

ANÁLISE DE FALHA EM UMA BOMBA DE MÁQUINA SERVO-HIDRÁULICA¹

Wagner Duarte Flores²
Sidney Cardoso Araújo³
Luiz Cláudio Cândido⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁴

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a análise de falha em uma bomba de engrenagens de dois estágios, utilizada para promover a vazão e a pressão adequadas ao funcionamento de uma máquina servo-hidráulica de ensaios mecânicos. A análise de falha compreendeu as seguintes etapas em uma engrenagem fraturada: caracterização do problema, análise química, análise microestrutural, ensaio de dureza e análise fractográfica. Chegou-se à conclusão que o aço utilizado para confecção da engrenagem, embora adequadamente selecionado, não foi submetido ao tratamento térmico adequado para suportar os esforços de fadiga, durante a operação da bomba.

Palavras-chave: Análise de falhas; Fadiga; Equipamento de ensaios mecânicos.

FAILURE ANALYSIS IN A PUMP USED IN A SERVO-HYDRAULIC MACHINE

Abstract

This paper presents a failure analysis methodology to determine the probable reasons for a failure (root causes) of a gear pump used in a servo-hydraulic machine for mechanical tests. The basic steps adopted were: background data about the performance of the equipment, visual examination of the failure area to determine the origin of the failure, chemical analysis of the gear fractured and comparison with standards, metallographic examination to evaluate microstructural features, microhardness testing to identify quality of heat treatment, and fractographic examination to determine the failure mode. The gear failed by fatigue, not by improper selection, but due to an improper heat treatment.

Key-words: Failure analysis; Fatigue; Mechanical testing equipment.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Aluno de graduação, UFOP, Ouro Preto/MG.*

³ *Engenheiro de Minas, GESFRAM/UFOP, Ouro Preto/MG.*

⁴ *Membro da ABM, Professor, M.Sc., D.Sc., GESFRAM/UFOP, Ouro Preto/MG.*

INTRODUÇÃO

A fratura de um componente estrutural geralmente é considerada um acontecimento indesejável, uma vez que ela coloca em risco vidas humanas e provoca a perda de materiais e perda de tempo (\$\$). A história da engenharia está repleta de exemplos catastróficos, em que o projeto mal feito, a seleção indevida de materiais, ou a operação inadequada do equipamento levaram a uma falha estrutural, com consequentes mortes e avarias diversas.

As razões principais para se conduzir uma análise de falhas consistem na determinação e na descrição dos fatores responsáveis para a falha do componente estrutural ou da própria estrutura. Esta determinação pode ser motivada tanto pela prática de engenharia como por considerações de ordem legal.

Neste contexto, surgem as diversas técnicas de previsão do comportamento mecânico dos materiais e de análise de possíveis falhas estruturais. Seja numa etapa preventiva ou posterior ao processo de falha, torna-se imperativo o conhecimento acerca da resistência dos materiais à fratura, para que a sua aplicação estrutural esteja segura contra este fenômeno. Esta resistência à fratura deve ser, portanto, convenientemente avaliada através de ensaios mecânicos que forneçam propriedades relacionadas com a degradação dos materiais. O tipo de fratura do material em questão deve ser caracterizado, através de técnicas padronizadas de análise macroscópica e fractográfica. A detecção de prováveis danos superficiais e/ou internos do material deve ser buscada a partir de ensaios não destrutivos.

De uma maneira geral, existe uma metodologia padrão que é adotada para se conduzir uma análise de falha. Trata-se de uma sequência de procedimentos, que deve ser aplicada para se entender as causas da falha do componente estrutural, de tal sorte a propiciar a confecção de um laudo técnico sobre a questão. Nesta metodologia podem ser destacadas as seguintes etapas:^[1]

- a) História prévia, compreendendo tanto a fabricação quanto a utilização do material;
- b) Seleção e limpeza de partes a serem analisadas;
- c) Ensaios não destrutivos, incluindo análise macroscópica, ensaio de dureza e análise química;
- d) Ensaios destrutivos, incluindo microscopia e ensaios mecânicos;
- e) Análise de resultados e confecção de um relatório, com conclusões e recomendações.

