



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO PEDRO SANTANA COSTA

ANÁLISE DO DISPOSITIVO MECÂNICO DIFERENCIAL

JOÃO PESSOA

2019

JOÃO PEDRO SANTANA COSTA

ANÁLISE DO DISPOSITIVO MECÂNICO DIFERENCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso que apresento a Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Siderley Fernandes Albuquerque.

JOÃO PESSOA
2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C838a Costa, Joao Pedro Santana.
ANÁLISE DO DISPOSITIVO MECÂNICO DIFERENCIAL / Joao
Pedro Santana Costa. - João Pessoa, 2019.
48 f. : il.

Orientação: Siderley Fernandes Albuquerque.
Monografia (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. diferencial, engrenagens, diferencial aberto. I.
Albuquerque, Siderley Fernandes. II. Título.

UFPB/BC



AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

NOME João Pedro Santana Costa Matrícula _____

TÍTULO: Análise do dispositivo mecânico diferencial

AVALIAÇÃO

| | | NOTAS | | | |
|-------|--------------------------------|---------------------|------------|--------------|------------|
| | Nome | Rubrica | Monografia | Apresentação | Média |
| Prof. | <u>Siderley F. Albuquerque</u> | <u>[assinatura]</u> | <u>9,0</u> | <u>10,0</u> | <u>9,5</u> |
| Prof. | <u>Koji Daniel U. Mishima</u> | <u>Koji</u> | <u>9,0</u> | <u>10,0</u> | <u>9,5</u> |
| Prof. | <u>Robaul Inácio Coluít</u> | <u>[assinatura]</u> | <u>9,0</u> | <u>10,0</u> | <u>9,5</u> |

Média Final: 9,5

RESUMO

O equipamento que faz a conexão das rodas ao motor é uma peça no eixo traseiro (caso o veículo seja de tração traseira) chamado Diferencial, que distribui por igual o torque gerado pelo motor aos semieixos de transmissão. Neste trabalho tenta-se expor desde a ideia de criação do diferencial até seu funcionamento interno. Embora a criação do diferencial seja atribuída ao inventor francês Onesiforo Pecqueur em 1827 (chefe de oficina no Conservatório de Artes e Ofícios de Paris), a aplicação dele em um veículo a motor foi no início dos anos 1900. Basicamente todos os componentes do diferencial, exceto a caixa do diferencial, são algum tipo de engrenagem cônica. Um diferencial básico é composto por pinhão, coroa, engrenagens satélites, engrenagens planetárias e caixa do diferencial. Os veículos não esportivos utilizam de maneira geral o diferencial aberto. Este aplica o mesmo torque em ambas as rodas traseiras. Como todo conjunto mecânico o diferencial não está livre de problemas provenientes dos esforços gerados pela transmissão do torque do motor com o atrito entre as peças.

Palavras-chave: diferencial, engrenagens, diferencial aberto.

ABSTRACT

The equipment connecting the wheels to the engine is a part on the rear axle (if the vehicle is a rear wheel drive) called the Differential, which distributes the torque generated by the engine to the transmission axles equally. In this work we try to expose from the idea of creating the differential until its internal operation. Although the creation of the differential was attributed to the french inventor Onesiforo Pecqueur in 1827 (workshop manager at the Conservatoire des arts et des arts in Paris), his application in a motor vehicle was in the early 1900s. Basically all differential components, except the differential case, are some kind of bevel gear. A basic differential consists of pinion, crown, satellites, planetary gears and differential box. Non-sports vehicles generally use the open differential. This applies the same torque on both rear wheels. Like any mechanical assembly the differential is not free from problems arising from the efforts generated by the transmission of the torque of the motor with the friction between the parts.

Keywords: differential, gears, open differential.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Hornsby Tractors..... | 9 |
| Figura 2 - Eixo traseiro do Ford-T com o diferencial | 10 |
| Figura 3 - Componentes do diferencial..... | 11 |
| Figura 4 - Fundição em molde de areia..... | 14 |
| Figura 5 - Fundição em molde permanente metálico | 14 |
| Figura 6 - Metalurgia do pó | 15 |
| Figura 7 - Fresamento com caracol..... | 17 |
| Figura 8 - InvoMilling | 18 |
| Figura 9 - Power skiving..... | 19 |
| Figura 10 - Fresamento de disco..... | 21 |
| Figura 11 - Parte interna de um diferencial aberto | 23 |
| Figura 12 - Diferencial de deslizamento limitado..... | 25 |
| Figura 13 - Diferencial Torsen | 28 |
| Figura 14 - Helicoidal: as linhas de centro do pinhão e coroa coincidem..... | 30 |
| Figura 15 - Hipoidal: as linhas de centro não coincidem | 31 |
| Figura 16 - Pinhão..... | 33 |
| Figura 17 - Coroa | 34 |
| Figura 18 - Coroa e pinhão sem-fim..... | 35 |
| Figura 19 - Pinhão e coroa no diferencial..... | 37 |
| Figura 20 - Caixa do diferencial vazia e com engrenagens montadas | 38 |
| Figura 21 - Conjunto de engrenagens satélites e planetárias | 39 |
| Figura 22 - Trem planetário em funcionamento..... | 41 |
| Figura 23 - Pinhão e coroa desgastados..... | 43 |
| Figura 24 - Diferencial danificado..... | 44 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 7 |
| 2 BREVE HISTÓRIA DO DIFERENCIAL..... | 8 |
| 3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO..... | 10 |
| 3.1 Processos tradicionais..... | 12 |
| 3.2 Processos inovadores..... | 16 |
| 3.3 Acabamento de engrenagens..... | 21 |
| 4 VARIAÇÕES E APLICAÇÕES DO DIFERENCIAL..... | 22 |
| 4.1 Diferencial Aberto – Open..... | 22 |
| 4.2 Diferencial Auto bloqueante de embreagem – Sistema LSD..... | 23 |
| 4.2.1 Sistema LSD..... | 26 |
| 4.3 Diferencial Torsen – Sistema LSD..... | 26 |
| 5 COMPONENTES INTERNOS DO DIFERENCIAL..... | 29 |
| 5.1 Pinhão e coroa..... | 31 |
| 5.2 Caixa do diferencial..... | 37 |
| 5.3 Engrenagens satélites e planetárias..... | 38 |
| 6 PROBLEMAS NO DIFERENCIAL..... | 42 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 45 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 46 |

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho será dividido em 5 partes. Na primeira parte será feita uma abordagem de toda a história de idealização e criação do diferencial desde suas primeiras versões. Na segunda parte será abordado os processos de fabricação dos componentes do diferencial. A terceira parte irá abordar as variações de bloqueio do diferencial e suas aplicações. A quarta parte será abordado o funcionamento interno do diferencial, os mecanismos que ele utiliza para realizar a sua tarefa e como ele atua no automóvel. A quinta e última parte será abordado os problemas que podem ocorrer no diferencial.

