

ANÁLISE DE FALHA EM CONJUNTO DE ENGRENAGENS¹

Toni Paiva Chiossi²

Yonathan Reboh³

Telmo Roberto Strohaecker⁴

Resumo

Um conjunto de engrenagens pode ser usado tanto para alterar um tipo de movimento, aumentando a força ou velocidade, como também o sentido em que ele é realizado. Isso nos revela que as engrenagens podem ser de grande utilidade quando devemos transmitir um movimento contínuo como, por exemplo, de um motor, mudando suas características. Uma aplicação de grande importância de conjuntos de engrenagens esta na construção de sistemas diferenciais, que permitiram um desenvolvimento de veículos mais seguros e com melhor dirigibilidade. A dependência do funcionamento do veículo com relação ao sistema diferencial é tanta que falhas nesse sistema resultam na inutilidade do veículo. Neste trabalho foi analisado um conjunto de engrenagens, que compõem o sistema diferencial de um caminhão, que sofreu falha em serviço. Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que a falha iniciou pela ruptura em um dos dentes de uma das engrenagens devido a problemas metalúrgicos induzidos no processo de endurecimento superficial bem como a presença de fluxo assimétrico nas linhas de deformação.

Palavras-chave: Análise de falha; Sistema diferencial; Cementação

Abstract

Gears can be used to modify the type of movement, to increase power or velocity, and also be used to change the direction which the movement is made. This shows that gears can be very useful to transmit continuous movement. A very important application of gears is in the construction of differential systems, which allowed the development of safer and more reliable vehicles. The dependence of a vehicle on the differential is such that in the event of a failure in this system the vehicle becomes in operant. This work presents a failure analysis of a truck differential that failed in service. The analysis revealed that the failure initiated at the root of gear tooth. The failure was facilitated by an asymmetry in the deformation lines that promoted a small crack during the surface heat treatment of the gear.

Key words: Failure analysis

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Graduando em Engenharia Metalúrgica – UFRGS

³ Engenheiro Mecânico, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. (PPGEM) – UFRGS.

⁴ Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM) - UFRGS

INTRODUÇÃO

Diferencial é um complexo sistema de engrenagens que permitem que as rodas motrizes, de um mesmo eixo, girem em velocidades angulares diferentes. É composto de um pinhão cônico e uma coroa dentada, onde se acopla a caixa do diferencial ou caixa de satélites e onde são fixadas as semi-árvores de transmissão. Seu funcionamento foi elaborado pelo francês Onesiforo Pecqueur⁽¹⁾ (Chefe de Oficina no Conservatório de Artes e Ofícios de Paris) em 1827, baseando-se no conceito de que duas rodas motrizes percorrendo o mesmo caminho, com o mesmo raio de rolamento, possuem a mesma velocidade angular; mas, nas curvas, a roda externa escorrega (patina ou derrapa) por percorrer maior distância que a interna. Para evitar este inconveniente, o conjunto de planetárias e satélites entra em ação, permitindo que as semi-árvores girem com velocidades diferentes entre si. À medida que a roda interna diminui sua rotação, o mesmo ocorre com sua planetária correspondente a essa semi-árvore. As engrenagens satélites atuam como uma balança, mantendo igual carga nos dentes das duas planetárias, o que permite diferentes rotações das semi-árvores. Se a velocidade do veículo permanecer constante (100%) em curvas e a velocidade da roda interna cair para 90%, a roda externa terá sua velocidade elevada para 110%. Se a velocidade for nula (roda parada), a outra rodará a 200%. Na Figura 1 é possível visualizar um desenho esquemático de um sistema diferencial.

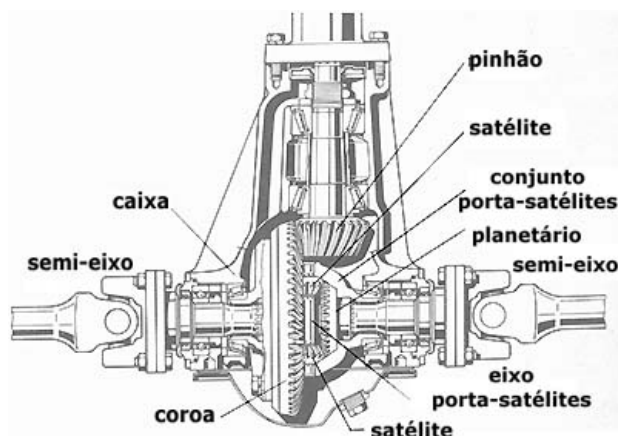


Figura 1. Imagem mostrando um sistema diferencial

Em suma, o pequeno torque de atrito interno é o componente do sistema que faz com que as duas rodas motrizes girem em velocidades diferentes. Em linha reta não existe rotação dos satélites, se o veículo não fizesse curvas, o pinhão e a coroa dariam conta do recado.