O presente trabalho apresenta a análise de falha realizada em uma bomba de engrenagens de máquina servo-hidráulica, usada para ensaios mecânicos na UFOP. Esta bomba é empregada para injeção de óleo para movimento do pistão da máquina, com consequente realização dos ensaios. A bomba funcionou durante aproximadamente oito anos, quando ocorreu a fratura em três partes de uma de suas engrenagens. A metodologia empregada para a análise envolveu a sequência apresentada anteriormente. É de conhecimento dos autores que uma bomba semelhante, utilizada para a mesma função em outra universidade do país, fraturou-se após cerca de vinte anos de operação.

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 1 apresenta o sistema hidráulico utilizado para funcionamento da máquina de ensaios mecânicos. A bomba em questão é constituída de dois estágios, e possui um conjunto de engrenagens, que promovem a vazão de óleo do

reservatório do sistema hidráulico para a câmara onde se localiza o pistão da máquina. Esta operação é feita através do acoplamento da bomba a um motor de 1755 rpm, numa pressão de aproximadamente 3.000 psi. Os esforços mecânicos que atuam nas engrenagens são de natureza cíclica, isto é, fadiga, uma vez que a máquina realiza diversos tipos de ensaios, estáticos ou cíclicos, numa periodicidade aleatória ao longo do tempo. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática geral da bomba, com seus principais componentes.

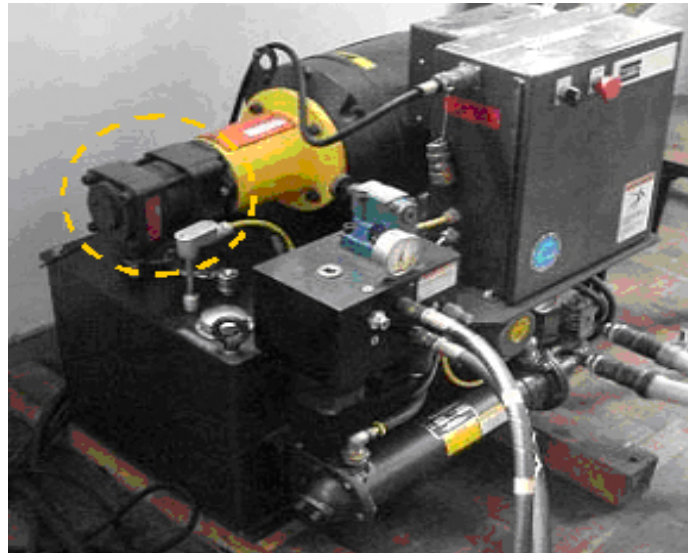


Figura 1: Sistema hidráulico da máquina de ensaios mecânicos. A localização da bomba está marcada por uma linha tracejada.

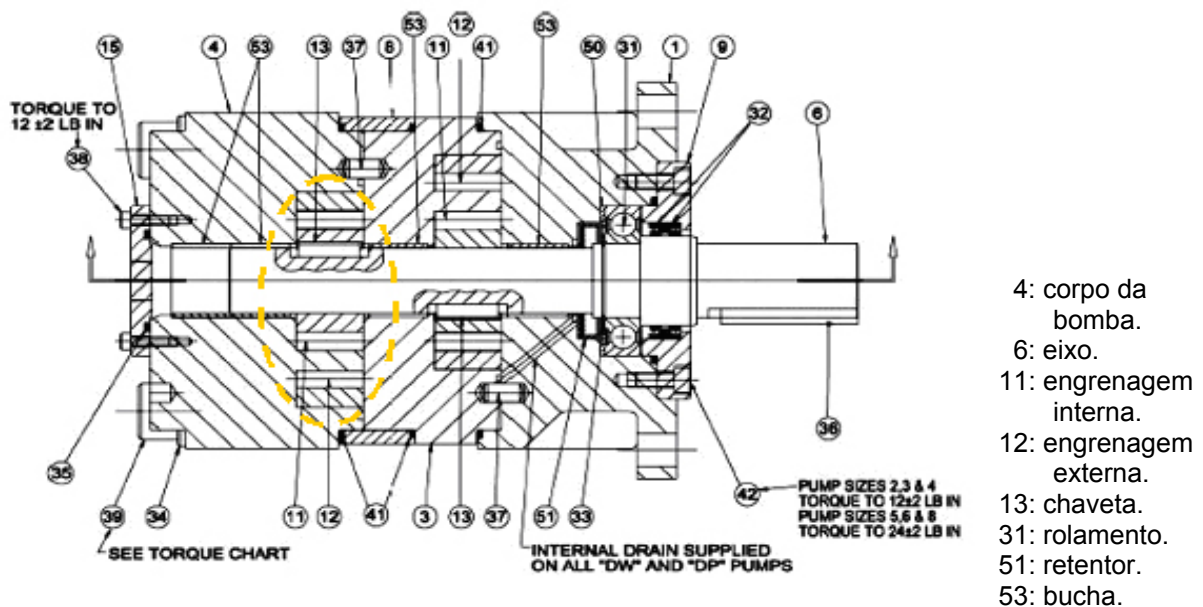


Figura 2: Esquema geral da bomba. A linha tracejada indica a posição da engrenagem fraturada.