Por meio deste trabalho e com alguma experiência adquirida pelo autor em projetos de extensão na área automotiva, busca-se fazer uma abordagem mais detalhada de um dispositivo mecânico tão importante no meio automobilístico como é o caso do diferencial, em que se tem pouca ou nenhuma abordagem mais profunda e detalhada na literatura nacional.

Em um automóvel com eixos transversais ao fazer uma curva seja ela mais ou menos acentuada deve-se levar em consideração que as rodas que realizam o trajeto externo da curva percorrem uma distância maior do que as rodas que realizam o trajeto interno da curva. Mas quando as rodas são ligadas ao motor através de um eixo sólido elas não podem girar separadamente, do surgimento desse problema os engenheiros criaram um dispositivo mecânico que liga as rodas ao motor sem que o veículo derrape ou patine nas curvas.

O equipamento que faz a conexão das rodas ao motor é uma peça no eixo traseiro (caso o veículo seja de tração traseira) chamado Diferencial, que distribui por igual o torque gerado pelo motor aos semieixos de transmissão, por consequência, movimenta as rodas traseiras em velocidades diferentes, permitindo a realização das curvas sem que o automóvel deslize no momento em que efetua a trajetória do percurso. A realização do trabalho do diferencial é feita por meio de engrenagens que permitem a distribuição do torque proveniente do motor para os semieixos traseiros dos carros.

Portanto, neste trabalho tenta-se expor desde a ideia de criação do diferencial até seu funcionamento interno e importância no projeto de veículos modernos.

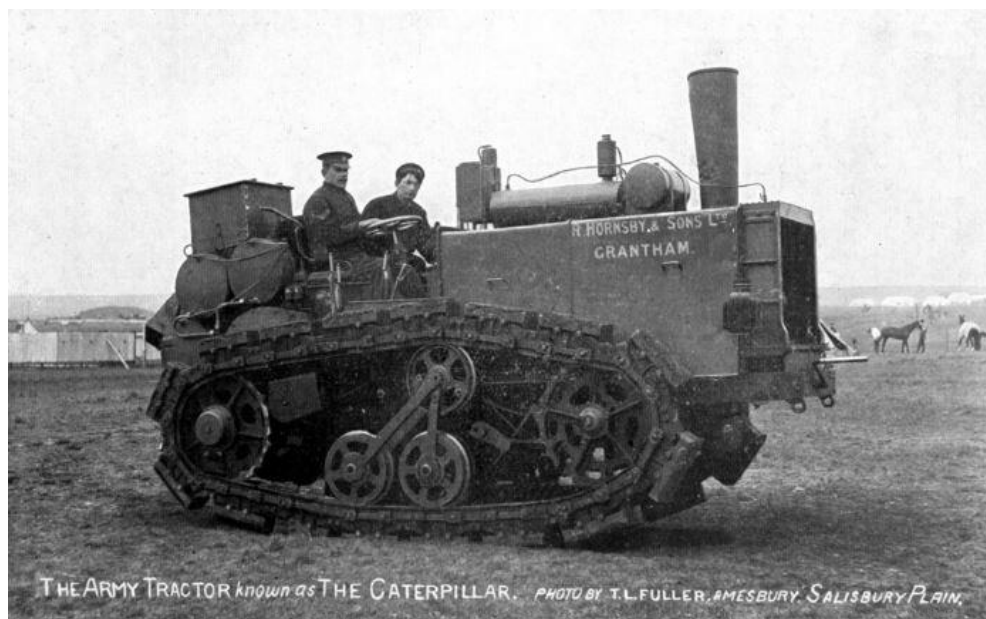
No senso comum é frequente a criação de mitos e superstições numa forma de buscar uma melhor maneira de entender o funcionamento de veículos sem que se tenha estudo prévio ou conhecimentos técnicos na área. A elaboração desse estudo fez-se da intenção de esclarecer e simplificar o funcionamento do dispositivo mecânico diferencial como uma forma de aproximar o público leigo ao meio automotivo.

2 BREVE HISTÓRIA DO DIFERENCIAL

Com o surgimento dos primeiros automóveis movidos a motor a combustão e com seu sucessivo desenvolvimento mecânico, foram surgindo carros com capacidade cada vez maior de atingir grandes velocidades. Os primeiros veículos quatro rodas populares da história, como exemplo o Ford T, criado pela *Ford Motor Company* empresa automobilística idealizada e criada por Henry Ford, atingia velocidade máxima de 75 km/h, um veículo com seu projeto já muito bem elaborado e bem aceito no mercado. Mas os primeiros protótipos de automóveis 4 rodas tinham apenas uma das rodas ligada ao motor, gerando excessivo trabalho naquela roda ligada.

Segundo (FLETCHER, 1983) embora a criação do diferencial seja atribuída ao inventor francês Onesiforo Pecqueur em 1827 (chefe de oficina no Conservatório de Artes e Ofícios de Paris), a aplicação dele em um veículo a motor foi no início dos anos 1900. Para minimizar o problema de excesso de esforço na roda ligada ao motor foi feita a conexão de duas rodas no mesmo sentido ao motor através de um eixo sólido, porém com um dispositivo mecânico ao meio do eixo chamado diferencial, que permite a distribuição por igual do torque gerado pelo motor e fazendo com que as rodas girem em velocidades diferentes na realização das curvas (CROLA, 2009). Foi com essa ideia que em meados de 1900 uma companhia agrícola britânica criou um trator com um dispositivo mecânico que permitia que as esteiras rolassem com velocidades diferentes no momento das curvas. Esse trator foi patenteado em 1905 pela *Hornsby in Grantham* como *Hornsby Tractors* para atender as necessidades do exército britânico na época (FLETCHER, 1983). Podemos ver na Figura 1 uma ilustração de como era o *Hornsby Tractors*.

