

UMA ABORDAGEM DE TRIBOLOGIA. ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS E CONDIÇÕES EM QUE OCORRE O DESGASTE EM ENGRENAGEM PLANETÁRIA

Matheus Silva Leal, leal.matheus12@gmail.com

Centro Universitário Anhanguera de Niterói, Avenida Rio Branco, 123, Centro, Niterói, Rio de Janeiro, 24020-000

Resumo: *Esse artigo apresenta uma abordagem dos conceitos tribológicos aplicados em uma pesquisa experimental voltada para a análise metalográfica, e também para a qualificação dos materiais empregados na fabricação e nos tratamentos térmicos pertinentes às engrenagens epicicloidais, tendo como propósito a necessidade de conhecer as principais causas das constantes falhas operacionais neste elemento. Com o intuito de identificar as principais características dos desgastes inerentes aos elementos mecânicos, esse artigo tem como fundamento os princípios da Tribologia, ciência que estuda a interação das superfícies e os desgastes nos elementos mecânicos, com o objetivo principal de criar meios para que estes desgastes sejam atenuados. A coleta dos dados necessários para a elaboração desta pesquisa foi efetuada através do estudo da literatura aplicável, das análises metalográficas, e das fraturas de engrenagens, levando em consideração as condições de interação e desgaste dos referidos elementos com os princípios tribológicos aplicados a eles. Considerando-se que o desgaste referencial é um processo inerente ao trabalho de máquinas, equipamentos e seus elementos mecânicos e que, dada a necessidade de se entender como o desgaste pode atuar e quais são as causas das falhas precoces geradas por ele nestes elementos, buscou-se analisar os diferentes aspectos relevantes, de modo a mitigar estas falhas. É possível notar que máquinas e equipamentos portadores de engrenagens planetárias em seus conjuntos mecânicos, estão constantemente em manutenção corretiva, devido às falhas precoces nestes elementos. Uma vez que existe a necessidade de atuar no manutenção dos elementos mecânicos, os estudos da Tribologia avançam de forma rápida para obter resultados melhores e mais precisos em suas pesquisas, fazendo com que novas áreas, dentro da referida ciência, sejam criadas. Sendo assim, este artigo busca descrever como os princípios tribológicos têm atuado no avanço das tecnologias de manutenção dos componentes mecânicos, e quais são as perspectivas de progressão para o processo de melhoria contínua dos procedimentos de manutenção. Desta forma, entender as causas dessas falhas, aplicar os conceitos de mitigação da Tribologia, conhecer os materiais corretos e os tratamentos térmicos pertinentes, são passos primordiais para sanar estas falhas, de modo a evitar manutenções corretivas e quebras precoces de componentes mecânicos.*

Palavras-chave: *desgaste, engrenagem planetária, engrenagem epicicloidal, atrito, tribologia.*

1. INTRODUÇÃO

Kato (2007) descreve que Tribologia é a ciência que estuda o desgaste em componentes mecânicos, que tem a finalidade de entender suas causas e mitigar seus efeitos, fazendo com que haja um dimensionamento correto destes componentes.

A constante necessidade de criar áreas que estudassem o desgaste e a interação entre os conjuntos mecânicos, fez com que diversas tecnologias fossem criadas para auxiliar neste entendimento. Antes dos avanços tecnológicos da Revolução Industrial, máquinas e equipamentos não possuíam métodos eficazes para preservar seus componentes de danos, permitindo que as falhas fossem constantes e atingissem partes importantes dessas máquinas como os trens de engrenagens.

As engrenagens são dispositivos que possuem a função de transmitir rotações para atenderem às necessidades dos conjuntos mecânicos em seus ciclos dinâmicos. Toda e qualquer engrenagem conta com parâmetros específicos a serem seguidos durante sua fabricação e utilização, e por conta disso, falhas acarretadas pelo mau dimensionamento dessas engrenagens podem causar prejuízos expressivos aos equipamentos e às indústrias.

Em virtude das inovações tecnológicas, as ciências tribológicas passaram por atualizações e adequações devido às novas exigências. O uso das engrenagens se iniciou na Pré-história, evoluindo, com o passar do tempo, para as engrenagens industriais que temos hoje. Mesmo que de modo arcaico, estes dispositivos desempenhavam funções específicas de transmitir torque e velocidade angular dentro das suas aplicações. Ao longo do tempo e com o início da implementação tecnológica e industrial, as engrenagens primitivas foram sendo aprimoradas, de maneira a possibilitar

seu uso nas máquinas e equipamentos durante a Revolução Industrial. Sendo assim, com a evolução das técnicas de fabricação, foram adquiridos conhecimento e experiência para a criação de parâmetros a serem utilizados na fabricação das engrenagens, de modo a torná-las úteis nas indústrias e máquinas. Norton (2013) mostra que foi apenas na Revolução Industrial que as máquinas demandaram e que as técnicas de manufatura permitiram a criação de engrenagens como hoje são conhecidas, com dentes especialmente moldados ou cortados em um disco de metal.

Considerando que as engrenagens podem ser utilizadas em várias aplicações mecânicas, e que existem diversas necessidades específicas para atendimento às particularidades dos mecanismos, foi necessária a criação e ampliação dos tipos deste componente. E assim como os demais elementos de máquinas, as engrenagens também são classificadas de acordo com a função que desempenham nos conjuntos mecânicos, sendo as mais comuns: a engrenagem reta, a engrenagem helicoidal, a engrenagem cônica, a engrenagem rosca sem fim, a engrenagem hipóide e a engrenagem planetária, que será objeto de estudo deste trabalho.