Este trabalho apresenta a análise de falha de um sistema diferencial, de um caminhão, que veio a falhar em serviço. O objetivo da análise é entender as causas que levaram o sistema ao colapso a fim de prevenir novas falhas similares.

METODOLOGIA

Análise de Falha

Para a análise de falha, foi tomada como base a seqüência experimental sugerida pela ASM.²⁾ Os estágios aplicados na investigação de uma falha podem variar dependendo da natureza do caso, para o caso apresentado foi adotada a seguinte seqüência:

1. Análise visual dos componentes - Busca de indícios que mostrassem possíveis causas para a falha.
2. Identificação dos pontos críticos de fratura e análise microestrutural destas regiões.
3. Ensaio de microdureza.
4. Análise das linhas de fluxo do material por macrografia.

RESULTADOS

Análise Visual

A Figura 2 mostra o conjunto de engrenagens analisado bem como a identificação realizada. Na análise visual foi observada uma grande quantidade de trincas em todos os componentes (Figura 3) e um acabamento grosseiro dos dentes típico de uma superfície bruta de cementação (Figura 4), ou seja, sem usinagem ou retificação após o tratamento térmico. Observou-se que a engrenagem B apresentava uma morfologia de falha bastante diferente das demais (Figura 5-A). Em análise detalhada da engrenagem B em lupa de baixo aumento, foi possível observar um padrão de regiões nos dentes não arrancados com superfícies características de materiais que sofrem processo de fadiga (Figura 5-E) e outra região de fadiga em um dos dentes arrancados (Figura 5-D). Foi observado também um lascamento em uma das paredes dos dentes não arrancados (Figura 5-B). As trincas observadas nas outras engrenagens são características de materiais que sofrem ruptura estática, causadas por sobrecarga quando o sistema entrou em colapso (Figura 5-C). Estas evidências atraíram a concentração da análise para a engrenagem B.



Figura 2. Imagem mostrando conjunto de engrenagens analisado



Figura 3. Macrografias mostrando grande quantidade de trincas observadas nos componentes. Macrografia extrema à direita mostra o componente analisado por técnica de líquido penetrante.



Figura 4. Imagem mostrando acabamento grosseiro típico de superfícies brutas da cementação. A parte brilhosa deve-se ao contato dos dentes em serviço.