Figura 1 - Hornsby Tractors



Fonte: <https://www.flickr.com/photos/jimmyfuller/5848847424> acesso em 12 de janeiro de 2019

Com o fim da Primeira Guerra Mundial e consequentes avanços tecnológicos da época como esforço para vencer a guerra, principalmente no que se tange a área automotiva, a indústria voltou-se no desenvolvimento dos automóveis para atender as necessidades do mercado civil (FLETCHER, 1983). Para (FLETCHER, 1983) o desafio agora era adaptar as invenções da guerra para a população civil e as dimensões do diferencial primitivo não comportavam confortavelmente em um carro popular. Com a produção em massa de automóveis no começo do século XX, a ligeira adaptação do diferencial, que outrora era feito para veículos pesados, se fez naturalmente para veículos populares. Na Figura 2 podemos ver como o diferencial era alojado no Ford-T.

Figura 2 - Eixo traseiro do Ford-T com o diferencial



Fonte: <http://www.fordt.org.ar/publicaciones/restauracion/ruedas-td-tt.htm> acesso em 12 de janeiro de 2019

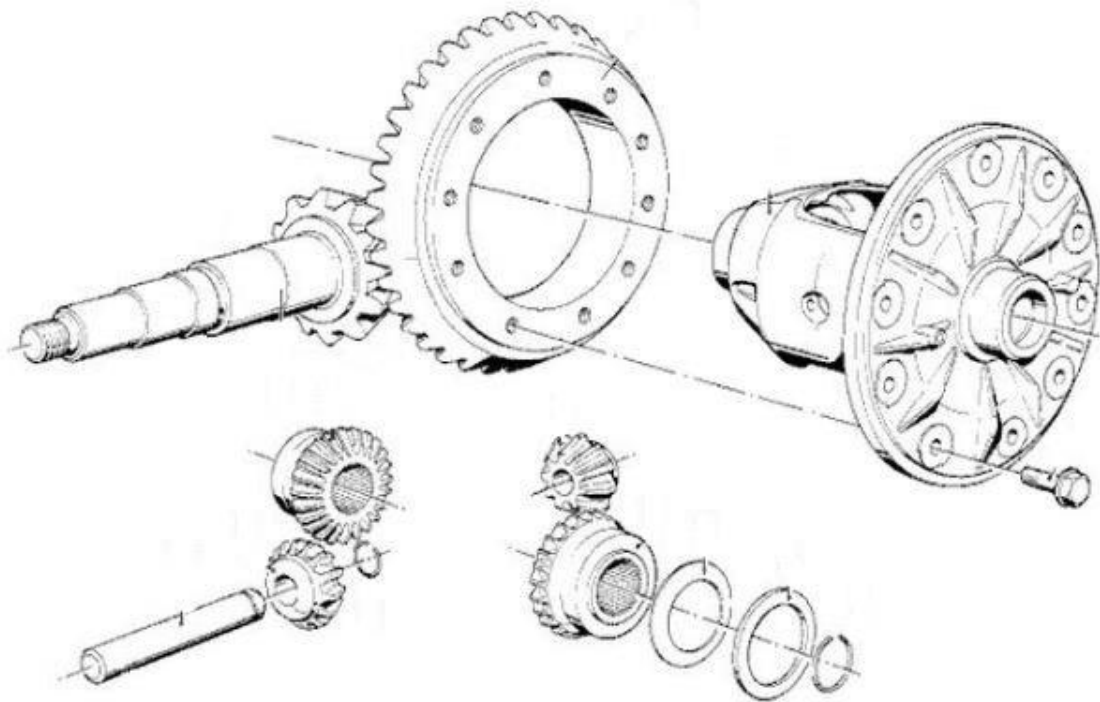
3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Nesse capítulo iremos abordar os processos de fabricação de cada elemento que compõe o diferencial. Não abordaremos o que cada elemento faz ou como ele trabalha no diferencial, vamos nos limitar aos processos de fabricação, a abordagem das funções dos componentes será feita no capítulo 5. Um diferencial básico é composto pelos seguintes componentes:

- Pinhão;
- Coroa;
- Engrenagens satélite;
- Engrenagens planetárias;
- Caixa do diferencial;

Abaixo segue na Figura 3 um desenho explicativo dos componentes do diferencial:

Figura 3 - Componentes do diferencial



Fonte: <https://www.jeepfan.com/projects/powertrax-install/index2.htm> acesso em 13 de janeiro de 2019

Basicamente todos os componentes do diferencial, exceto a caixa do diferencial, são algum tipo de engrenagem cônica (CROLA, 2009). Então todos eles passaram por um tipo muito semelhante de processo de fabricação. Os materiais mais usados na fabricação de engrenagens são: aço-liga, ferro fundido, cromo-níquel, bronze fosforoso, alumínio e náilon (SHIGLEY, 2005). Existem muitas maneiras de fabricar dentes de engrenagens, tais como fundição em areia, moldagem em casca, fundição de investimento, fundição em molde permanente, fundição em matriz e fundição centrífuga. Para (SHIGLEY, 2005) os dentes também podem ser fabricados mediante o processo de metalurgia do pó; de outra forma, por meio de extrusão, uma única barra de alumínio pode ser fabricada e então fatiada em engrenagens. De fato, as engrenagens que suportam altas cargas, em comparação com seus tamanhos, são geralmente feitas de aço e cortadas com cortadores de forma ou de geração (SHIGLEY, 2005). No corte de forma, o espaçamento dos dentes toma a forma exata do cortador. No de geração, uma ferramenta com uma forma diferente do perfil de

dente move-se relativamente à peça que dará origem à engrenagem, de modo a gerar a forma apropriada de dente. Um dos métodos de formação de dentes mais recentes e promissores é conhecido como conformação a frio ou laminação a frio, no qual matrizes são roladas sobre peças de aço para formar os dentes. As propriedades mecânicas do metal são notavelmente melhoradas pelo processo de rolamento, e um perfil gerado de alta qualidade é obtido ao mesmo tempo (SHIGLEY, 2005).