Para estudar corretamente as engrenagens dentro dos princípios tribológicos, devem ser tomadas como referência as características tecnológicas que são aplicáveis a sua utilização. Assim como em qualquer outro conjunto de engrenamento, as engrenagens planetárias precisam ser muito bem dimensionadas, de modo a evitar o desgaste precoce das partes que estão expostas ao atrito. Frequentemente, conjuntos de transmissão por engrenagens sofrem falhas imaturas, acarretadas pelo mau dimensionamento dos seus dentes. Neimann (1971) discorre que o conhecimento das possíveis avarias dos dentes e de suas causas é essencial para a conformação adequada, para a escolha do material e para o cálculo de uma transmissão por engrenagens.

Estudos avançados conseguem determinar e prever, através de cálculos e projetos, os pontos e as partes das engrenagens que sofrem os maiores esforços e, consequentemente, o maior desgaste. Um dos avanços que podem ser observados, em virtude do crescimento da tecnologia para o campo da Tribologia, é a utilização do método de análise e estudo por elementos finitos, que determina, de forma infinitesimal, o local onde o maior esforço é aplicado, de acordo com a interação das superfícies dos elementos mecânicos.

Na figura 1, onde pode ser observada a aplicação do método de análise por elementos finitos às engrenagens, é possível constatar a coloração vermelha, onde os esforços atuantes são maiores.

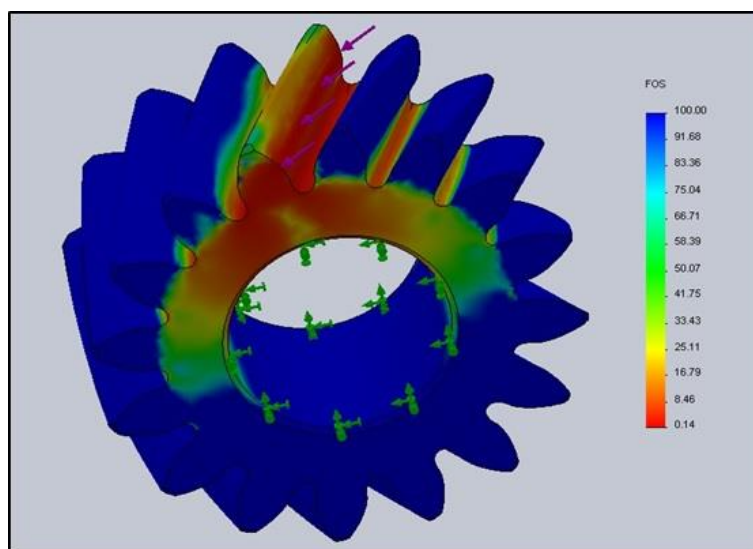


Figura 1. Análise por elementos finitos

As engrenagens estão sujeitas a todas as categorias de falhas, assim como em qualquer outro componente mecânico, porém existem diversas variáveis que tornam a sua inspeção e análise uma das mais criteriosas. Desta forma, alinhar os fundamentos tribológicos com os dados coletados na pesquisa experimental, permitiu o melhor entendimento dos desgastes inerentes aos conjuntos mecânicos e, principalmente, das falhas e desgastes precoces nas engrenagens planetárias.

Enquanto o estudo da Tribologia possibilitou a compreensão sobre os três princípios tribológicos mais importantes (atrito entre corpos que estão em contato, desgaste como efeito natural, e a lubrificação como um meio para minimizar o efeito do desgaste e do atrito), a aplicação da análise metalográfica com a pesquisa experimental, teve como intuito verificar e obter resultados reais de como esses princípios atuam em um componente mecânico.

2. PRINCÍPIOS DA TRIBOLOGIA

O contato superficial entre dois corpos em movimento relativo é um fenômeno considerado comum, e graças ao contato e à fricção entre as partes de um sistema, os movimentos mecânicos são transmitidos ou transformados em rotações. A atuação do atrito permite que o freio acione a parada de uma roda, mas também faz com que precisemos trocar periodicamente as pastilhas de freio do carro ou as solas dos sapatos desgastados pela fricção. Além disso, a

fricção intervém nos processos de moldagem de peças metálicas exercendo um efeito negativo, de forma a reduzir a área de contato dessas peças. Quando são observadas em escala microscópica, as superfícies metálicas não são tão lisas quanto parecem a olho nu, uma vez que elas apresentam rugosidade e vales, elementos de grande relevância durante o estudo tribológico.

Para reduzir o atrito entre as peças metálicas é necessário adicionar lubrificantes, que são substâncias, geralmente orgânicas, que formam um filme na superfície dos componentes mecânicos, cujo objetivo é reduzir o contato entre as asperezas. A Tribologia é uma área de conhecimento multidisciplinar que requer contribuições da Química de Superfícies, da de Materiais e da Engenharia Mecânica.