A Figura 3(a,b,c) mostra alguns dos principais componentes danificados da bomba. A engrenagem interna fraturou-se em três posições, a partir da raiz de seus dentes. A idéia preliminar é que o trincamento ocorreu inicialmente em um dente, próximo à chaveta, passando em seguida para um segundo dente, e finalmente para um terceiro dente. A engrenagem externa ficou travada no corpo da bomba. Ocorreu também desgaste na chaveta, na “meia-lua” e na bucha do eixo.

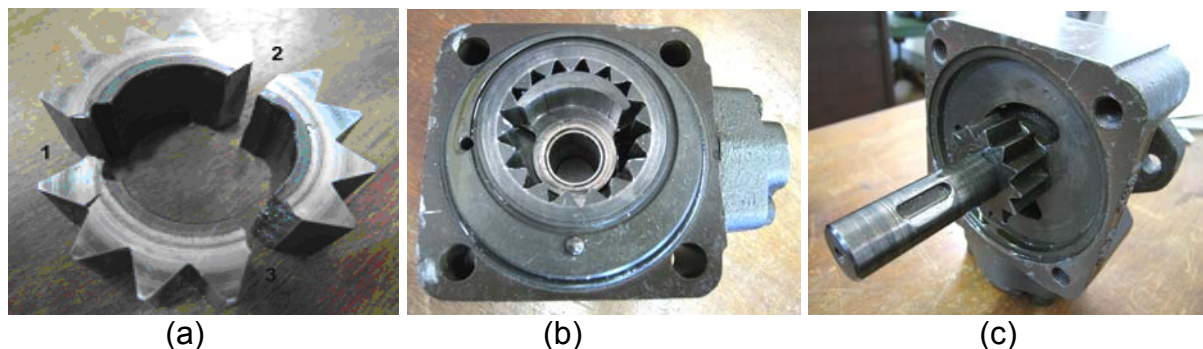


Figura 3: Detalhes da bomba. (a) Engrenagem interna fraturada em três posições. Os números “1”, “2” e “3” indicam a seqüência de trincamento. (b) Engrenagem externa travada, e “meia-lua” e bucha desgastados. (c) Eixo com chaveta desgastada.

ANÁLISE QUÍMICA DA ENGRENAGEM

A Tabela 1 apresenta a composição química do material utilizado na confecção da engrenagem interna da bomba. A análise foi realizada em um espectrômetro de plasma.

Uma variedade de ferros fundidos, materiais da metalurgia do pó, ligas não ferrosas, e materiais não metálicos é usada para a confecção de engrenagens, mas os aços, devido à sua elevada relação resistência mecânica/peso e custo relativamente baixo, são os materiais mais comumente empregados para engrenagens. Os aços utilizados para a confecção de engrenagens são geralmente tratados termicamente para endurecimento superficial, e posteriormente endurecidos por têmpera e revenimento. Entre os aços mais comuns para esta aplicação, citam-se^[2] os tipos AISI-SAE 1040, 1060, 4140, 4340, 8620 e 8640.

Dos aços citados anteriormente, o aço AISI-SAE 4140 é o que mais se aproxima do material da engrenagem em questão, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 1: Composição química do aço da engrenagem (% em peso).

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S
0,40	0,92	0,19	0,09	1,01	0,15	0,01	0,03

Tabela 2: Composição química típica de um aço AISI-SAE-4140 (% em peso).

Aço	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P _(máx)	S _(máx)
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	---	0,80-1,10	0,15-0,25	0,035	0,040

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA ENGRENAGEM

Amostras para análise metalográfica foram preparadas para caracterização do aço empregado na engrenagem. A análise foi realizada na superfície da engrenagem, visando caracterizar as regiões com trincamento.

