

AVALIAÇÃO DAS FALHAS DAS MOLAS-PRATO DOS MANCAIS DE ESCORA DAS UG'S 1 A 6 DA UHE FURNAS SOB A ÓTICA DA MECÂNICA DA FRATURA LINEAR E ELÁSTICA ¹

Evandro Freire²

Resumo

Em meados de 1983, foram detectadas molas prato inferiores fraturadas no mancal de escora da unidade geradora 3, com causa atribuída à fadiga devido à nucleação de trinca ocasionada por agente externo corrosivo. Uma investigação realizada por Furnas, na época, mostrou que os fatores de segurança de projeto destes elementos poderiam ser considerados como pouco conservadores. Em dezembro de 2006 houve reincidência do problema, desta feita na UG#2, novamente atribuída a agentes agressivos, a partir dos quais pites de corrosão foram formados. No presente caso, diferentemente da abordagem anterior, se optou por dar uma tratativa conforme a Mecânica da Fratura Linear e Elástica, introduzindo os conceitos da tenacidade a fratura e de tamanho crítico de defeito. Assim, pretende-se neste trabalho determinar a menor espessura a que estes elementos podem ser mantidos em operação, ou seja, até quando estes elementos podem ser recuperados, através da retirada destes defeitos superficiais por usinagem e com redução de espessura, sem que a sua integridade estrutural seja afetada. Haverá também a rediscussão do mecanismo de falha para estas ocorrências, através dos resultados de uma análise fractográfica realizada no componente presentemente fraturado. Por último, o trabalho apresentará também uma abordagem de manutenção às molas para evitar a repetição do problema.

Palavras-chave: Mola-prato; Fratura; Manutenção.

EVALUATION OF FAILURES OF THRUST BEARINGS PLATE SPRINGS OF FURNAS HYDROMACHINES 1 TO 6'S ACCORDING TO LINEAR AND ELASTIC FRACTURE MECHANICS (LEFM)

Abstract

In the middle of 1983, some under plate springs were found fractured at the thrust bearing of the hydrogenerator 3 of Furnas Power Plant, with cause imputed to fatigue due to an external corrosive agent. At that time, Furnas engineering staff prepared a theoretical study to investigate the plate spring's design, it was demonstrated that the safety factors adopted in the design couldn't be considered too far conservative. In December 2006, there was the repetition problem, but at this time in the hydrogenerator 2. Again, the cause was attributed to an aggressive agent that formed a corrosion pitting on the plate spring's surface. In the present case, differently of the previous approach, it was preferred to give a treatment according to LEFM, using the fracture toughness material and allowable flaw size concepts. Thus, this paper intends to determine the thinnest plate spring thickness that is possible to keep on these machine elements in operation. In other words, till they can be recuperated by machining to remove these superficial defects, with thickness reduction, without affecting their structural integrity. Also, there will be a new discussion of the failure mechanism for these occurrences, based on the results of fractographic examination made at the above-mentioned element. At last, the paper will also present the used maintenance approach to avoid the repetition of this situation.

Key words: Plate-spring; Fracture; Maintenance.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Engenheiro Mecânico, graduado pela UERJ, turma de 1979*

1 ANTECEDENTES:

A Figura 1 é representativa da configuração do mancal de escora das unidades geradoras 1 a 6 da Usina de Furnas, nela se observa a disposição dos componentes e o posicionamento da mola prato inferior. Em meados de 1983, foram detectadas molas prato inferiores fraturadas no mancal de escora da unidade geradora 3, com causa atribuída à fadiga devido à nucleação de trinca ocasionada por agente externo corrosivo.⁽¹⁾ Na época Furnas realizou um estudo teórico⁽²⁾ para investigar o dimensionamento da mola prato, baseado em critérios clássicos da teoria da fadiga, ou seja sem defeitos superficiais, que mostrou que, a depender do valor das pulsações de pressão do empuxo hidráulico e do número de partidas e paradas da unidade geradora, os fatores de segurança de projeto poderiam ser considerados como pouco conservadores. No entanto, o longo tempo de serviço que estas molas têm estado operando mostra que as mesmas, de fato, foram dimensionadas para vida infinita. Desde aquela oportunidade até época atual, a abordagem de manutenção adotada por Furnas, grosso modo, tem consistido em mapear eventuais defeitos encontrados, tipicamente pites de corrosão, seguido de lixamento da superfície afetada.