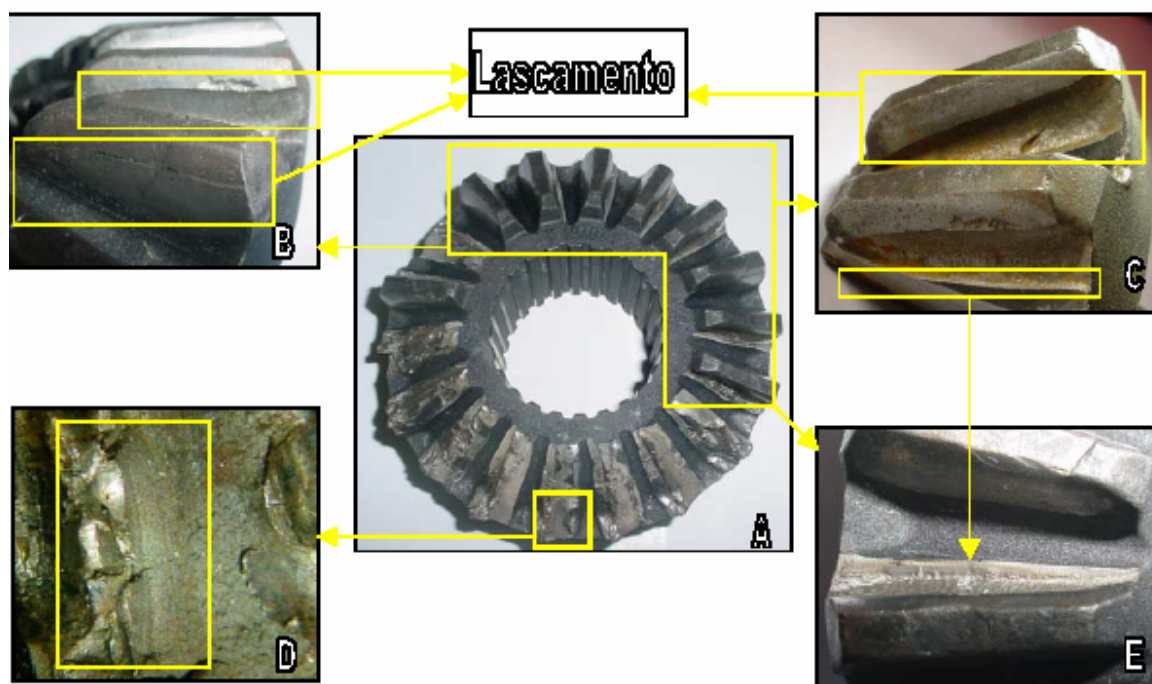


Figura 5. Imagem A mostrando a engrenagem B que apresentou morfologia de falha diferenciada das demais. Imagem B e C mostrando o lascamento. Nota-se que na imagem B a lasca ainda está presa ao dente. Imagem D mostrando uma frente de propagação de fadiga observada em um dos dentes arrancados. Imagem E mostrando frente de propagação de fadiga observada em todos os dentes não arrancados.

Análise Metalográfica

Foi obtido um corpo de prova contendo uma seção transversal do dente mostrado na Figura 5-B. A amostra foi preparada de acordo com procedimento padrão, sendo embutida, lixada e polida. Para revelação microestrutural foi realizado ataque com reagente químico Nital 3%.

Foi observada a presença de uma camada cementada na amostra (Figura 6-A). A microestrutura observada é constituída de martensita revenida (Figura 6-B) e constatou-se a presença de austenita retida na superfície da peça (Figura 7).

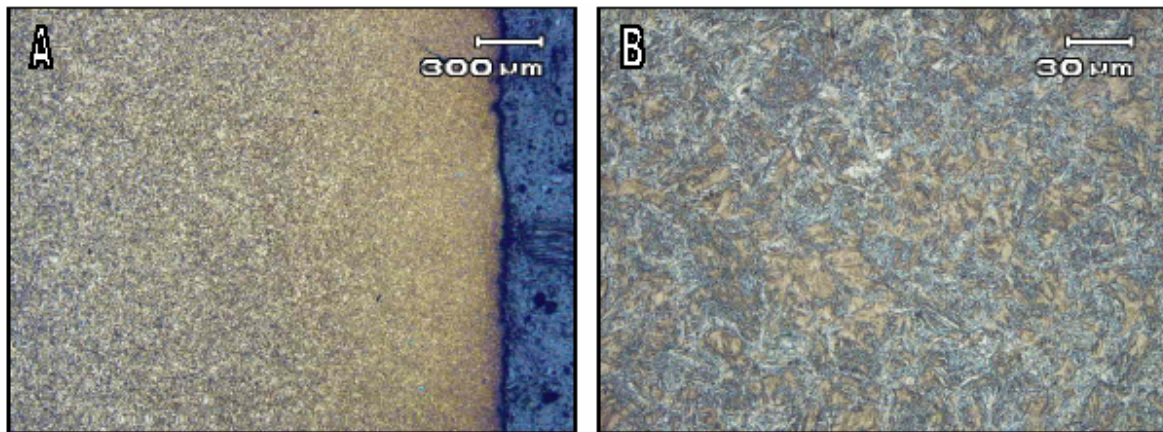


Figura 6. Micrografia A mostrando camada cementada observada. Micrografia B, obtida do núcleo do dente, mostrando microestrutura formada por martensita revenida.