As amostras metalográficas foram submetidas ao procedimento padrão de desbaste, lixamento, polimento, ataque e observação através do microscópio ótico. O reativo utilizado foi Nital (2% de HNO₃, 98% de etanol). A metalografia foi realizada através da utilização de um microscópio ótico, marca LEICA, com analisador de imagens QWIN.

A Figura 4(a,b,c) ilustra uma região próxima à raiz de um dente, sem ataque químico. Pode-se perceber a nucleação de trinca na raiz, e uma área adjacente à

propagação de trinca com inúmeras trincas secundárias. Observa-se também a nucleação de trincas do lado oposto aos dentes da engrenagem. Estas características foram verificadas em praticamente todas as raízes dos dentes.

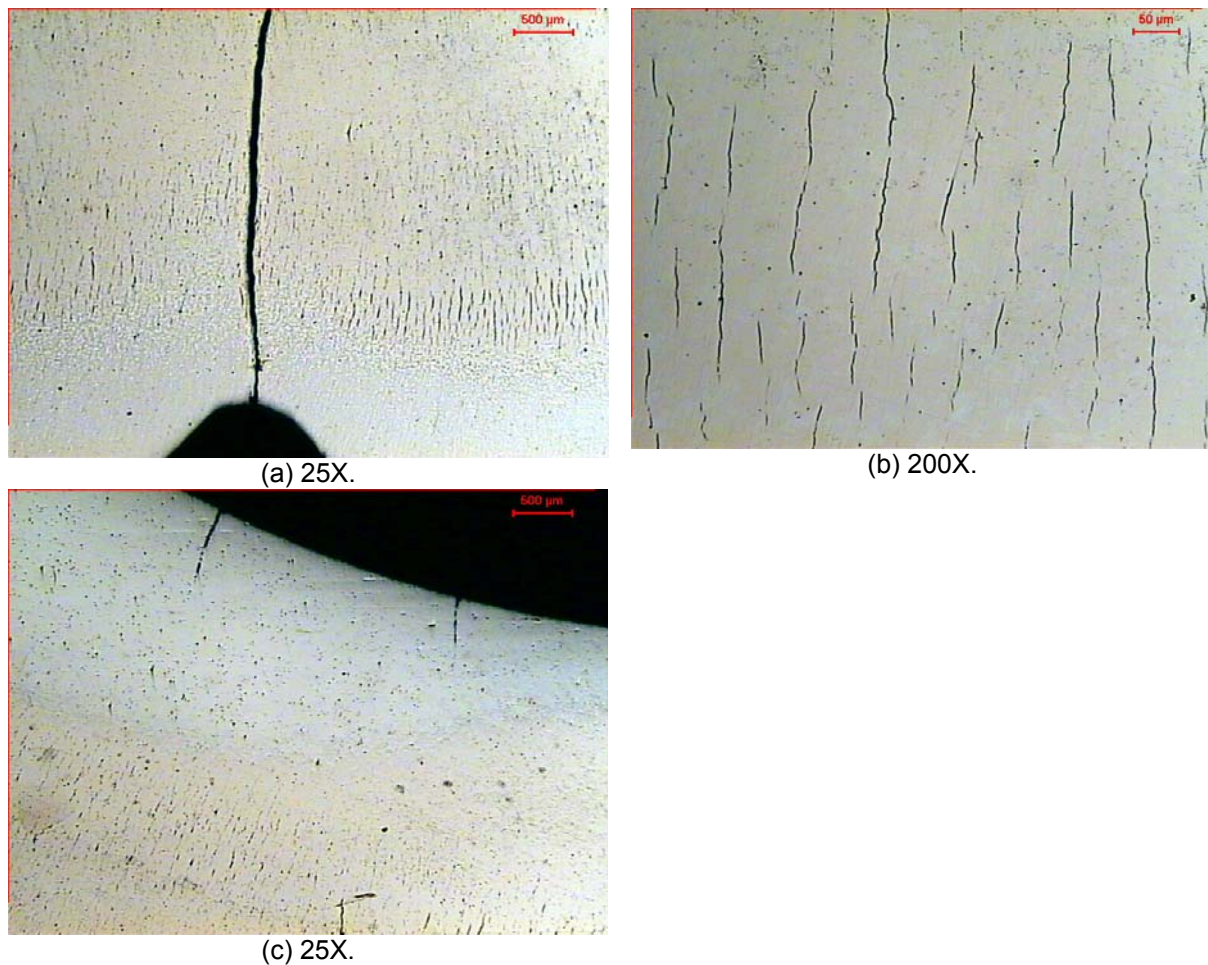


Figura 4: Iniciação e propagação de trinca a partir da raiz de um dente da engrenagem. a) Iniciação da trinca na raiz; b) Trincamento adjacente à propagação da trinca; c) Trincamento no lado oposto aos dentes.