De acordo com estudos realizados, as perdas de um país industrializado devido ao desgaste e à corrosão de materiais, alcançam 4,5% do Produto Nacional Bruto (PNB). Os fabricantes de automóveis, a indústria aeroespacial, os construtores de máquinas e os produtores de biomateriais, devem garantir que seus componentes não só tenham o melhor desempenho, mas também que sejam confiáveis e duráveis. Novos materiais com melhores propriedades tribológicas contribuirão também para proteger o meio ambiente, reduzindo o consumo de matérias-primas e o uso de lubrificantes altamente poluentes.

Um dos principais objetivos do estudo da Tribologia nas práticas da Engenharia é a análise do desgaste referencial, e ambos estão diretamente ligados aos três principais fundamentos tribológicos: atrito, lubrificação e desgaste.

2.1. Conceitos Do Atrito

De acordo com Corradi *et al.* (2010), atrito é uma força que aparece sempre que duas superfícies estão em contato e há a tendência de movimento relativo elas. Sendo assim, o conceito de atrito diz respeito à obstrução ou à restrição ao movimento relativo entre as superfícies de corpos que estão em contato.

Mesmo que em muitos casos a sua aplicação seja prejudicial, podem ser observadas diversas formas em que o atrito atuante entre superfícies passa a ser benéfico. Vale ressaltar que sem o atrito não seria possível ter a interação entre os conjuntos mecânicos, a locomoção dos automóveis e também impossibilitaria o simples deslocamento das pessoas. No estudo teórico do atrito, pode ser observado que ele se divide em: atrito estático e atrito dinâmico.

O atrito estático está presente em corpos que estão em repouso, e desta forma chama-se força de atrito estático, a força que se opõe ao início do movimento relativo entre duas superfícies. Esse tipo de atrito pode ser observado no momento em que uma pessoa tenta iniciar o movimento em um objeto, tracionando-o com uma corda, e neste caso, a força de tração da corda é igual à força de atrito, o que acaba anulando as duas e fazendo com que não haja movimento relativo entre o objeto e a superfície.

Como não tem um valor fixo, a força de atrito estático sempre dependerá diretamente da força que é aplicada a fim de retirar o objeto do repouso. Vale lembrar que a força de atrito não aumenta infinitamente, uma vez que ela tem um limite que separa a indicação de atrito estático e dinâmico. A força de atrito pode ser calculada de acordo com a Eq. (1), expressa abaixo:

$$F_{at} = \mu E \cdot FN \quad (1)$$

Onde:

F_{at} : Força de atrito estático

μE : Coeficiente de atrito

FN : Força normal

Diferentemente da força de atrito estático, a força de atrito dinâmico surge em corpos que estão em movimento, e vale ressaltar também que a força de atrito dinâmico será sempre inferior à do atrito estático. A equação matemática para a identificação do atrito dinâmico é a mesma descrita para o atrito estático, conforme observado na Eq. (2), e o que vai diferenciar os valores numéricos entre os dois tipos de atrito será o valor da constante, visto que ela terá, a partir do atrito dinâmico, um valor fixo que se manterá constante independente da força aplicada sobre os corpos em movimento.

$$F_{at} = \mu E \cdot FN \quad (2)$$

2.2. Princípios Da Lubrificação

A interação entre os lubrificantes e as superfícies mecânicas que estão em contato, é um fator essencial para que o processo de atrito e desgaste seja atenuado. A composição química e as propriedades mecânicas da camada de reação formada pela atuação dos lubrificantes, influenciam decisivamente no processo de preservação e diminuição dos riscos de falhas precoces dos conjuntos mecânicos.

Um dos principais objetivos da lubrificação em conjuntos mecânicos, assim como nos trens de engrenagens planetárias, é a diminuição do atrito entre as partes que compõem o equipamento. Dessa forma, no projeto de lubrificação de máquinas e conjuntos mecânicos, torna-se necessário o total conhecimento sobre: os atritos inerentes ao processo, as técnicas de lubrificação, a composição dos materiais que fazem parte do conjunto estudado e, principalmente, os métodos de utilização do equipamento.

Vários são os fatores que interferem na identificação e escolha do lubrificante a ser utilizado, e as empresas que definem e fabricam os lubrificantes, através dos seus departamentos técnicos, possuem capacidade de determinar os lubrificantes corretos para utilização em todas as necessidades, de acordo com a aplicação e função dos conjuntos estudados.

Uma característica muito importante que sempre deverá ser considerada no projeto de um sistema de lubrificação é a viscosidade do lubrificante que será utilizado. A escolha e a aplicação dos lubrificantes estão diretamente ligadas à viscosidade e às condições de temperatura desse produto, visto que sempre haverá alteração na viscosidade do lubrificante quando ocorrerem variações de temperatura (quando aumenta a temperatura, a viscosidade diminui, e vice-versa).

Em consonância com os princípios tribológicos, a lubrificação é um dos principais métodos de mitigação de falhas em componentes mecânicos. Como o atrito entre as superfícies de contato não pode ser evitado, diversos novos tipos de lubrificantes estão sendo estudados e elaborados com o intuito de melhorar a durabilidade dos conjuntos mecânicos.

2.3. Fundamentos Do Desgaste

De acordo com Zum Gahr (1987), o desgaste pode ser brevemente classificado como mecânico, químico e térmico, sendo os mecanismos do desgaste mecânico classificados em cinco importantes categorias: abrasivo, erosivo, adesivo, fadiga e desgaste corrosivo.

Como o desgaste é a maior causa de perda de características tecnológicas e propriedades mecânicas, qualquer estudo e iniciativa para redução do desgaste é de suma importância, visto que com essa redução é possível, inclusive, prevenir a falha de máquinas e equipamentos.

