande evidência o efeito do hidrogênio induzindo a formação de trincas em empolamento, nas proximidades e interior da superfície, após tratamento de zincagem. Este fenômeno é causado pela difusão de hidrogênio no estado atômico para contornos de grãos, defeitos internos ou inclusões, onde se precipita na forma de uma molécula de hidrogênio diatômica (H_2). Este processo gera altas pressões que provocam o fenômeno conhecido por empolamento, que quando ocorre muito superficialmente ou mesmo internamente arranca o material, provocando o aparecimento de irregularidades na superfície e subsuperficial, que funciona como concentradores de tensão, que sob a ação de carregamento trativo iniciam a nucleação de trincas, que se propagam e provocam a fratura do componente.

Análise Química

Os resultados da composição química do material da arruela, bem como os especificados para o aço SAE 1070 estão apresentados na Tabela 1. Nota-se que valores dos elementos obtidos encontram-se dentro dos especificados para o aço SAE 1070. Entretanto, a análise química revelou na composição do aço uma porcentagem do elemento Cr, considerada elevada para um aço carbono, cujo efeito pode provocar o deslocamento do diagrama CCT do aço para a direita, ocasionando assim a necessidade da permanência de um tempo maior na temperatura de austêmpera, para a obtenção de uma microestrutura totalmente constituída do microconstituente bainita inferior. Os resultados da análise dos teores de hidrogênio realizada em várias arruelas declaradas como somente austemperadas forneceu um valor médio de 2,0 ppm. Por outro lado, a quantidade de H_2 detectada nas arruelas declaradas com austemperadas e zincadas, apresentou um valor médio de 17 ppm, valor este, significativamente superior aos encontrados para as arruelas somente austemperadas.

Tabela 1. Análise química (% em peso).

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Análise	0,69	0,19	0,65	0,012	0,006	0,026
Aço SAE 1070	0,65-0,75	0,20 máx	0,60-0,90	0,040 máx	0,050 máx	NE

NE - Não Especificado

Medidas de macro e microdureza

Os valores de macrodureza, em HV15, obtidas no centro das amostras de arruelas que foram austemperadas e austemperadas e zincadas são apresentados na Tabela 2. O valor médio da macrodureza para a arruela austemperada e zincada encontra-se ligeiramente acima do especificado.

Tabela 2 – Valores de macrodureza em HV 15 obtidas no centro das arruelas austemperadas e austemperadas e zincadas.

Arruela	Valor em HV15					Média	Especificado	Valor em HRC
	1	2	3	4	5			
Austemperada	441	455	436	450	450	446	430 - 470	(45)
Austemperada e zincada	481	467	482	487	504	484	NE	(50)

Os valores da microdureza Vickers determinada com a carga de 300gf foram obtidos perpendicularmente à superfície das arruelas nas seguintes condições de tratamento: somente austemperada e austemperada e zincada. As **Figuras 7 e 8** mostram as micrografias dos locais onde foram realizadas as medidas de microdureza Vickers.

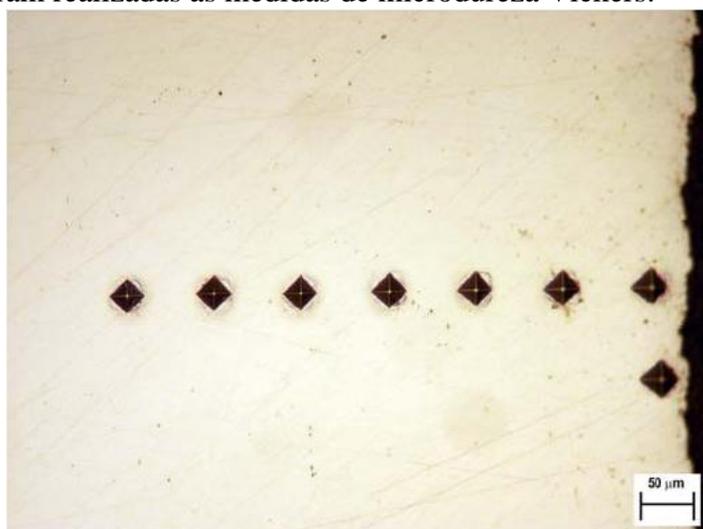
**Figura 7** - Micrografia da arruela austemperada mostrando o local das impressões de microdureza Vickers.