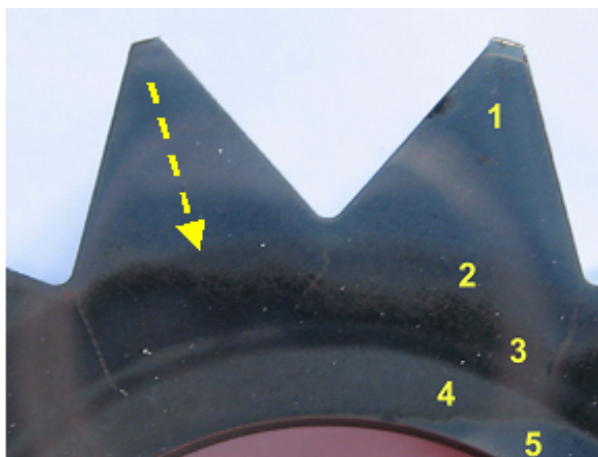
A iniciação de trinca na raiz do dente da engrenagem é coerente com a análise de tensões que se pode fazer para o sistema de duas engrenagens em movimento.^[2,3] A Figura 5 ilustra esta análise de tensões através da técnica de fotoelasticidade. Pode-se observar nesta figura a elevada concentração de tensões compressivas no ponto de contato entre as duas engrenagens, as tensões de tração no raio da raiz, e o ponto de tensão nula na linha central do dente, abaixo do círculo da raiz. Por outro lado, é interessante notar que a propagação de trinca geralmente ocorre paralelamente ao círculo da raiz, com o dobramento do dente e sua fratura. Este comportamento não ocorreu no presente caso, uma vez que as trincas propagaram-se radialmente.



Figura 5: Estudo fotoelástico de dois dentes de engrenagens recebendo carregamento.^[2]

A Figura 6 (a,b,c,d,e,f) ilustra uma região trincada da engrenagem, com ataque químico. Pode-se observar que a engrenagem foi tratada superficialmente, provavelmente através de têmpera por chama, para endurecimento superficial. Praticamente todos os dentes possuem uma microestrutura martensítica, com pequeno teor de austenita retida. Abaixo dos dentes a microestrutura varia consideravelmente, voltando a se tornar martensítica na região interna da engrenagem. Esta heterogeneidade microestrutural indica um tratamento térmico mal conduzido.

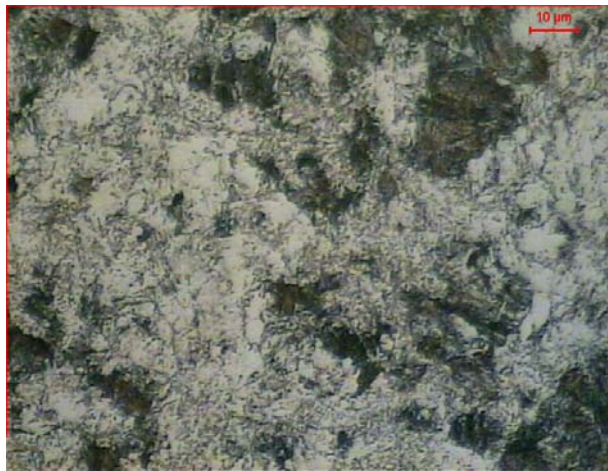
Dentes de engrenagens são geralmente endurecidos através de têmpera por chama. Por outro lado, a aplicação de calor deve ser rigorosamente controlada.^[4] Se o calor for aplicado por um tempo demasiadamente longo, a profundidade da camada endurecida será excessiva. A Figura 7(a,b) compara duas engrenagens com histórias térmicas distintas. Pode-se observar o trincamento na engrenagem indevidamente tratada.