No estudo da Engenharia de Materiais, o desgaste pode ser considerado como a deterioração da superfície de um componente, porém, muitas das vezes essa deterioração não pode ser identificada no campo visual humano, sendo necessária uma abordagem microestrutural e topográfica.

O estudo do desgaste será restrito a materiais metálicos e ligas ferrosas, visto que o fundamento deste trabalho está diretamente ligado ao estudo das condições de desgaste em engrenagens planetárias, não abrangendo o desgaste em materiais cerâmicos, polímeros e compósitos.

3. NANOTRIBOLOGIA

O recente aparecimento e proliferação de tecnologias para aproximação de imagens e também de técnicas para simulação de interações entre superfícies, permitiram investigações de alta resolução para problemas interfaciais, bem como formas de modificar e manipular nanoestruturas. Esses avanços proporcionam o progresso para a pesquisa visando o desenvolvimento de uma compreensão fundamental da natureza e consequências das interações entre o material na escala atômica, onde é possível especificar o material correto para as aplicações tecnológicas. Em suma, essas novas tecnologias levaram ao aparecimento de um novo campo da área tribológica, a Nanotribologia.

O campo geral da Tribologia cresceu rapidamente nos últimos 50 anos, mas enquanto a Tribologia convencional, que auxiliou no conhecimento geral desta ciência, está atualmente estabilizada, a Nanotribologia está evoluindo, de forma que esperara-se que ela passe a ocupar o centro de estudos na próxima década, uma vez que novos materiais são necessários, e seu desenvolvimento exige uma compreensão fundamental dos processos tribológicos.

O avanço, nos últimos anos, da Nanotribologia tem facilitado a obtenção de materiais com propriedades singulares e aplicações em múltiplas áreas. As matérias estruturadas em escala manométrica apresentam propriedades muito diferentes das que são vistas em sua configuração ordinária, já que os materiais em escala manométrica contém grãos ou partículas com um tamanho médio cem mil vezes menor que o tamanho normal.

4. PRINCÍPIOS TRIBOLÓGICOS APLICADOS ÀS ENGRENAGENS

De acordo com o estudo do desgaste referencial e da Tribologia em todas as superfícies que trabalham em contato, e com base na literatura estudada, foi possível obter o resultado de que todos os conjuntos mecânicos, assim como as engrenagens epicicloidais, sofrem um desgaste em sua superfície a cada ciclo de utilização podendo gerar danos e falhas de forma direta nelas mesmas.

Com a avaliação do desgaste aplicado às engrenagens, será possível conhecer e entender como a Tribologia atua nestes elementos, e quais são os tipos de desgastes que recaem sobre eles, para que, desta forma, seja possível aplicar o conhecimento adquirido na análise laboratorial.

Na avaliação do desgaste específico para engrenagens podem ser identificados os tipos de deterioração que têm estado em evidência na análise destes elementos. Desta forma, pode-se distinguir a avaria por ruptura e a avaria nos flancos, que serão detalhados a seguir.

5. AVARIA POR RUPTURA

5.1. Ruptura Violenta E Por Fadiga No Pé Do Dente

A ruptura violenta corresponde ao desgaste que ocorre devido às cargas bruscas nas engrenagens. Neste tipo de avaria ocorre a remoção total do dente a partir do pé do dente de uma engrenagem. Niemann (1971) descreve que para reduzir este tipo de falha, é necessário haver uma proteção contra sobrecargas ou realizar uma investigação prévia delas, de forma a considerá-las no cálculo dos valores admissíveis de carga. Com base na conclusão de Niemann a respeito da solução para rupturas no pé do dente de uma engrenagem, ratifica-se a importância da rigorosa execução do projeto destes elementos, de forma a abordar todas as possíveis sobrecargas e as condições de trabalho a que serão expostos, reduzindo, então, esta e qualquer outra falha.

Com relação à avaria por fadiga no pé no dente, esta falha ocorre devido às sobrecargas repetidas e superiores à resistência à fadiga da engrenagem. Niemann (1971) coloca que um dos principais motivos para esta falha é o uso de um módulo maior ou de maior ângulo de engrenamento de serviço (por deslocamento do perfil), e com base em sua descrição para os principais motivos desta falha, pode-se perceber a importância de realizar o dimensionamento correto e o projeto das engrenagens, onde devem ser consideradas todas as características tecnológicas necessárias para o correto funcionamento deste componente.

5.2. Ruptura De Canto De Dente

Esta falha está diretamente ligada a uma distribuição desigual da carga transmitida sobre a largura do dente, ou seja, ocorre quando há um desalinhamento entre os dentes das engrenagens que trabalham em conjunto. As características físicas das engrenagens que estão condicionadas a esta falha podem ser verificadas quando elas apresentam desalinhamentos axiais, erro na direção do dente ou deformação elástica.

5.3. Estilhaçamento Da Cabeça Do Dente

Esta falha ocorre geralmente em engrenagens temperadas, que passam a ter um grau menor de tenacidade e se tornam mais duras devido ao tratamento térmico realizado. Além disso, esse tipo de falha é mais encontrado em câmbios de automóveis, visto que essas engrenagens estão sujeitas a altos carregamentos com choques.