Figura 8 - Micrografia da arruela austemperada/zincada mostrando o local das impressões de microdureza Vickers.

O valor médio da microdureza em sete medidas realizadas próximas à superfície, como apresentada na **Figura 7**, para a arruela austemperada foi de 486 HV 300gf, valor este que segundo a norma ASTM E140, por conversão, fornece um valor de 48 HRC. No caso da arruela austemperada e zincada, o valor médio da microdureza, calculada em sete medidas feitas como mostrada na **Figura 8**, foi de 530 HV 300gf, o que corresponde aproximadamente a 51 HRC. Este aumento da microdureza para a arruela que sofreu o tratamento de zincagem, muito provavelmente ocorreu devido à carga de hidrogênio sofrida durante o tratamento.

3.5. Análise Fratográfica por Microscopia Eletrônica de Varredura

A **Figura 9** mostra uma micrografia da superfície de fratura obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), de uma trinca iniciada em uma arruela austemperada/zincada e fraturada durante a montagem. A superfície de fratura foi exposta, abrindo-se a trinca completamente no laboratório.

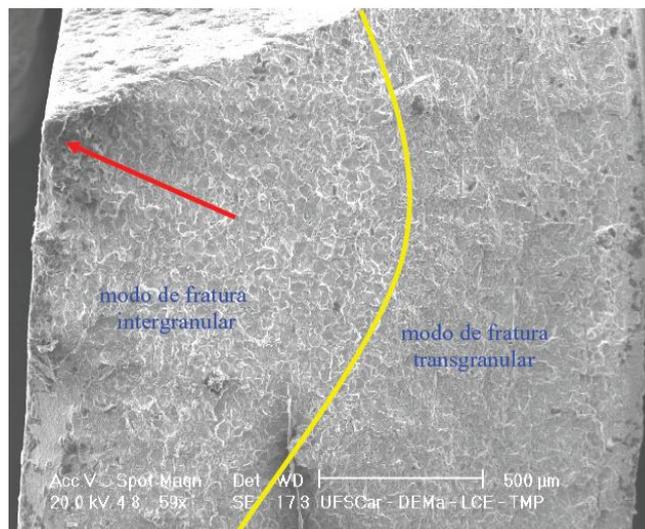


Figura 9 - Micrografia da superfície de fratura, obtida por MEV, de uma arruela fraturada mostrando a região da origem da fratura (seta vermelha), região de crescimento da trinca com modo de fratura intergranular e região de propagação rápida da trinca com modo de fratura transgranular.

As presenças dos modos de fratura intergranular na superfície e transgranular no núcleo, detectados durante o exame fratógráfico, são típicos da atuação do mecanismo de fratura por fragilização por hidrogênio, vide as **Figuras 10 e 11**.

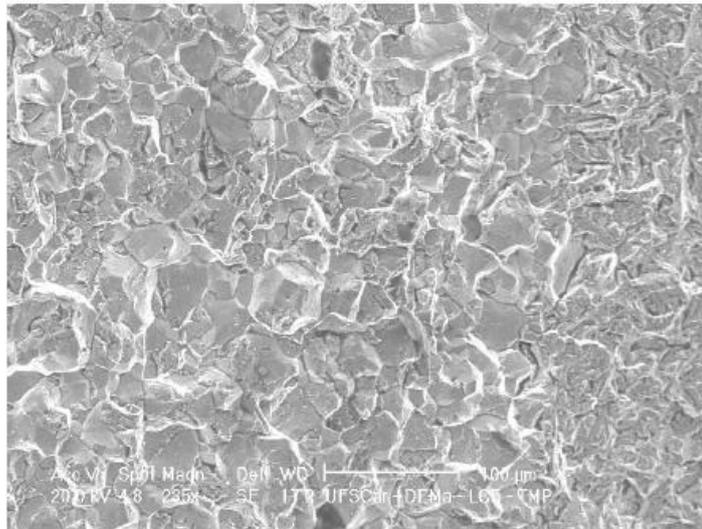


Figura 10 - Fratógrafia, obtida por MEV, da superfície de fratura nas proximidades do sítio de nucleação da trinca (próximo à superfície da arruela). Este modo de fratura, com o aspecto intergranular foi observado ao longo de toda a periferia das arruelas que receberam o recobrimento pelo processo de zincagem.