(a)



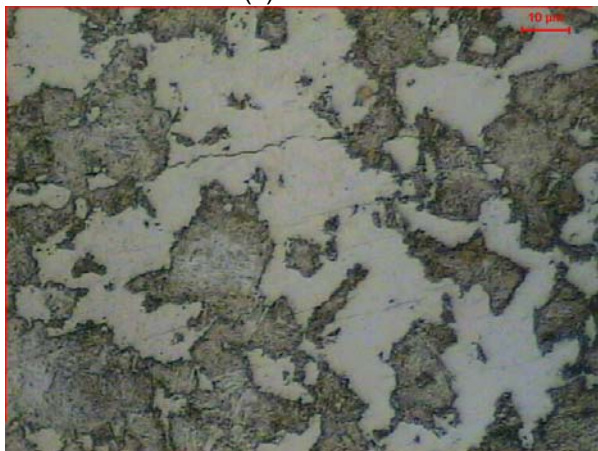
(b) 1000X.



(c) 1000X.



(d) 1000X.



(e) 1000X.



(f) 1000X.

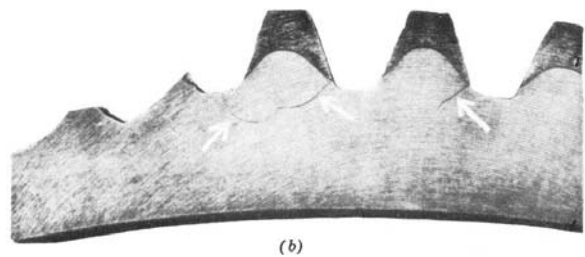
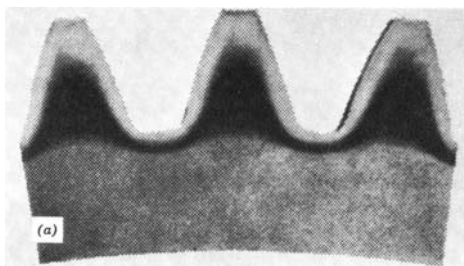


Figura 7: (a) Engrenagem devidamente endurecida. (b) Engrenagem com erro de tratamento térmico, mostrando trincamento nas raízes dos dentes (setas) [4].

PERFIL DE MICRODUREZA DA ENGRENAGEM

A Figura 8 apresenta o perfil de microdureza, obtido ao longo da engrenagem, de acordo com o sentido mostrado na Figura 6(a). Este perfil foi obtido a partir da utilização de um aparelho de microdureza Vickers, modelo Wolpert, com carga de 25g. Observa-se uma grande variação na dureza da engrenagem, conforme também encontrado com a microestrutura. Este resultado novamente indica um tratamento térmico mal conduzido.

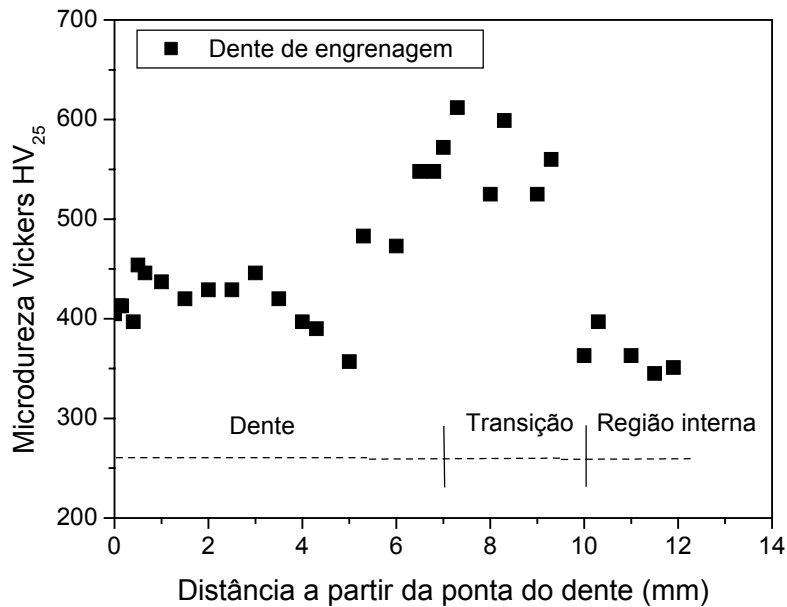


Figura 8: Perfil de microdureza de um dente da engrenagem, de acordo com o indicado na Figura 6(a).