6. AVARIAS NOS FLANCOS

Não são somente as avarias por ruptura no dente de uma engrenagem que são importantes, os danos que comprometem o funcionamento do componente, ainda que não quebrem bruscamente o material, também são de suma relevância no âmbito da análise de falhas e condições de desgastes.

6.1. Formação De Fissuras E Estrias Nos Flancos Dos Dentes

São produzidas, predominantemente, em aços de dureza excessivamente baixa. Esta falha pode causar desmoronamentos locais e rupturas nos pés dos dentes. De acordo com Shigley (1958), a solução para este tipo de falha depende das respectivas causas, que podem ser tratamentos térmicos defeituosos, fissuras de têmpera, fissuras de retífica ou defeitos do material.

6.2. Formação De Sulcos E Zonas De Engripamento

Esta falha é gerada pela ruptura repetida da película do lubrificante, onde é possível notar marcas de contato nas arestas dos dentes ao longo do início do engrenamento. Niemann (1971) ainda descreve que o emprego de um óleo mais viscoso resultará em melhores condições de trabalho e de mitigação para este tipo de falha, visto que criará uma película mais densa ao redor dos dentes das engrenagens. É notório que, de acordo com a literatura pesquisada, o estudo e a escolha do lubrificante correto a ser utilizado nestes elementos impactará diretamente a manutenção contra falhas.

6.3. Formação De Crateras (“Pitting” E “Cavitação”)

Esta classificação de falha é uma das mais encontradas nas engrenagens de transmissão de veículos, cubos de roda e diferencial, pois trata-se de uma espécie de desmoronamento na zona da circunferência de rolamento ou debaixo dela, em consequência de pressão local excessiva na presença de lubrificante. Distinguem-se as cavidades de amaciamento, semelhantes a cabeças de alfinete, que frequentemente aparecem durante o amaciamento e que não progridem quando esse melhora suficientemente a distribuição das pressões; e as cavidades ou crateras progressivas, que são produzidas por uma sobrecarga local contínua, durante um tempo que varia de 0,1 a 20 milhões de ciclos à plena carga, ocasionando desprendimentos progressivamente maiores e mais numerosos nos flancos. Na figura 2, é possível identificar a formação de cavidades nos flancos de uma engrenagem de transmissão de turbina de aço beneficiado e de dentes inclinados.

A cavitação durante o rolamento deve ser interpretada como um fenômeno de fadiga, no qual, além de ser ultrapassada a alta pressão nas fissuras capilares, ainda ajuda a arrancar fragmentos do material.



Figura 2. Pitting em engrenagens

7. DEFINIÇÕES

Antes de descrever os procedimentos adotados na análise laboratorial, uma revisão bibliográfica, introdutória e sintética sobre este assunto se faz necessária, para facilitar o entendimento do que será descrito e analisado nesta pesquisa.

7.1. Estudo Por Metalografia

Metalografia é o estudo da morfologia e estrutura dos metais, uma área da Materialografia que além do estudo dos materiais metálicos, compreende a Plastografia (materiais plásticos ou poliméricos) e a Ceramografia (materiais cerâmicos).

Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar a área de interações entre os diferentes elementos que compõem o metal.

Essa análise é feita em um microscópio com aumentos de, normalmente, 50X, 100X, 200X, 500X, 1000X, 1500X e 2500X. Esses tipos de microscópios são conhecidos como “microscópios metalográficos” ou “microscópios metalúrgicos”, e possuem baixo campo focal, permitindo apenas a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas. Em razão disto, a preparação metalográfica tem grande importância na qualidade de uma análise. Além disso, em geral, esse tipo de microscópio possui um sistema de fotografia integrados, que permite o registro das análises realizadas.

7.2. Tratamento Térmico Por Cementação

Cementação é o tratamento termoquímico que consiste em introduzir carbono na superfície do aço pelo mecanismo de difusão atômica, com o objetivo de aumentar a dureza superficial do material depois de, convenientemente, temperado. Quando o ferro ou o aço é rapidamente resfriado por têmpera, o maior teor de carbono na superfície exterior torna esse material duro, através da transformação da austenita em martensita, enquanto o núcleo permanece macio e resistente como uma microestrutura ferrítica e/ou perlita.

7.3. Microestruturas Compostas Por Ferrita E Perlita

A ferrita e a perlita são elementos microconstituintes do aço. Mesmo que os microconstituintes variem de acordo com o tipo de liga analisada, e de acordo com os tratamentos térmicos, tratamentos mecânicos, processos de fabricação e outros processos que o material tenha sido submetido, nas amostras analisadas, as principais microestruturas são: perlita e ferrita.

8. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No intuito de conhecer a microestrutura das amostras de engrenagens, e também de estudar os princípios tribológicos aplicados a elas, foram separadas três amostras distintas de dentes de engrenagens planetárias para a execução da análise metalográfica, que será dividida nas seis principais etapas descritas abaixo:

8.1. Corte E Embutimento Metalográfico

A amostra analisada foi cortada, de forma a não sofrer alterações em sua microestrutura pelo processo de corte, e o dente da engrenagem foi segregado, como a porção aproximada que será analisada. Na sequência foi utilizado um equipamento denominado “cortadora metalográfica”, para efetuar um corte mais preciso, utilizando um disco fino e abrasivo, e uma farta refrigeração com uma mistura de lubrificante e água, a fim de não provocar modificações na microestrutura pelo aquecimento gerado.