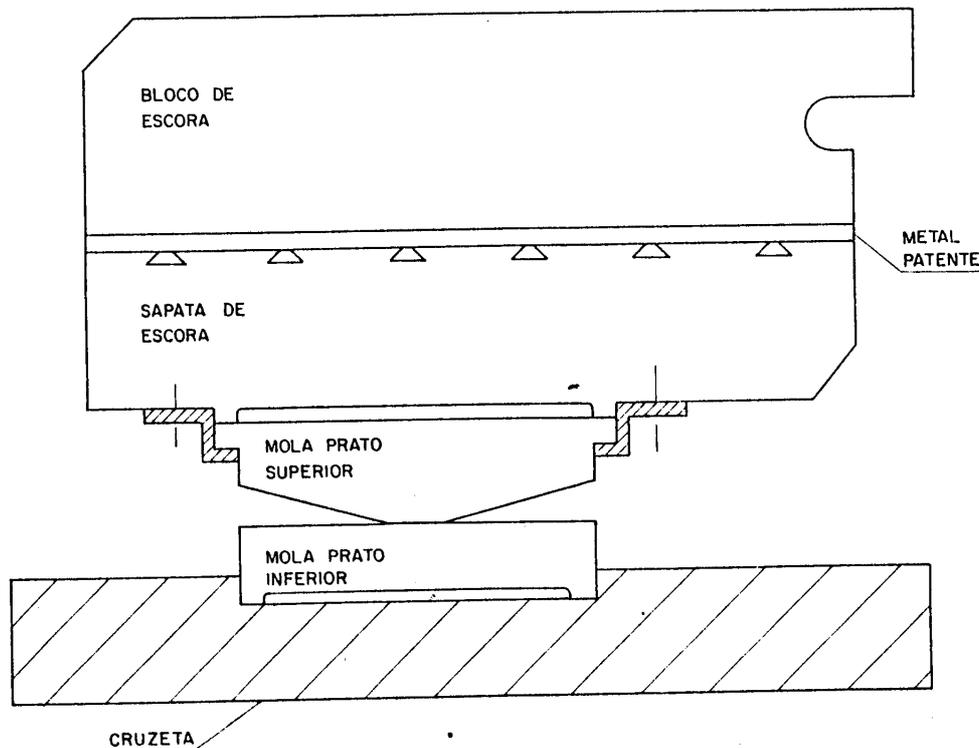


Figura 1 – Desenho esquemático do mancal de escora

2 A OCORRÊNCIA DA FRATURA:

A presente reincidência (dezembro de 2006), desta feita na UG#2, foi novamente atribuída a agentes agressivos, a partir dos quais manchas de oxidação e pites de corrosão (Figura 2) foram formados. Estes últimos, por sua vez, funcionaram como nucleadores de uma trinca que progrediu estavelmente sem que fosse atingido seu tamanho crítico, a partir do qual, a mesma evoluiria de forma instável e ocorreria, ao final, a fratura frágil da mola prato. Na presente ocorrência não chegou a haver a