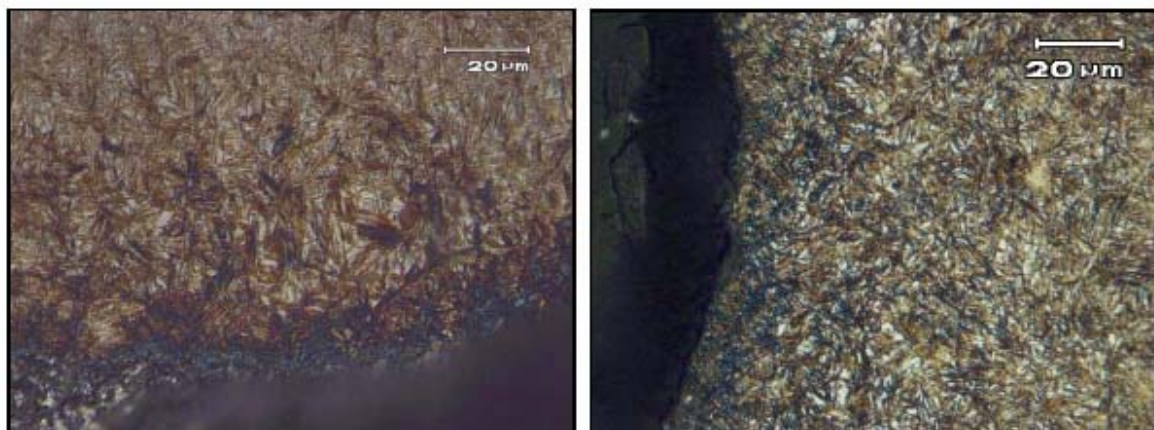


Figura 7. Micrografias mostrando presença de grande quantidade de austenita retida (fase branca) na camada cementada.

Ensaio de Microdureza

A mesma amostra utilizada para análise metalográfica foi usada para os ensaios de microdureza. Foi feito um perfil de dureza partindo-se do topo do dente em direção ao núcleo até a estabilização da dureza. O gráfico da Figura 8 mostra o resultado obtido. Observa-se uma dureza de superfície em torno de 730 HV e dureza de núcleo

em torno de 340 HV. Para uma dureza de limite de camada tomada como 500 HV, a profundidade de camada é em torno de 1,2 mm. Foram feitos também ensaios na superfície, perto do ponto de início da trinca, para averiguação de possíveis anormalidades de dureza, porém nada foi constatado. Para o ensaio utilizou-se escala Vickers de dureza e carga de 500gf.

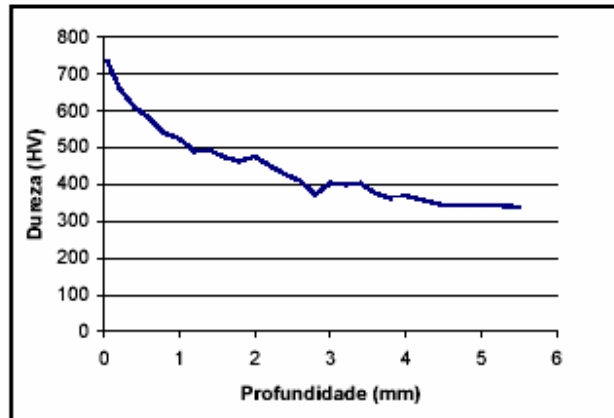


Figura 8. Perfil de microdureza.

Análise das Linhas de Fluxo

A análise foi realizada em uma amostra contendo seção transversal de dentes da engrenagem B. Para revelação das linhas de fluxo foi realizado ataque com reagente químico composto por água e ácido clorídrico em concentração de 10% do ácido. A Figura 8 mostra a morfologia das linhas observadas, indicando que a peça foi obtida a partir de um tarugo que sofreu pouco trabalho mecânico. Observamos também a tendência de ter se formado um fluxo assimétrico durante a deformação, o que poderia ocasionar dobras de forjamento.

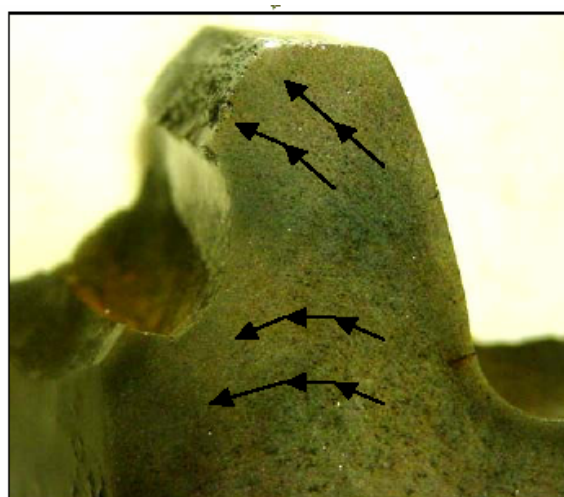


Figura 9. Imagem mostrando revelação das linhas de fluxo. As setas indicam fluxo assimétrico

DISCUSSÕES

A partir dos resultados obtidos das análises é possível concluir que a falha do sistema teve como início a ruptura de alguns dos dentes da engrenagem B. A seguir são expostos os motivos da ruptura destes e apresentado um esquema demonstrando a hipótese de seqüência de falha.