Engrenagens cônicas podem ser executadas com rodas cônicas com dentado reto, helicoidal ou de arco espiral. Os eixos de engrenagens cônicas geralmente se cruzam em um ângulo de 90° , sendo também possíveis outros ângulos (CROLA, 2009). A fabricação do material requer atenção, pois, quando feita de forma inadequada, as engrenagens cônicas podem não apresentar a eficiência necessária. Durante o processo produtivo essas peças passam por alguns estágios. O primeiro é a usinagem industrial, uma parte inicial que pode ser realizada com o uso de fresa caracol, fresagem convencional ou moldagem. Por fim é realizado o acabamento que pode ser feito por rebarbação, brunimento, retificação ou lapidação. Quando realizado esse processo de forma adequada, as engrenagens cônicas podem ter um desempenho e durabilidade que proporcionam um excelente custo-benefício.

3.1 Processos tradicionais

Os processos mais convencionais de fabricação de engrenagens que datam desde antes da primeira revolução industrial são a fundição de engrenagens por moldes e a conformação. Cada processo proporciona um determinado grau de precisão no acabamento para uma ampla aplicação na indústria seja ela automotiva, têxtil, alimentos, etc.

Segundo (GROOVER, 2007) quando se fala em fundição é preciso ter em mente que o processo de fundição permite a obtenção de peças de diferentes formatos e tamanhos. As peças produzidas podem passar por processos de conformação mecânica, ajustes dimensionais, soldagem ou usinagem. Mas, de modo geral, as peças resultantes do processo de fundição passam por acabamento como corte de canais, usinagem e rebarbação (GROOVER, 2007). Para a fabricação de engrenagens, dependendo da aplicação, há alguns

padrões de fundição de engrenagens que podem ser seguidos em função dos requisitos específicos de cada campo de aplicação, no caso para engrenagens utilizadas no diferencial os requisitos são peças que suportaram alta carga e rotações elevadas (GROOVER, 2007).

Por exemplo, pode ser usada uma fundição de engrenagens de baixa precisão em caso de aplicações não críticas (brinquedos, eletrodomésticos). Também é possível fazer fundição de engrenagens em areia quando se pede baixa precisão no acabamento, ou ainda fundição de engrenagens em moldes quando se requer um melhor acabamento com maior precisão (GROOVER, 2007). Engrenagens que fazem parte do diferencial se enquadram em peças que precisam de maior precisão em acabamento, por isso requer métodos de fundição por molde que garantem as especificações adequadas.

Porém, os métodos de fabricação de engrenagens por fundição apresentam algumas desvantagens na fabricação de engrenagens componentes do diferencial. Os métodos de fundição por molde em areia ou cera perdida apresentam baixo grau de acabamento superficial e pouca praticidade na produção em massa de engrenagens (GROOVER, 2007). Já a fundição por molde permanente apresenta alto grau de acabamento superficial, mas se limita a metais com temperatura de fusão mais baixa do que o ferro e o aço, uma vez que os moldes permanentes metálicos são compostos em sua maioria por aço ou ferro fundido. As Figuras 4 e 5 exemplificam a fundição por molde em areia e molde permanente.

Figura 4 - Fundição em molde de areia



Fonte: <http://users.xplornet.com/> acesso em 15 de janeiro de 2019

Figura 5 - Fundição em molde permanente metálico



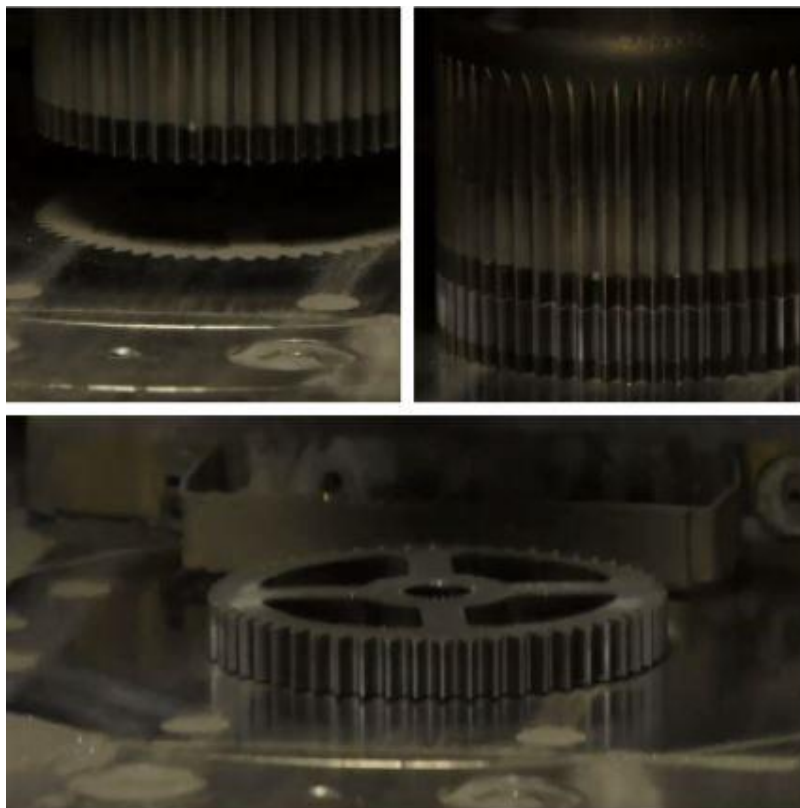
Fonte: <http://www.fremar.com.br/pecas-fundidas-coquilha.html> acesso em 19 de janeiro de 2019

Outro processo para a fabricação de engrenagens que podemos destacar é a metalurgia do pó que garante diferentes características de propriedades mecânicas para as engrenagens comparado com a fundição.

Segundo (GROOVER, 2007) a metalurgia do pó é uma técnica de fabricação de produtos metálicos (ferrosos ou não ferrosos) obtidos através da

conformação de pós metálicos seguido de tratamento térmico de sinterização (processo de aglutinação de partículas sólidas por aquecimento), onde o material é submetido a temperaturas abaixo do ponto de fusão sob atmosfera controlada, conferindo-se propriedades físicas e mecânicas. O efeito do custo-benefício é contemplado a nível material e dimensional. O primeiro, através da formulação da composição química e conseqüentes propriedades físico-mecânicas na medida exata da solicitação (GROOVER, 2007). O segundo é obtido sistematicamente pela compactação em ferramental específico garantindo geometrias e tolerâncias apertadas com alta repetibilidade. O processo é ecologicamente correto e exerce menor impacto ao meio ambiente (quando comparado aos processos convencionais) devido a melhor utilização da matéria-prima, menor consumo de energia e utilização seletiva de elementos de liga, determina (GROOVER, 2007). Na Figura 6 podemos exemplificar a fabricação por metalurgia do pó.