fratura plena da mola prato, visto que a trinca foi detectada ainda durante a fase de seu crescimento estável. Justifica-se a não fratura plena da mola prato pelo fato de que a trinca formada foi suficientemente grande para permitir o seu vazamento, o que foi confirmado pelo teste de ultra-som (US), e conseqüente redução da tensão atuante. A Figura 3 mostra a aparente profundidade da trinca na superfície lateral da mola, enquanto a Figura 4 mostra a face superior da mola prato, como encontrada. Desta feita, diferentemente da abordagem anterior, se optou por dar uma tratativa conforme a Mecânica da Fratura Linear e Elástica, introduzindo os conceitos da tenacidade a fratura e de tamanho crítico de defeito. Em outras palavras, pretende-se neste trabalho determinar a menor espessura a que estes elementos podem ser mantidos em operação, ou seja, até quando estes elementos podem ser recuperados, através da retirada destes defeitos superficiais com redução de espessura, sem que a sua integridade estrutural seja afetada, bem como se rever a causa da falha deste componente, que acreditamos ser a mesma para todas as outras falhas havidas no passado.

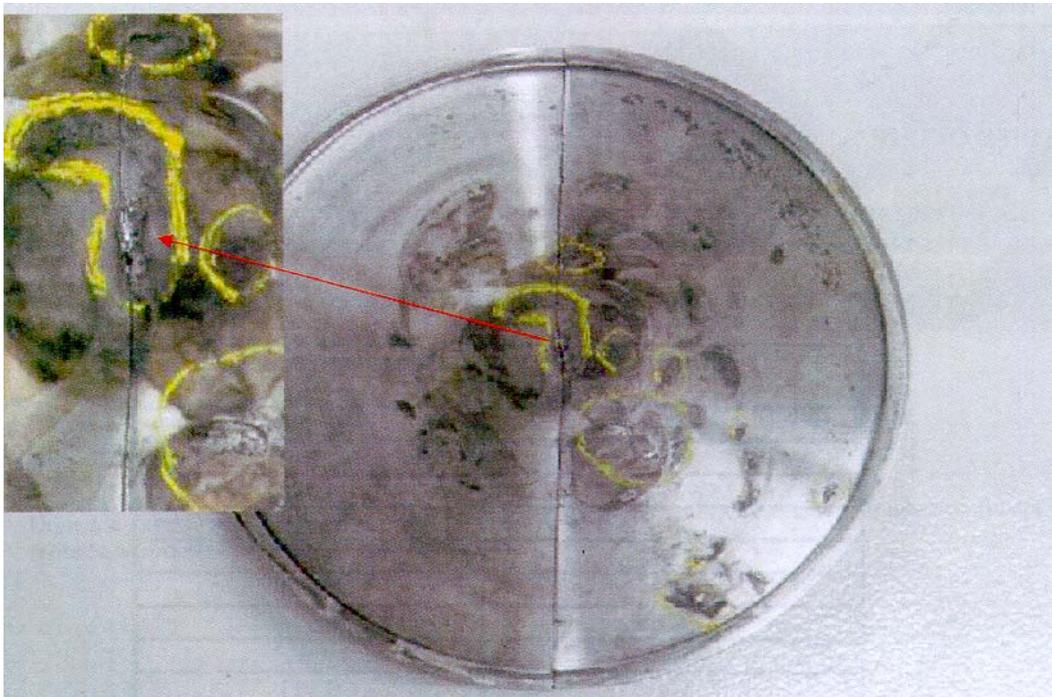


Figura 2 – Face inferior da mola fraturada (lado tracionado). No detalhe, local de início da trinca com deformação plástica (pites).