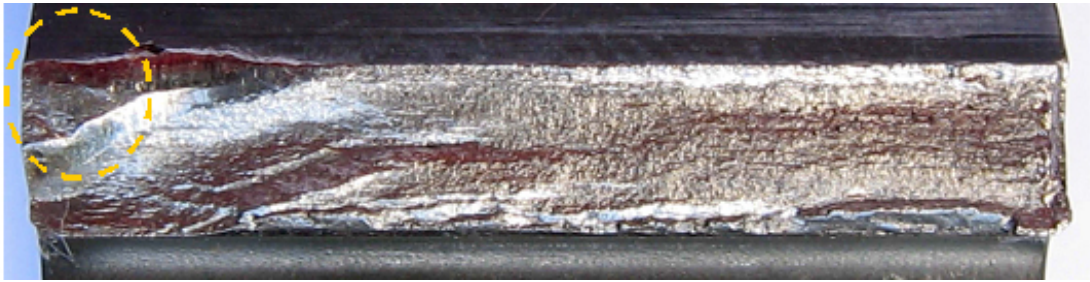
Deve-se salientar que o normal na prática de tratamento para endurecimento de engrenagens é a obtenção de uma dureza superficial da ordem de 700 HV (cerca de 60 HR_C).^[3,4] Por outro lado, a faixa de dureza encontrada na presente engrenagem mostra novamente que o tratamento térmico foi mal conduzido.

ANÁLISE FRATOGRÁFICA DA ENGENAGEM

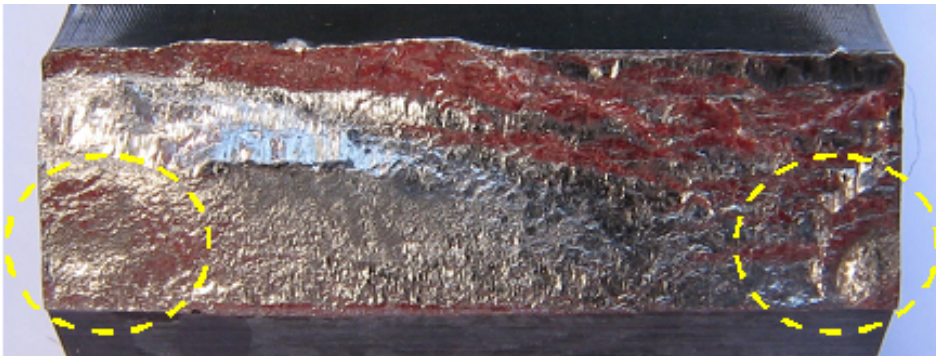
A análise macrofratográfica foi realizada com uma máquina fotográfica digital, modelo CANON, de 8,0 megapixels. A análise microfratográfica foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura - MEV, modelo JEOL JSM 5510.

A Figura 9 (a,b,c) apresenta as superfícies de fratura (macrografias), de acordo com a seqüência mostrada na Figura 3(a). O trincamento da engrenagem iniciou-se por fadiga na superfície mostrada na Figura 9(a), onde se tem a menor área resistente, devido à presença de uma chaveta. Uma vez fraturado este dente, um novo trincamento iniciou-se por fadiga na superfície mostrada na Figura 9(b). Finalmente, ocorreu o trincamento na superfície mostrada na Figura 9(c). Neste caso, a fratura ocorreu de forma estática, uma vez que a engrenagem não suportou mais o carregamento. Observa-se neste caso um aspecto de fratura distinto dos demais.

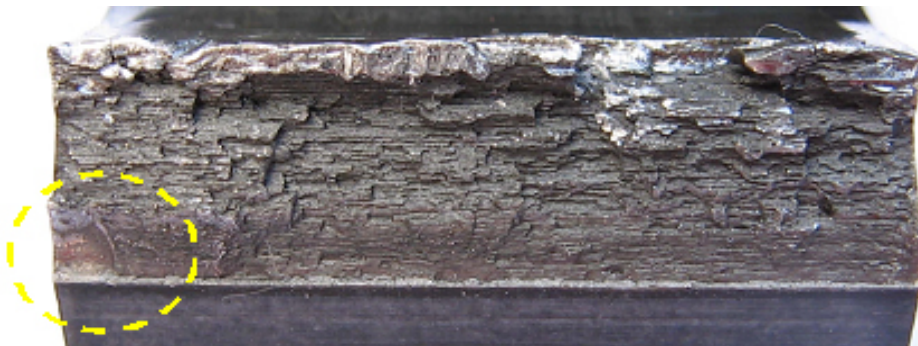
A Figura 10 (a,b,c) apresenta as superfícies de fratura (microfratografias), de acordo com a seqüência mostrada nas Figuras 3(a) e 9(a,b,c). Estas figuras confirmam a análise comentada anteriormente para as macrografias.