Figura 6 - Metalurgia do pó



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=PetwxkqM-kQ> acesso em 01 de fevereiro de 2019

3.2 Processos inovadores

Com a evolução dos processos de fabricação e a geometria complexa de projetos modernos de engrenagens surgiram novos métodos para a confecção de engrenagens, podemos citar InvoMilling, Power skiving, e fresa de disco. Geralmente, o perfil da ferramenta de engrenagem precisa ser personalizado para engrenagem específica. Isto significa que o tamanho e o formato do espaçamento entre os dentes devem corresponder totalmente com o perfil da ferramenta (GROOVER, 2007).

Algumas considerações importantes devem ser feitas ao solicitar uma ferramenta para fresamento de engrenagens, que são:

- Tamanho do módulo;
- Ângulo de pressão;
- Perfil do dente da engrenagem (protuberância, alívio da cabeça ou chanfro na cabeça);
- Fator de modificação do adendo;
- Diâmetro da cabeça;
- Ângulo de hélice;

Para (GROOVER, 2007) o fresamento com caracol é um processo de manufatura em que o dente da engrenagem é gerado através de uma série de cortes com uma ferramenta de corte helicoidal. O caracol (hob) e o blank de engrenagem giram continuamente até que todos os dentes sejam cortados. O fresamento com caracol é possível apenas para engrenagens externas (GROOVER, 2007).

Algumas vantagens do fresamento com caracol são citadas abaixo:

- Custo total reduzido por engrenagem;
- Velocidades de corte altas;
- Maior vida útil da ferramenta e tempo de máquinas paradas reduzido;
- Indexação e manuseio fáceis e repetíveis da ferramenta;
- Nenhum custo adicional na reafiação ou recobertura;

Na Figura 7 podemos ver o processo de fabricação de fresamento por caracol.

Figura 7 - Fresamento com caracol



Fonte: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/waelzfraeserreihe-jetzt-bis-modul-9-erhaeltlich/> acesso em 05 de fevereiro de 2019

Normalmente, a usinagem de engrenagens requer ferramentas dedicadas para os perfis de engrenagens específicos. InvoMilling é um processo para usinagem de engrenagens externas, estrias e engrenagens cônicas retas e permite o fresamento de engrenagens internamente em máquinas standard (GROOVER, 2007). Ao mudar o programa CNC e não a ferramenta, um conjunto de ferramentas pode ser usado para muitos perfis de engrenagens. As peças completas podem ser usinadas em um set-up usando máquinas multitarefas ou um centro de usinagem de cinco eixos. Assim, o InvoMilling pode reduzir significativamente o prazo de manufatura e o tempo total de produção (GROOVER, 2007). Podemos citar algumas vantagens do processo InvoMilling:

- Flexibilidade – as mesmas ferramentas para muitos perfis de engrenagem;
- Usinagem de engrenagens em máquinas multitarefas e centro de usinagem;
- Peças completas em uma máquina e um único set-up;
- Menos agressivo ao meio ambiente – não usa óleo de refrigeração;

Na Figura 8 podemos exemplificar o processo InvoMilling.

Figura 8 - InvoMilling



Fonte: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/gear-manufacturing.aspx?Country=br> acesso em 07 de fevereiro de 2019

O *Power skiving* é um processo de corte contínuo muitas vezes mais rápido que o shaping e mais flexível que o brochamento. Segundo (GROOVER, 2007) embora o *Power skiving* seja um conceito que existe há cerca de um século, o desenvolvimento sofreu uma reviravolta recentemente. Como resultado do rápido progresso de máquinas mais robustas e rígidas e fusos sincronizados, um uso mais abrangente do *Power skiving* está agora se tornando rapidamente uma realidade. (GROOVER, 2007) o *Power skiving* pode ser aplicado tanto para engrenagens internas quanto externas, mas é especialmente produtivo em usinagem interna. O método trabalha especialmente bem na produção em massa em que o tempo de produção é decisivo.

Pontos positivos do processo *Power skiving*:

- Usinagem com um set-up que reduz o tempo de produção, melhora a qualidade e reduz os custos de manuseio e logística;

- É possível usinar próximo a cantos a 90 graus, propiciando maior liberdade no projeto da peça;
- Fácil de usar e ecologicamente correto;
- Usinagem muito eficiente em condições sem refrigeração;
- Tempo de produção total significativamente reduzido em relação aos processos com brochamento, shaping e fresamento com caracol
- Usinagem de peças gerenciável e previsível;
- A qualidade da peça obtida é igual ou ainda melhor do que a atingida com soluções de fresamento de engrenagens semelhantes;
- Pode ser aplicado em máquinas especiais, multitarefas e centros de usinagem;

Na Figura 9 está exemplificado o processo Power skiving.

Figura 9 - Power skiving



Fonte: <https://www.mmsonline.com/blog/post/hmc-skiving-consolidates-gear-machining-> acesso em 10 de fevereiro de 2019

O fresamento de disco é um processo em que um vão de dente é cortado por vez (GROOVER, 2007). Os métodos de fresamento de disco são facilmente aplicados em centros de usinagem, máquinas multitarefas e centros de torneamento, possibilitando a usinagem de peças completas com um set-up. (GROOVER, 2007) determina que geralmente, ao usar a tecnologia de fresamento de disco, as estrias feitas em fresadoras tipo caracol (hobbing) ou por empresas terceirizadas podem ser usinadas em seu próprio chão de fábrica usando as máquinas existentes. Assim, o fresamento de disco não requer um alto investimento inicial.