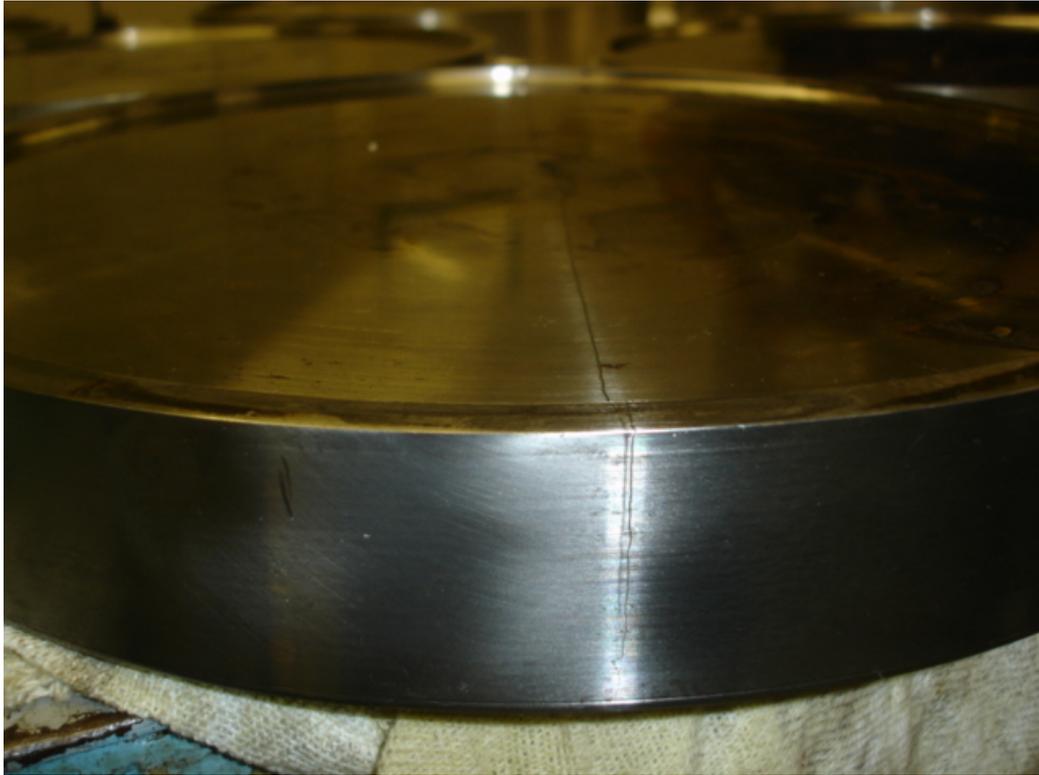


Figura 3 – Profundidade visual da trinca na superfície lateral da mola.



Figura 4 – Face superior da mola prato, como encontrada. Lado mais fechado da trinca.

3 MATERIAL

O material das molas prato é o aço 50CrV4 DIN 17221, correspondendo ao SAE 6150 (Villares VN-50), com a composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do material da mola-prato

Elemento(%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
50 CrV4 DIN17221	0,47/0,55	0,15/0,40	0,70/1,10	0,035	0,035	0,90/1,20	0,10/0,20
SAE 6150	0,48/0,53	0,15/0,35	0,70/0,90			0,80/1,10	min 0,15

Ainda segundo o relatório da Siemens,⁽¹⁾ o material é beneficiado devendo sua dureza situar-se entre 410 e 470 HV. De fato, o material das molas corresponde ao de projeto, ou seja, 50CrV4 DIN 17221, similar ao aço SAE 6150, temperado e revenido, com microestrutura constituída predominantemente de martensita revenida e com dureza média compreendida na faixa especificada.⁽⁷⁾

O diagrama de revenimento da Figura 5 permite obter demais características mecânicas