Para o processo de embutimento foi utilizado o método de “embutimento a quente”, método este que faz uso de baquelite e uma embutidora metalográfica, equipamento que, com a variação da temperatura e pressão interna, faz com que a amostra seja embutida no baquelite, permitindo assim obter melhores resultados na Metalografia.

8.2. Lixamento E Polimento

O processo de lixamento tem por objetivo deixar a superfície a ser analisada o mais plana possível e sem rugosidades. Uma das características da análise metalográfica é a necessidade de que a face da amostra esteja com a menor taxa de imperfeições. Por isso as amostras analisadas foram lixadas com auxílio de equipamentos denominados “politriz metalográfica”, que utilizam lixas com granulometria 400 e 600, e que tem por intuito retirar as maiores imperfeições das amostras.

O polimento consiste na obtenção de uma superfície isenta de risco e uma imagem clara ao microscópio. Para isto, o processo envolve o uso de material com granulação cada vez maior, para que o produto final esteja o mais polido possível, aplicado com o auxílio de uma politriz. A etapa final corresponde ao acabamento final nas superfícies das amostras, que é feito com o uso da “politriz metalográfica” com pano especial para polimentos e pasta de diamante.

8.3. Ataque Químico E Verificação Microscópica

Todas as amostras, a saber, as de número 1, 2 e 3, foram submetidas a um Ataque químico Químico de Nital (solução de ácido nítrico a 1% em álcool etílico) a 3%, e após isso, as amostras apresentaram evidências dos contornos da camada cementada, conforme pode ser verificado na fig. 3. Na Metalografia, o processo de Ataque Químico tem por intuito revelar os tratamentos térmicos que estão presentes no material a ser analisado, e é feito agitando-se a superfície polida, mergulhada no reativo que foi posto em um pequeno recipiente. A duração do ataque depende da concentração de reativo e da natureza e textura da amostra, mas em média, para o ferro fundido e aços comuns, dura de 5 a 15 segundos. Após o ataque lava-se imediatamente a superfície atacada com álcool, e em seguida efetua-se a secagem, passando-se primeiramente um pequeno chumaço de algodão umedecido com álcool e depois um jato de ar quente na superfície.

A constatação da camada cementada nas amostras analisadas aponta para um aço de baixo carbono, o que foi confirmado no exame microscópico. A cementação tem por função aumentar a dureza na camada superficial dos elementos mecânicos, ou seja, que após a têmpera e o revenimento, apresentem na camada superficial uma dureza mais elevada do que a do núcleo, assim como acontece nas amostras das engrenagens analisadas.

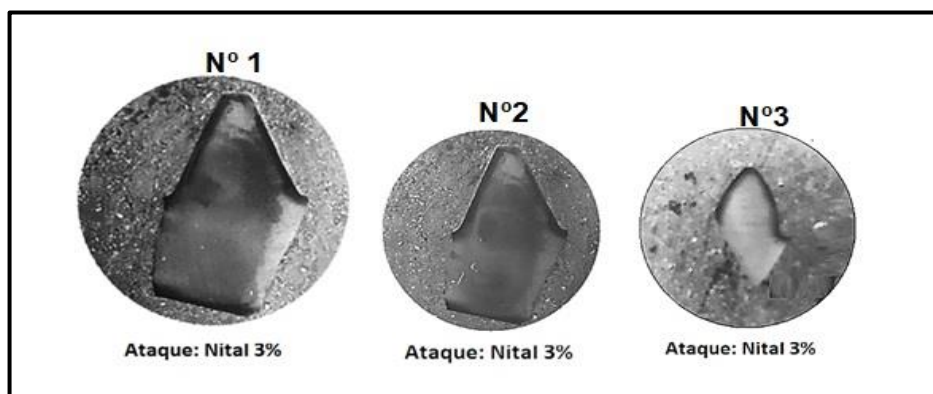


Figura 3. Amostras após ataque químico

Na micrografia, observou-se uma base de ferrita com presença de perlita, estruturada sobre ela. Esses elementos são evidências de um aço de baixo teor de carbono. Tomando-se pela estruturação da perlita, atribui-se a forte presença de elementos de liga, o que nos leva a concluir que se trata de um aço ABNT 8620 ou 4320. Na figura 4, pode ser observada a estruturação da ferrita e a perlita juntamente com a camada de transição entre a área cementada e não cementada.