A presença de austenita retida na camada cementada, aliada com um desfavorável alinhamento das linhas de fluxo, foram fatores determinantes para a nucleação de trincas no flanco de alguns dentes da engrenagem B. A austenita é uma fase que apresenta baixas propriedades mecânicas e pode ser transformada em martensita por trabalho mecânico.⁽³⁾ Esta transformação é prejudicial, pois ocorre um aumento de volume e a fase obtida é uma martensita não revenida, que apresenta grande fragilidade. A morfologia desfavorável das linhas de fluxo gera o alinhamento de segregação e regiões de anisotropia, que são direções favoráveis à propagação de trincas. O tipo de alinhamento encontrado indica que a peça foi conformada a partir de um tarugo que sofreu pouco trabalho mecânico.

As Figuras 9, 10 e 11 mostram esquematicamente como seria a seqüência de falha. Após a nucleação, a trinca teria uma direção de propagação facilitada pelo alinhamento de segregação (Figura 9). As trincas teriam crescido por fadiga, resultante de esforços compressivos que geram tensões cisalhantes abaixo da superfície, até aproximadamente a raiz do dente. Após atingir uma região de menor tensão de contato (próximo a base do dente) a trinca teria propagado por esforços normais ao dente (flexão da parte lascada) emergindo para a superfície e criando a região de fadiga observada na base da lasca (Figura 10). Depois do lascamento ocorre diminuição da seção resistente do dente que passa a sofrer fadiga na raiz até a total remoção do dente (Figura 11).

Com grande quantidade de material solto no diferencial houve uma sobrecarga do sistema que apresentou então falha catastrófica.

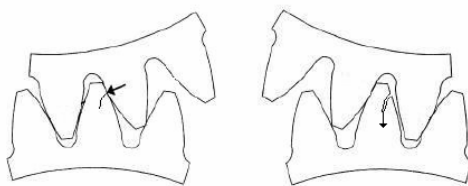


Figura 10. Imagens mostrando processo de abertura da trinca

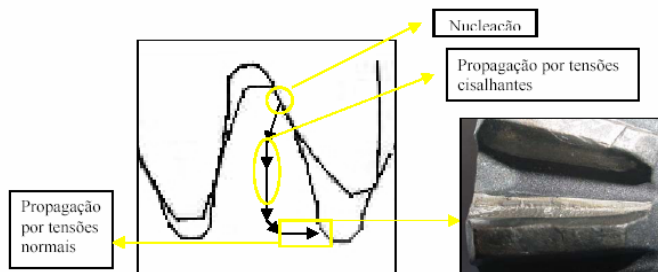


Figura 11. Esquema mostrando caminho percorrido pela trinca e fadiga observada em um dos dentes

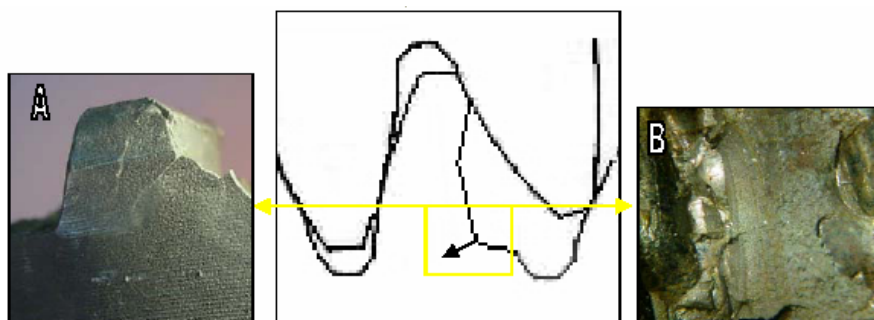


Figura 12. Após lascamento ocorre propagação por fadiga na região da raiz até a remoção do dente. Imagem A mostrando propagação da trinca. Imagem B mostrando fadiga observada em um dente arrancado.

CONCLUSÕES

A falha foi por fadiga nucleada no flanco dos dentes devido ao excesso de austenita retida do tratamento térmico.

Fatores como a baixa deformação plástica (evidenciada pela presença de porosidades não caldeadas) e fluxo assimétrico de forjamento facilitaram a propagação de trincas (lascamento dos dentes) levando ao colapso do sistema.

REFERÊNCIAS

- 1 <http://www2.uol.com.br/bestcars/ct/difer.htm>
- 2 ASM – Metals Handbook - **Failure Analyses and Prevention**, Vol 11, 9 ed. , 1992
- 3 ASM – Metals Handbook – **Fatigue and Fracture**, Vol 19, 1996