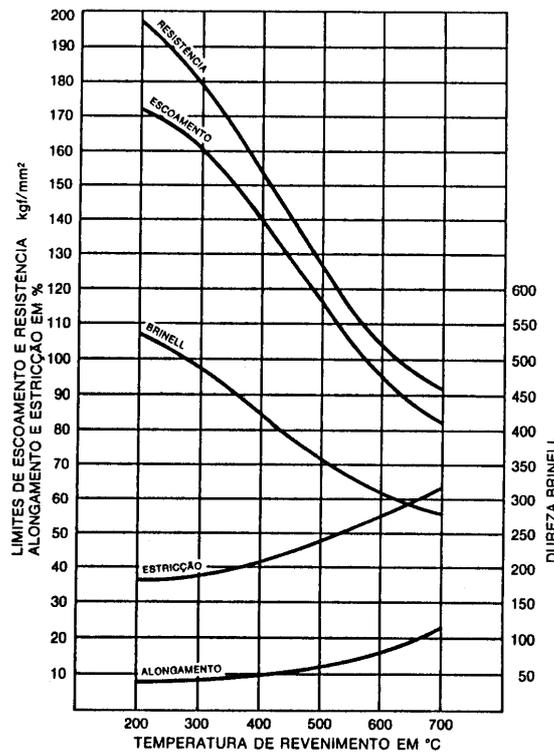


Figura 5 – Diagrama de revenimento para o aço VN50⁽³⁾

Em função da dureza, pode-se obter o valor da energia absorvida no ensaio de impacto de Charpy através da Figura 6.

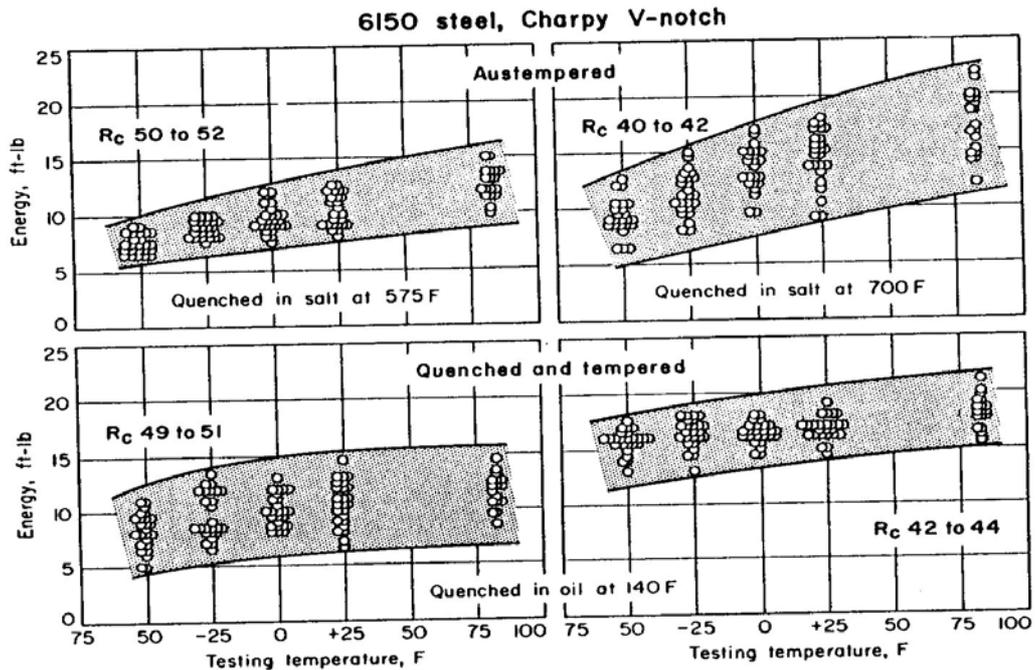


Figura 6 – Tenacidade medida por Charpy ⁽⁴⁾

Agrupando-se as características mecânicas, temos:

Faixa de dureza: 410 HV a 470 HV, 41,8 RC a 46,9 RC ou 388 HB a 441 HB.