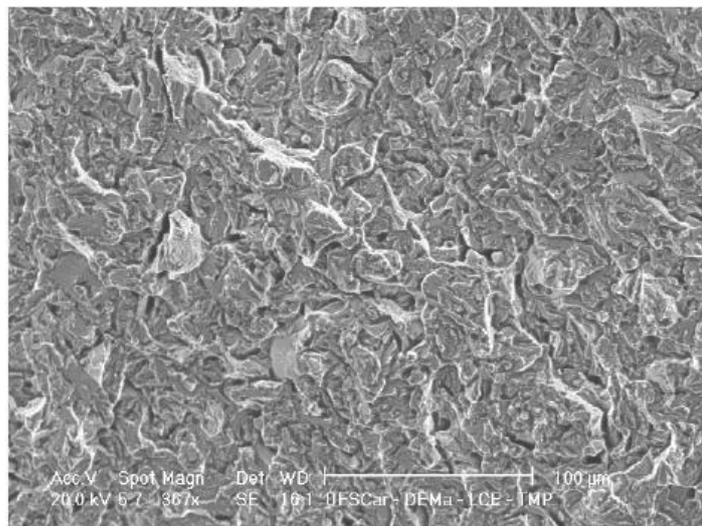


Figura 11 - Fratógrafia, obtida por MEV, da superfície de fratura, na região do núcleo, onde ocorreu a propagação rápida da trinca mostrando um modo de fratura transgranular com o aspecto de quase-clivagem (fratura frágil).

Análise por Energia Dispersiva de Raios-X (EDX)

A **Figura 12** mostra a micrografia obtida por MEV de uma região próxima da superfície de uma arruela austemperada e zincada que não sofreu carregamento. A análise por EDX foi realizada onde ocorreu o aparecimento de uma trinca junto a um vazio formado pelo fenômeno de empolamento (seta azul). O resultado da análise mostrou a existência de uma alta porcentagem do elemento Zn, comprovando mais uma vez que esta trinca foi originada durante o processo de zincagem ácida.

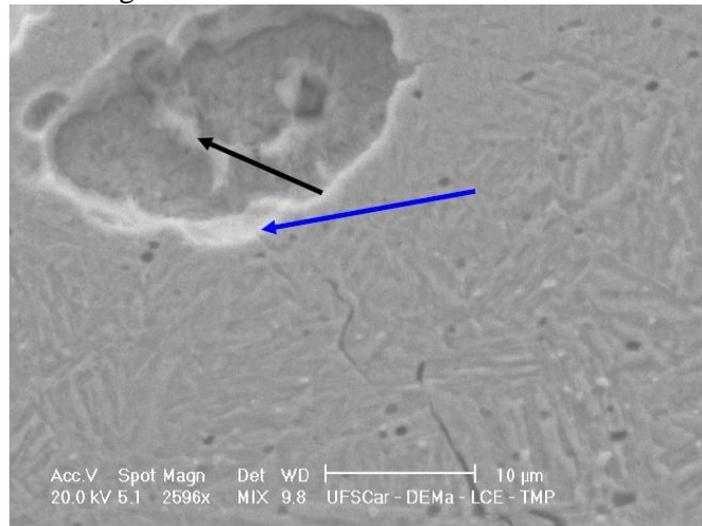


Figura 12 - Micrografia obtida por EDX, onde foi feita uma análise MEV/EDX para se determinar a composição química no interior da cavidade indicada pela seta preta. Pode-se ver uma trinca que nucleou no vazio provocado pelo processo de empolamento (seta azul).

A **Figura 13** apresenta o espectro de EDX obtido com feixe direcionado para o interior do vazio de empolamento Figura 12 (seta preta).