(a)

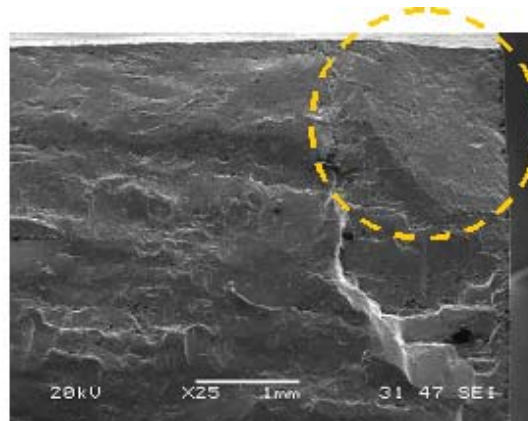
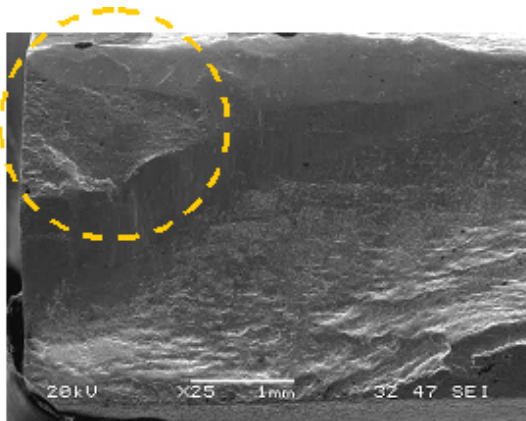


(b)



(c)

Figura 9: Superfícies de fratura (macrografia) da engrenagem. As linhas tracejadas indicam regiões de iniciação de trinca por fadiga.



(b) 25X.

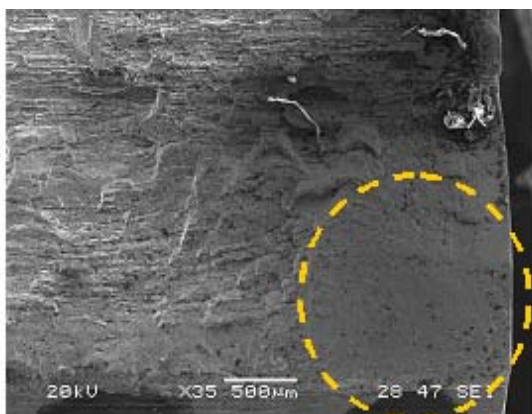


Figura10: Superfícies de fratura (microfratografias) da engrenagem. As linhas tracejadas indicam regiões de iniciação de trinca por fadiga. MEV.

CONCLUSÕES

A análise de falha realizada permite chegar às seguintes conclusões:

- A engrenagem da bomba fraturou-se por fadiga, a partir da nucleação e propagação de trinca a partir da raiz de um dente, numa região de existência de uma chaveta, isto é, de redução de área e de concentração de tensões. No momento em que ocorreu esta fratura, foi nucleada e propagou uma segunda trinca em outro dente, também por fadiga. Após esta fratura, uma terceira trinca nucleou-se e propagou-se, desta vez por arrancamento estático.
- O aço utilizado na confecção da engrenagem atendeu a especificação de composição química para a aplicação em questão.
- A microestrutura da engrenagem indicou a realização de um tratamento térmico de endurecimento superficial. Este tratamento não foi bem conduzido, gerando uma considerável variação de fases presentes, e microdureza abaixo do especificado. Desta forma, o aço apresentou uma vida à fadiga muito aquém do esperado.

Agradecimentos

À FAPEMIG, pelo apoio na participação do 62º Congresso Anual da ABM, 2007.

REFERÊNCIAS

- 1 CÂNDIDO, L.C.; GODEFROID, L.B.; MORAIS, W.A.; *Análise de Falhas*, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, São Paulo, 2006.
- 2 *Metals Handbook*, Volume XI – Failure Analysis and Prevention, American Society for Materials, 10th Edition, 1990.
- 3 WULPI, D.: *Understanding How Components Fail*, American Society for Metals, 7th Printing, 1993.
- 4 COLANGELO, V.J. e HEISER, F.A.: *Analysis of Metallurgical Failures*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1987.