Escoamento (σ_e): 1225(125) MPa (kg/mm²) a 1425(145) MPa (kg/mm²)

Ruptura (σ_r): 1342(137) MPa (kg/mm²) a 1568(160) MPa (kg/mm²)

Ensaio de Charpy: 20 (15) J(ft.lb)

4 SOLICITAÇÃO NAS MOLAS PRATO:

As Figuras 7 e 8 mostram as dimensões e o carregamento atuante nas molas prato inferiores, conforme os seguintes valores:

- Carga estática: 616,4 ton
- Empuxo a plena carga: 446 ton
- Número de molas inferiores: 12
- Carga máxima/mola: 88530 kg

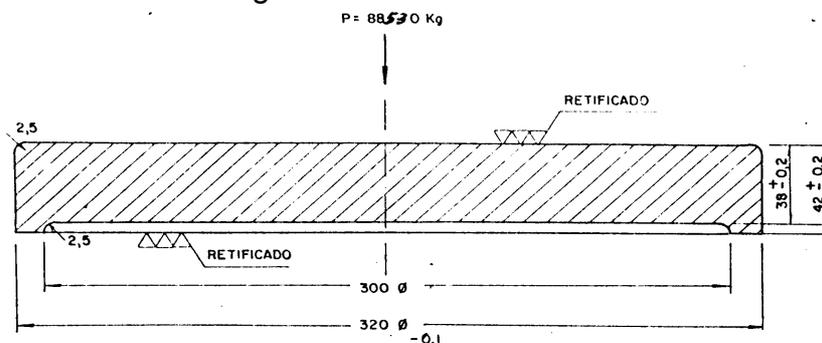


Figura 7 – Dimensional da mola prato inferior

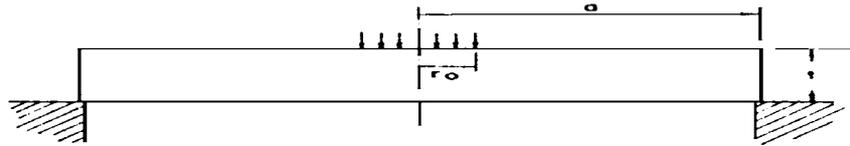


Figura 8 – Dimensões e carregamento atuante na mola prato inferior

De Roark,⁽⁵⁾ temos:

$$\sigma = \frac{3W}{2\pi mt^2} \left[m + (m+1) \ln \frac{a}{r_0} - (m-1) \frac{r_0^2}{4a^2} \right]$$

W → carga

m → inverso do coeficiente de Poisson

r_0, a, t → mostrados na Figura 8

$r_0 = 22,5$ mm

$t = 38$ mm

$a = 160$ mm

$$m = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0,304} = 3,3$$

Ainda de Roark,⁽⁵⁾ podemos calcular a deflexão da mola:

$$Y = \frac{3W(m^2 - 1)}{16\pi Em^2 t^3} \left[\frac{(12 + 4)a^2}{m + 1} - 4r_0^2 \ln \frac{a}{r_0} - \frac{(7m + 3)r_0^2}{m + 1} \right]$$

Agrupando os valores calculados na Tabela 2, teremos:

Tabela 2 – Solicitações de cálculo e respectivas deflexões

Tensão solicitante	Comentários	t(espessura)	Y(deflexão)
104 kg ² /mm (1019 MPa)	Tensão máxima de projeto	38 mm	1,05 mm
115 kg ² /mm (1127 MPa)	Acréscimo de 10% na solicitação	36,2 mm	1,22 mm
125 kg ² /mm (1225 MPa)	Limite de escoamento	34,7 mm	1,38 mm

5 DETERMINAÇÃO DO K_{IC} E DO TAMANHO CRÍTICO DO DEFEITO (a_c)

Sabemos que as molas trabalham acima da faixa de temperatura de transição para o ensaio de impacto de Charpy, assim para o valor de CVN e considerando aço Cr-Mo-V, usaremos a seguinte correlação,⁽⁶⁾ usada, por segurança, como estando o material na região de transição:

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = 2(CVN)^{1,5}$$

K_{IC} → valor crítico da tenacidade à fratura (ksi \sqrt{in})

E → módulo de elasticidade, 30.10⁶ psi

CVN → energia absorvida, 15 lb.ft, conforme ensaio de Charpy

$$K_{IC} = 59 \text{ ksi}\sqrt{in} = 65 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Da Mecânica da Fratura, sabemos que:

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi a_c} \Rightarrow a_c = \frac{1}{\pi} \times \frac{K_{IC}^2}{\sigma^2}$$

σ → tensão de projeto

a_c → tamanho crítica da trinca

Para: $\sigma = 1019$ MPa → $a_c = 0,0013$ m = 1,3 mm

Para: $\sigma = 1127$ MPa → $a_c = 0,0010$ m = 1,0 mm

6 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA:

A microscopia ótica confirmou a microestrutura esperada constituída predominantemente de martensita revenida.⁽⁷⁾ Também foram observadas inclusões alongadas de sulfeto de manganês que, por situarem-se na direção perpendicular ao desenvolvimento da trinca, praticamente, não influenciaram no seu aparecimento e evolução.

Macroscopicamente, a análise fractográfica revelou que a trinca iniciou-se na parte central da superfície inferior da mola com presença de mecanismos mistos de fratura com características predominantemente frágeis. Por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram observadas no entorno desta região central muitas facetas de clivagem associadas a propagação intergranular da trinca primária e a presença de microcavidades, conforme Figura 9. Este mecanismo praticamente prevaleceu ao longo de toda a fratura.

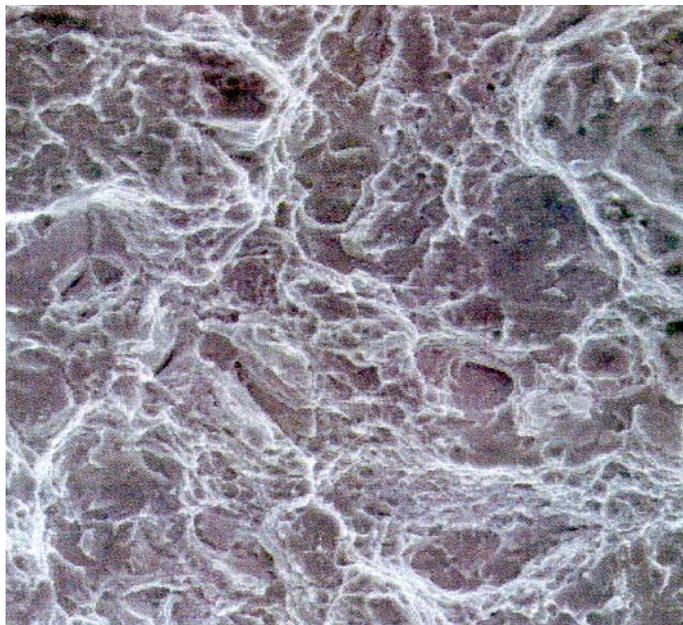


Figura 9 – Fractografia representativa de uma região próxima à superfície da mola-prato onde a trinca estava mais aberta (embaixo). Áreas apresentando facetas de fratura intergranular, clivagem e microcavidades.⁽⁷⁾