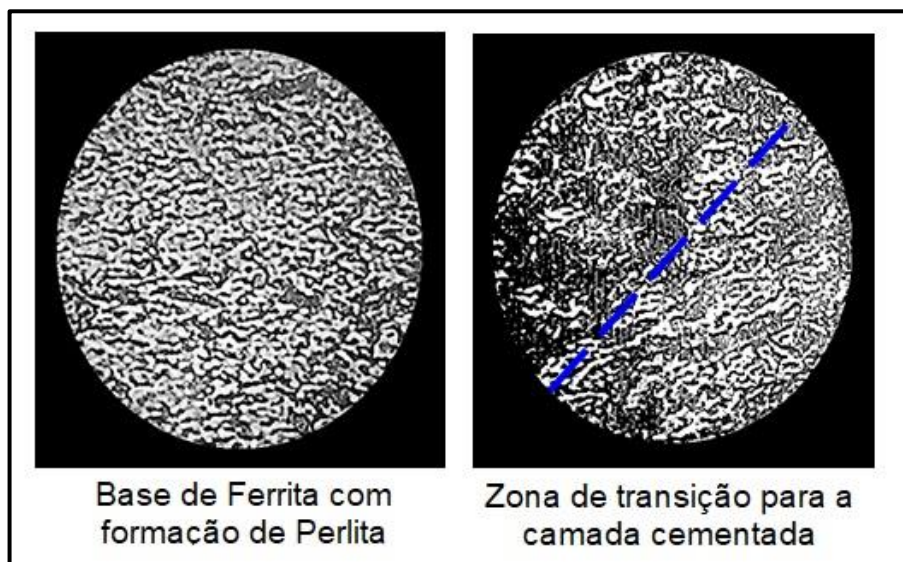


Figura 4. Análise microscópica

Existem diversas classes de aços para as diferentes aplicações na construção mecânica. Os aços chamados de baixo carbono, assim como os identificados nas amostras analisadas, são os que têm teor de carbono menor que 0,3 %, além de estrutura usualmente ferrítica e perlítica, assim como as amostras analisadas. Uma das diferenças importantes entre os aços carbono e os demais tipos, é a não existência de uma grande quantidade de elementos de liga em sua composição, já que os aços carbono possuem somente elementos residuais.

Na tab. 1 podem ser observadas as diferenças de composição entre os aços identificados nas amostras.

Tabela 1. Tabela de composição química para aço 8620 e 4320

Aços	Composição química								Características	Aplicações
	C %	Si%	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %		
4320	0,20	0,25	0,55	0,035	0,04	0,50	1,50	0,25	Boa forjabilidade e soldabilidade, e má usinabilidade	Pinhões, componentes de máquinas, engrenagens, etc.
8620	0,25	0,22	0,80	0,035	0,04	0,50	0,55	0,20	Aço com boa temperabilidade e usinabilidade, além de ótima forjabilidade e soldabilidade	Quando se deseja endurecimento superficial por cementação ou carbonização.

Além de analisar a microestrutura do aço utilizado e as condições de utilização do componente mecânico, a análise e a investigação da fratura também são métodos de suma importância para a identificação da causa raiz da falha. A fadiga de materiais mecânicos, na maioria das vezes, não ocorre repentinamente, já que é necessário que haja um processo de formação e propagação da trinca até a ruptura catastrófica do componente. Na figura 5 pode ser observada a fratura da engrenagem analisada, onde é possível constatar as ondas características da fadiga à flexão por sobrecarga.

Algumas teorias de acúmulo de danos por fadiga partem do pressuposto de que, quando um aço é submetido a uma tensão alternada superior ao Limite de Resistência à Fadiga estabelecido para este aço, ocorre uma alteração das suas propriedades mecânicas. Vários trabalhos (Henry, 1955; Gatts, 1961 e Yang *et al.*, 1997) mostram que, ao se submeter um aço a tensões sequenciais crescentes ou decrescentes maiores que o Limite de Resistência à Fadiga, este limite se altera de forma distinta.

Na curva “Tensão x Deformação”, resultante do ensaio de tração, pode-se observar o comportamento da resistência à fadiga com a resistência mecânica intrínseca do material. Uma característica importante dos materiais usados em engrenagens é o grau de pureza, pois a presença de inclusões pode ser altamente danosa quando submetida aos campos de tensões que ocorrem no contato entre os dentes das engrenagens. Uma inclusão pode atuar como um concentrador de tensões e se tornar um núcleo para progressão de trincas e o início da fadiga.



Figura 5. Fratura do dente da engrenagem analisada

9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

É notório que, de acordo com a literatura pesquisada, todos os desgastes apresentados para as engrenagens estão diretamente ligados à execução de um ótimo projeto de dimensionamento e atendimento às especificações da Tribologia. De acordo com o estudo da amostra analisada, foi possível entender e conhecer a causa raiz para as principais falhas precoces em engrenagens planetárias, e identificar que, não só os materiais utilizados nas três amostras analisadas são aços com especificações corretas para a aplicação designada, mas também que eles possuem os tratamentos térmicos pertinentes às suas utilizações.

Além disso, foi possível concluir ainda que as fraturas são oriundas de sobrecargas aplicadas ao conjunto mecânico, e que estas são uns dos principais motivos causadores das falhas por ruptura em dentes de engrenagens.

Com este trabalho foi possível inferir que os princípios de estudo da Tribologia são os principais auxiliares no que tange à mitigação do desgaste dos componentes mecânicos, e que os mesmos devem ser conhecidos, estudados e aplicados de forma rígida nos processos de manutenção dos equipamentos. Desta forma, foi possível demonstrar os métodos de mitigação de falhas precoces nas engrenagens e também processos de manutenção preventiva e preditiva, que tem o intuito de minimizar as referidas falhas. Além dos métodos de diminuição do atrito, que incluem principalmente a lubrificação, existem métodos de manutenção preventiva e preditiva, que têm como objetivo analisar periodicamente as condições dos elementos mecânicos e seus lubrificantes, de forma a identificar antecipadamente uma possível falha e efetuar a substituição, antes mesmo que venham a quebrar.