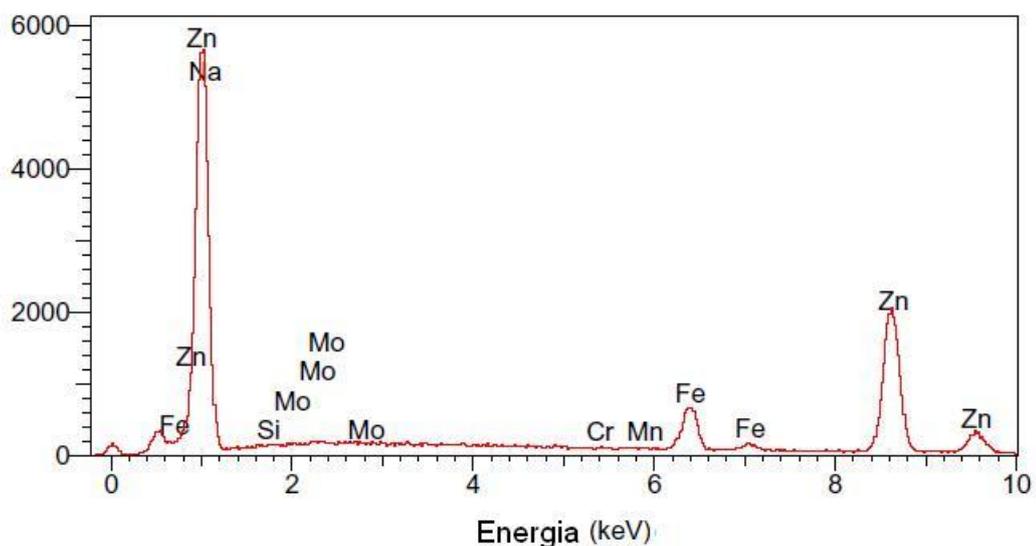


Figura 13 – Espectro de EDX realizado na região indicada pela seta preta da Figura 12.

Os resultados da análise mostrados na **Figura 13** demonstram a existência de uma alta porcentagem do elemento Zn no interior do vazio de empolamento, comprovando a alta carga de hidrogênio gerada no processo de zincagem. Esta ocorrência provoca a nucleação de trincas que se propagaram durante a operação de torque de aperto do conjunto parafuso/arruela.

Conclusões

- A ocorrência do processo de empolamento (blistering), superficial e sub-superficialmente nas arruelas austemperada e zincadas, evidenciado pelas análises metalográficas e fratógráficas, demonstra que o processo de recobrimento por zincagem ácida gerou uma alta carga de hidrogênio nascente na superfície das arruelas que falharam durante a montagem.
- Esta alta carga de H gerada durante o processo de zincagem, que ocasionou o fenômeno de empolamento e o elevado nível de dureza do componente, provocou a nucleação de trincas na superfície da peça que se propagaram durante a operação de fixação do conjunto parafuso/arruela.
- Nas arruelas fraturadas na montagem, as presenças dos modos de fratura intergranular na superfície e transgranular no núcleo, detectados durante o exame fratógráfico, são típicos da atuação do mecanismo de fratura por fragilização por hidrogênio;
- A determinação da existência de deposição de Zn nas paredes das trincas superficiais e no interior dos vazios de empolamento comprova que o tratamento de recobrimento por zincagem foi a causa principal da falha das arruelas pelo mecanismo de fragilização por hidrogênio.
- A conclusão final desta análise de falha é que as arruelas falharam pelo fenômeno conhecido universalmente de fragilização por hidrogênio. A mais provável causa da falha foi ausência ou a insuficiência do tratamento de cozimento para eliminação do hidrogênio imediatamente após o processo de zincagem.

Agradecimentos

Os autores expressam os seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC – USP pelo uso de seus equipamentos e instalações.

Referências bibliográficas

Advanced materials and processes, Vol 159, n12, dec 2001, pp.52.

ASM Metals Handbook. Fatigue and Fracture, vol.19, Pp 203-204, 1996.

BUGAEV, V. N.; GAVRILJUK, V. G.; PETROV, Y. U. N.; TARASENKO, A V.;
Mechanism of Hydrogen- Induced Phase Transformations in Metals and Alloys. Int. J.
Hydrogen Energy, Vol. 22, N° 2/3, p. 213-218, 1997.

PERNS, T. P.; ALTSTETTER, C. J.; Hydrogen Effects in Austenitic Stainless Steels.
Material Science and Engineering A, 129 p. 99-107, 1990.

* * *