Vantagens do fresamento de disco:

- Fresamento de estrias em centros de usinagem, máquinas multitarefas e centros de torneamento;
- Investimento de baixo custo;
- Usine estrias em máquinas existentes em vez de investir em uma máquina para fresamento de engrenagens;
- Menos custos e tempo gasto com logística;
- Não é necessário mover as peças entre máquinas ou fábricas;
- Não é necessário investir em reafiação e revestimento de ferramentas de aço rápido;
- Velocidades de corte altas;
- É possível cortar materiais difíceis;
- A usinagem sem refrigeração reduz os tempos de fabricação e os custos de refrigeração, além de contribuir com o meio ambiente e com o ambiente de trabalho do operador;
- Solução de custo eficaz para lotes pequenos e médios;

Fresamento concordante e fresamento discortante são mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Fresamento de disco



Fonte: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/gear-manufacturing.aspx?Country=br> acesso em 15 de fevereiro de 2019

3.3 Acabamento de engrenagens

Segundo (SHIGLEY, 2005) engrenagens que rodam a altas velocidades e transmitem grandes forças podem ser submetidas a forças dinâmicas adicionais, no caso de haver erros nos perfis de dentes. Os erros podem ser de alguma forma evitados pelo acabamento dos perfis de dentes, o qual pode ser feito após o corte, tanto por rebarbação como por brunimento (GROOVER, 2007). O brunimento, assim como a rebarbação, é usado com engrenagens que foram cortadas, ainda que não tratadas termicamente (GROOVER, 2007). Nele, engrenagens endurecidas, com dentes ligeiramente maiores que o necessário, são postas a rodar com a engrenagem, até que as superfícies se tornem suaves. Para (GROOVER, 2007) a retífica e a lapidação são usadas para dentes de engrenagens endurecidas após tratamento térmico. A operação de retífica emprega o princípio da geração e produz dentes bastante precisos. Na lapidação, os dentes da engrenagem em trabalho e da lapidadora deslizam de forma axial, para que toda a sua superfície seja desgastada igualmente.

4 VARIAÇÕES E APLICAÇÕES DO DIFERENCIAL

Os veículos não esportivos utilizam de maneira geral o diferencial aberto. Este aplica o mesmo torque em ambas as rodas traseiras, mas este tipo de diferencial se aplica tradicionalmente em pistas sem condições adversas, rodovias comuns de asfalto e concreto, que usualmente se tem nas pistas urbanas. Porém, em condições de pistas precárias como lama, gelo ou excessivamente molhadas o diferencial aberto não se aplica de maneira eficaz, pois a distribuição por igual da tração nas rodas em uma pista escorregadia acarretaria no deslizamento das rodas do carro.

Para resolver os problemas de aplicabilidade inerentes a cada tipo de pista e estilos de pilotagem dos veículos, sejam eles não esportivos, esportivos e veículos pesados, foram criadas variações do tipo de diferencial de acordo com seu bloqueio.

No decorrer do capítulo será explanado os diferenciais do tipo:

- Aberto – Open;
- Auto bloqueante de embreagem – Limited Slip Differential (LSD) ou diferencial de deslizamento limitado;
- Auto bloqueante Torsen – Torsen Limited Slip Differential (LSD);

4.1 Diferencial Aberto – Open

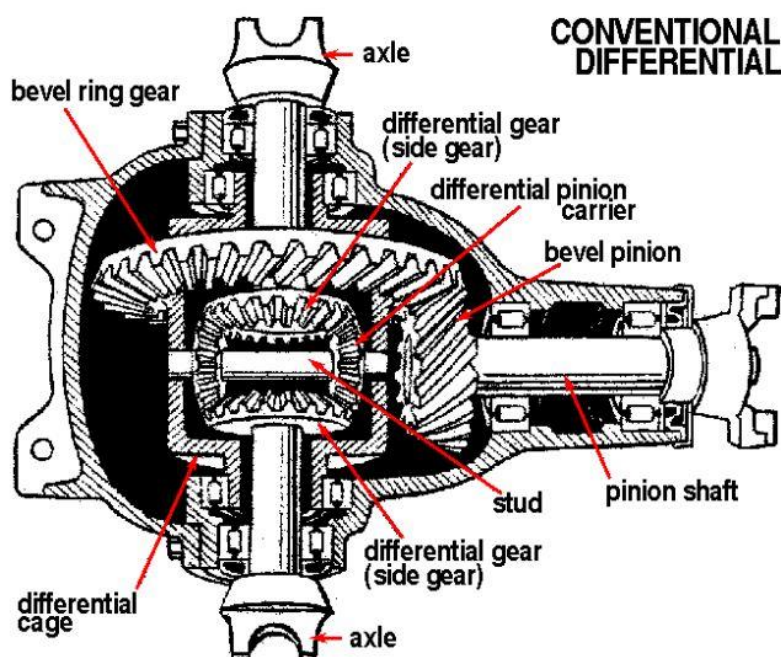
Para (CROLA, 2009) este é o tipo de diferencial mais comum que existe, grande parte dos carros de passeio utilizam esse equipamento. O seu ponto fraco é que não dispõe de nenhum tipo de bloqueio, ou seja, mesmo que uma das rodas perca tração o torque aplicado sobre elas será igual.

Segundo (CROLA, 2009) o diferencial aberto sempre aplica a mesma quantidade de torque a cada roda. Existem dois fatores que determinam quanto torque pode ser aplicado às rodas: equipamento e tração. Em condições secas, quando há muita tração, a quantidade de torque aplicada às rodas é limitada pelo

motor e engrenagem, já numa situação de baixa tração, como ao dirigir no gelo ou lama, a quantidade de torque é limitada à maior quantidade de tração que não fará com que uma roda deslize nessas condições (CROLA, 2009). Portanto, mesmo que um carro possa produzir mais torque, é necessário que haja tração suficiente para transmitir esse torque ao solo. Se você adicionar mais força ao carro depois que as rodas começarem a escorregar, as rodas apenas girarão mais rápido.

O mecanismo diferencial está alojado dentro de um invólucro de metal arredondado com uma abertura na frente para conectar o eixo de transmissão. Dentro deste invólucro também é lubrificado, como em qualquer outro lugar onde peças metálicas atritam contra outras peças metálicas (CROLA, 2009). A Figura 11 ilustra a parte interna de um diferencial aberto.