Através desta pesquisa também foi possível entender e conhecer a aplicação do desgaste referencial dedicado à interação dos conjuntos mecânicos, e em particular as engrenagens planetárias. Com isso, foi possível concluir que o desgaste e a deterioração de elementos de máquinas tem sido um dos motivos para que máquinas e linhas de produção estejam, de maneira recorrente, em manutenção corretiva.

10. TENDÊNCIAS

Os princípios tribológicos, assim como as técnicas de análise metalográfica, estão em constante evolução e possuem uma perspectiva de avanço tecnológico a médio e longo prazo. A criação de novas tecnologias tem permitido a evolução nos processos de avaliação dos desgastes inerentes ao contato superficial nos elementos mecânicos, e esta evolução pode ser observada na ampliação da área de estudo da Tribologia, que nos últimos anos passou a permitir, através da Nanotribologia, a avaliação de partículas 100 vezes menores que as normais, de forma a permitir uma precisão maior para as avaliações.

Como o desgaste e o atrito entre as superfícies que trabalham em contato são inevitáveis, laboratórios e engenheiros que atuam nos processos de melhoria contínua dos princípios tribológicos, estão desenvolvendo lubrificantes e outros meios de mitigação dos danos causados pelo atrito para cada aplicação em particular. Podemos observar essa evolução no crescimento de especificações de lubrificantes e, principalmente, na inserção de aditivos beneficiadores para diversas aplicações. Lubrificantes para altas velocidades, para componentes com altos impactos, entre outros, são exemplos de novos lubrificantes que, principalmente em relação aos seus aditivos, têm atuação direta para diminuição particular do desgaste.

Existe uma tendência de evolução, para as próximas décadas, das tecnologias para aplicação nos conjuntos mecânicos. Além de ser necessário o estudo e a aplicação dos princípios tribológicos, é pertinente também atuar na

melhoria contínua dos tratamentos térmicos aplicados aos elementos mecânicos, visto que com a evolução destes processos será possível obter uma nova resistência para cada material.

11. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Centro Universitário Anhanguera de Niterói, que possibilitou e disponibilizou meios para que este artigo fosse ser executado, e também ao professor e orientador Eng. Laerte Correa, que foi o responsável por traçar uma linha de desenvolvimento e raciocínio para que este estudo pudesse ser executado.

O Autor agradece ainda aos amigos e familiares que auxiliaram e incentivaram o estudo e realização deste artigo científico.

12. REFERÊNCIAS

- Corradi, W. *et al.*, 2010, “Fundamentos de Física I”, Ed. UFMG, Belo Horizonte.
- Kato, Adach i., 2002, “Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook”, Ed. CRC Press LLC, Vol.2, Cap 22. Citado em: Alves 2007, Santos 2007, Bonetti 2007, Airolid 2007, “Tribologia, conceitos e aplicações”, p. 3, 2007.
- Niemann, G., 1971, “Elementos de máquinas”, Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 125 p.
- Norton, R.L., 2013. “Projetos de máquinas: Uma abordagem integrada”, 4ª ed, Ed. Porto Alegre, Bookman Editora Ltda, 54 p.
- Shigley, J.E., 1984, “Elementos de máquinas”, Livros Técnicos e Científicos. Brasil, Editora S.A, Rio de Janeiro, 230 p.
- Zum Gahr, K.H., 1987. “Microstructure and wear of materials”, Amsterdam: Tribology series-Elsevier, v.10, 560 p.

13. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho.

A APPROACH OF TRIBOLOGY. STUDY OF THE DISTRIBUTION OF FORCES AND CONDITIONS IN WICH WEAR OCCUS IN PLANETARY GEAR

Matheus Silva Leal, leal.matheus12@gmail.com

Centro Universitário Anhanguera de Niteroi, Avenida Rio Branco, 123, Niterói, Centro, Rio de Janeiro, 24020-000

Abstract. *This article presents an approach of the tribological concepts applied to an experimental research, being this research focused on a metallographic analysis and also for qualification of the materials used in the fabrication and in the heat treatments relevant to the epicycloidal gears, with the purpose of knowing as main causes of the constant operational failures in this element. In order to identify the main characteristics of the wear intrinsic to the elements mechanical, this article was based on the principles of the tribology, science that aims to study the interaction of surfaces and wear in the mechanical elements, with the main objective to create means for this wear to be attenuated. The collection of data needed to prepare this research, was carried out through the applicable literature, of metallographic analysis, and also from the analysis of fractures of gear, taking into account the conditions of interactions and wear of said elements, together with the tribological principles applied to them. The referential wear is an inherent process to the work of machines, equipment and their mechanical elements, and due to of the need to understand how wear can act on these elements, and also what are the causes of the failures generated by the same, we sought to analyze the different relevant aspects in order to understand and mitigate these failures. It is possible to note that machines and equipment which have planetary gears in their mechanics assemblies. Since there is a need to work on the maintenance of the mechanical elements, tribology studies are advancing rapidly to obtain better and more accurate results in their research, thus creating new areas within this science to be created. Thus, this article sought to describe how the tribological principles have acted in the advancement of mechanical components maintenance technologies, as well as the progression perspectives for the process of continuous improvement of maintenance procedures. In this way, understanding the causes of these failures, applying the concepts of tribology mitigation, knowing the correct materials and the pertinent thermal treatments, are primordial steps to mitigate and treat these faults, in order to avoid corrective maintenance and early breaks of mechanical components.*

Keywords: wear, planetary gear, epicyclic gear, friction, tribology.