7 CONCLUSÕES

1. A verificação dimensional para uma tensão solicitante 10% acima da tensão máxima de projeto acarreta em uma espessura de mola de 36,2 mm, portanto, 1,8 mm menor que a espessura padrão da mola. Para este mesmo nível de tensão, o tamanho crítico de defeito, a partir do qual ocorre a fratura frágil da mola, é de 1 mm.
2. A ruptura da mola prático se deu por um mecanismo de fratura frágil, onde não foram encontradas evidências de fadiga, nem macroscopicamente, através das "marcas de praia", nem microscopicamente, através da presença de estrias, que seriam obrigatoriamente existentes em um processo de fadiga para um aço com a dureza observada. Tal fato contraria o relatório,⁽¹⁾ o qual atribui a falha das molas, ocorrida na época, à fadiga devido à nucleação da trinca ocasionada por um agente externo agressivo.
3. A nosso ver, a causa primordial para falha foi devida a um mecanismo de corrosão sob tensão (CST), a qual para se desenvolver necessita de que ocorram simultaneamente os três parâmetros a seguir: material suscetível, meio corrosivo e sollicitação de tração. Acreditamos que estes três fatores, além do tempo de exposição, estão presentes nesta ocorrência, visto que, primeiro, o material de estrutura martensítica apresenta mais susceptibilidade de sofrer CST,⁽⁸⁾ por outro lado, ligas binárias que contenham pequena quantidade de outros elementos que não os principais, são mais susceptíveis a falhar por CST;⁽⁹⁾ segundo, a superfície da mola, que encontrava-se com manchas de oxidação e pites escurecidos de corrosão, pertence a um volume confinado onde não há preenchimento de óleo e, sim de ar, por conseguinte, sujeita à formação de umidade ou de ions oxigenados⁽⁹⁾ na temperatura, basicamente ambiente, da própria mola e, terceiro, a trinca originou-se na região das maiores sollicitações trativas.
4. A corroborar ainda este diagnóstico, estão ainda os seguintes aspectos característicos da CST: fratura normal ao sentido das tensões aplicadas e macroscopicamente frágil, praticamente, sem deformações, exceto na região onde se originou a falha, que apresentou deformação plástica localizada (pites) e, sob o ponto de vista do MEV, com a presença de facetas de clivagem e o desenvolvimento preferencial de crescimento intergranular da trinca.⁽¹⁰⁾ Há de se destacar ainda que, na CST, a espécie química essencial para causar o trincamento não precisa estar presente em grande quantidade ou em elevada concentração, nem ser agressiva ao metal em termos usuais de corrosão.

8 RECOMENDAÇÕES

A fim de recuperar as molas prático inferiores desta UG#2 e demais máquinas similares que, por ventura, encontrarem-se com o mesmo problema de pites de corrosão, foi recomendado:

1. Retificar a superfície inferior (interna à aba), retirando-se todo e qualquer sinal de corrosão, respeitando o limite de até 1 mm de espessura diminuída. Como molas com espessuras diferentes, defletem com valores desiguais, o conjunto a ser montado numa máquina não deve ultrapassar a tolerância de espessura de projeto de $\pm 0,2$ mm. Por exemplo: se o pite mais profundo do conjunto de molas acarretar em uma retirada de material de 0,7 mm, todas as demais molas do mesmo conjunto deverão ser usinadas igualmente (dentro da tolerância).

2. Para evitar ou, na pior das hipóteses, postergar enormemente o ressurgimento de pites, após a retífica das molas prato impregnar com pincel a superfície inferior das molas com graxa MOLYKOTE Longterm 2 Plus. Esta graxa apresenta excepcional aderência, com ponto de gota a 180°C, e protege contra corrosão, a qual pretendemos prevenir. A mesma deverá ser aplicada apenas nesta superfície, não devendo, portanto, ter qualquer contato com o óleo do mancal da unidade visto que ficará confinada na câmara de ar formada entre esta superfície e a cruzeta do mancal.

REFERÊNCIAS

- 1 Relatório SIEMENS nº 1.42.9-1087, de 08/08/1983.
- 2 Barbastefano, E., Freire, E., Silva, M.A.B.B., Análise da Fratura da Mola Prato Inferior do Mancal de Escora da Máquina 3 da Usina de Furnas, agosto de 1983.
- 3 Catálogo Villares – Aços para Beneficiamento, 2ª Edição, 1991.
- 4 Metal's Handbook, vol. 1, p.233.
- 5 Roark, Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill Book, 4th Edition, 1965.
- 6 Hertzberg, R.W., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1989.
- 7 Certificado ITUC-PUC/RJ 0101/07, março de 2007.
- 8 Cetlin, P.R., da Silva, P.S.P., Análise de Falhas, ABM, 1978.
- 9 Metal's Handbook, vol. 10, p.208, 210.
- 10 Godefroid, L.B., Análise de Falhas, ABM, 2004.