Figura 11 - Parte interna de um diferencial aberto



Fonte: <http://members.rennlist.com/> acesso em 20 de fevereiro de 2019

4.2 Diferencial Auto bloqueante de embreagem – Sistema LSD

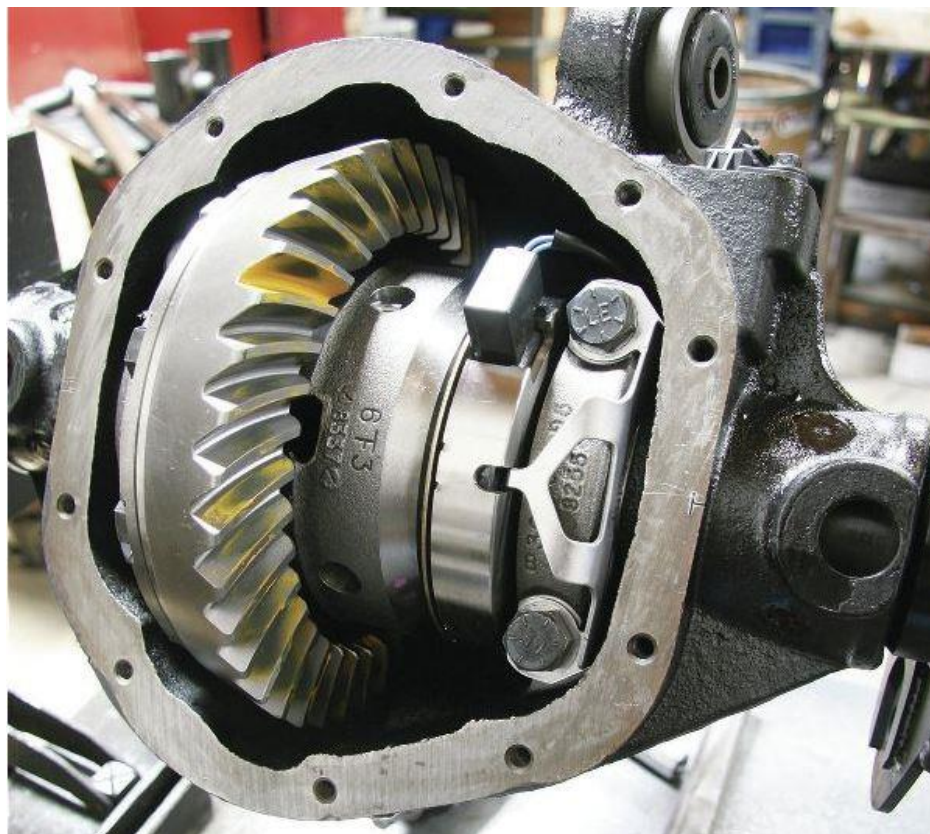
Indiscutivelmente o mais comum tipo de diferencial, devido a sua ampla gama de aplicações, é o Limited Slip Differential (LSD) ou diferencial de

deslizamento limitado, este sistema muda parte do torque da roda de maior tração e limita o escorregamento da roda de menor tração (CROLA, 2009). Neste, seus componentes são os mesmos encontrados no diferencial comum, exceto pelas duas embreagens localizadas entre a caixa do diferencial e as engrenagens planetárias, também chamadas de *Clutch Packs* (CROLA, 2009). Estas embreagens possuem dois tipos de discos, montados em grande quantidade e intercalados entre si, o disco de atrito e o disco de aço (CROLA, 2009). Os discos de atrito possuem dentes na sua extremidade interna, enquanto que os discos de aço possuem alguns poucos dentes na sua extremidade externa. Ambos são encaixados na parte traseira das engrenagens planetárias, que possuem dentes também, e nestes se encaixam os discos de atrito e de aço. Por causa disso estes diferenciais são geralmente chamados de “deslizamento limitado” (CROLA, 2009).

No entanto, nem sempre o torque transmitido para as rodas será o mesmo, quando uma das rodas de tração está em uma situação de baixo atrito e a outra em boas condições de atrito, aquela gira em falso e tem transmissão limitada de torque. Enquanto que a outra precisa de um alto torque para girar, o diferencial naturalmente manda mais torque para essa roda.

A desvantagem é que a quantidade de torque transmitida para a roda com maior tração também será limitada. Determina (CROLA, 2009) que isso pode não ser torque suficiente para mover o veículo e é importante notar que diferencial com deslizamento limitado não fornecerá 100% do bloqueio em situações extremas, como quando uma roda perde tração por completo. Na Figura 12 podemos ver um exemplo de diferencial de deslizamento limitado.

Figura 12 - Diferencial de deslizamento limitado



Fonte: <http://www.fourwheeler.com/how-to/transmission-drivetrain/1308-selectable-vs-automatic-the-differential-showdown/> acesso em 21 de fevereiro de 2019

No engrenamento das planetárias com as satélites, ao começarem a girar, ambas, satélites e planetárias exercem forças axiais sobre elas mesmas, essas forças serão maiores quanto maior for o torque necessário para fazer girar a roda (CROLA, 2009). A força axial exercida pela satélite sobre a engrenagem planetária, empurra esta contra sua sede. Como a engrenagem planetária possui uma pequena folga no estriado da semi-árvore, esta força axial, somada com a força da mola, é capaz de empurrar a engrenagem planetária contra sua sede, comprimindo a embreagem que está nesta (CROLA, 2009). Como os discos de aço possuem seus dentes encaixados em pontos da caixa do diferencial, ao comprimir a embreagem, o movimento da caixa do diferencial passa para a engrenagem planetária (neste ponto temos o efeito embreagem), o diferencial passa a transmitir mais torque para a roda que estiver com maior tração, enquanto que a outra terá torque limitado.

4.2.1 Sistema LSD

Para (CROLA, 2009) o sistema LSD vem em 3 tipos: embreagem, cone ou gear-driven:

- Embreagem – as molas aplicarão pressão nas engrenagens laterais e em embreagens que consistem em camadas alternadas de discos de fricção e discos de aço. O design da placa de embreagem é reconstruível, o que permite a substituição das placas.
- Cone – usa-se cones revestidos para fricção ao invés de usar um conjunto de embreagens. O design do sistema usando cones é suscetível a ruídos e não são moldados para a substituição quando se fizer necessário.
- Gear-driven – usa-se um conjunto de engrenagens que trabalham por meio de um princípio chamado força de separação de engrenagem para transferir o torque para a roda de maior tração. É um sistema criado com uma alta capacidade de carga, mas não é construído para substituição de peças.

4.3 Diferencial Torsen – Sistema LSD

Segundo (CHOCHOLEK, 1988) é uma variação do diferencial auto bloqueante de embreagem, neste caso alguns componentes são diferentes e o princípio também está um pouco alterado. O nome Torsen é uma contração das palavras “torque” e “sensoriamento”, funciona como um diferencial aberto quando a quantidade de torque para cada roda é igual, mas assim que uma roda começa a perder tração, a diferença de torque faz com que as engrenagens do diferencial de Torsen se unam (CHOCHOLEK, 1988). A distribuição padrão ainda continua de 50:50, mas quando necessário, até 75% fluíam para o eixo com a melhor tração (CHOCHOLEK, 1988). Para melhorar ainda mais a tração ao iniciar em condições extremas, o motorista ainda poderia travar o diferencial

do eixo traseiro eletropneumaticamente ao pressionar um botão (CHOCHOLEK, 1988).

No lugar de engrenagens planetárias e satélites, há um conjunto de engrenagens helicoidais e parafusos sem fim (CROLA, 2009). Entretanto, este diferencial preserva a semelhança com os demais através do seu acionamento, também por pinhão e coroa. O pinhão aciona a coroa, e nesta está a caixa do diferencial, que aloja todas as engrenagens e parafusos sem fim (CHOCHOLEK, 1988). Quando a coroa gira, a caixa gira solidário a ela. As engrenagens helicoidais estão encaixadas no estriado das semi-árvores, engrenada naquelas estão os parafusos sem fim. Estes são alojados dentro da caixa do diferencial através de hastes, nas extremidades do parafuso sem fim estão engrenagens de dentes retos. Elas são responsáveis por manter os parafusos sem fim de cada lado, engrenados (CHOCHOLEK, 1988). O conjunto engrenagem helicoidal e parafuso sem fim funciona através do giro da engrenagem helicoidal, esta é quem aciona o parafuso sem fim, para então girarem em harmonia. No caso de o parafuso sem fim acionar a engrenagem helicoidal, o conjunto irá travar, ou seja, o parafuso sem fim não é capaz de acionar a engrenagem helicoidal (PROVATIDIS, 2003). Na Figura 13 podemos ver um exemplo de diferencial Torsen.

Figura 13 - Diferencial Torsen



Fonte: <https://www.clublexus.com/> acesso em 22 de fevereiro de 2019

No momento em que o veículo começa a contornar uma curva, a roda interna à esta deve girar mais lentamente e a externa mais rapidamente. No diferencial Torsen isso é possível, mas além disso, a redução e o aumento de velocidade entre as rodas são proporcionais (CHOCHOLEK, 1988). Ou seja, quando a engrenagem helicoidal gira, ela aciona o parafuso sem fim. Como ambos os lados estão conectados por engrenagens de dentes retos, quando uma roda reduz sua velocidade e a outra aumenta, isto ocorre na mesma proporção, ou seja, se uma aumenta 10% sua velocidade, a outra roda reduz 10% de sua velocidade (CHOCHOLEK, 1988). Entretanto, a grande função do diferencial Torsen é o seu bloqueio, e este funciona da seguinte forma. Supomos uma situação na qual ambas as rodas estão sobre superfícies de diferentes coeficientes de atrito, é natural então que essas rodas tendam a girar em velocidades diferentes, ou seja, uma das rodas irá girar em falso e mais rapidamente (CHOCHOLEK, 1988). Essa situação com um diferencial padrão seria caracterizada com o posterior envio de todo o torque para a roda sem tração, mas com o Torsen, no momento em que a roda gira mais rápido em relação a outra, a engrenagem helicoidal respectiva aciona o seu parafuso sem

fim (CHOCHOLEK, 1988). Lembrando que estes são dotados de engrenagens de dentes retos que ligam os parafusos sem fim de ambos os lados, temos então a transferência da rotação de parafuso sem fim para o outro, no caso do que está girando mais rápido para o mais lento.

Todo esse processo é realizado de forma instantânea no diferencial Torsen, fato este que o coloca em vantagem em relação ao diferencial LSD de embreagem. Além disso, o Torsen pode ter mais de um conjunto de parafusos sem fim para possibilitar grandes transferências de torque (CHOCHOLEK, 1988).

5 COMPONENTES INTERNOS DO DIFERENCIAL

Como foi abordado no capítulo 3 um diferencial básico é composto por pinhão, coroa, engrenagens satélites, engrenagens planetárias e caixa do diferencial. Neste capítulo explicaremos como cada componente trabalha.

Segundo (CROLA, 2009) o diferencial pode ser montado de acordo com a posição de engrenamento do pinhão com a coroa, dentro dele encontram-se engrenagens cônicas do tipo helicoidal ou hipóide. A montagem do diferencial com engrenagens cônicas de dentes helicoidais proporciona às engrenagens um rendimento de 95% a 98% (CROUSE, 1993). Em seu engrenamento, possui maior número de dentes em contato com a outra engrenagem, favorecendo uma maior transmissão de torque. Sua suavidade de engrenamento é resultado do contato gradual entre os dentes, que reduz a aspereza dos choques quando em transferência de torque (CROUSE, 1993). Além disso, possuem um certo nível de flexibilidade, algo necessário nos diferenciais atuais.

Os diferenciais montados com engrenagens hipóides se diferenciam das helicoidais por vários fatores. O primeiro deles, a possibilidade de se montar o cardan abaixo da linha de eixo do diferencial, e assim o assoalho da carroceria não precisa do característico ressalto longitudinal que invade carcaça do diferencial (CROUSE, 1993). Mas, além disso, diferenciais com engrenagens hipóides possibilitam o uso de pinhão maior, podendo trabalhar com uma taxa de redução mais elevada em relação as engrenagens cônicas helicoidais, além

de desempenhar maior contato na coroa do diferencial (CROUSE, 1993). Portanto, transferindo maior torque para este. Neste caso, os dentes das engrenagens possuem forma hiperbolóide (forma de hipérbole). Esses diferenciais trabalham com certo nível de deslizamento, pois isso é uma característica das engrenagens cônicas hipóides. Motivo pelo qual utilizam lubrificantes de alta performance. O uso desse tipo de diferencial é voltado para aplicações nas quais o torque de acionamento é muito elevado (CROUSE, 1993). Podemos exemplificar a montagem do conjunto pinhão coroa do tipo helicoidal e hipoidal nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Helicoidal: as linhas de centro do pinhão e coroa coincidem



Fonte: <http://www.mevi.com.br> acesso em 23 de fevereiro de 2019

Figura 15 - Hipoidal: as linhas de centro não coincidem



Fonte: <http://www.orteip.com.br> acesso em 23 de fevereiro de 2019

5.1 Pinhão e coroa

A coroa e o pinhão são dois tipos de engrenagens interdependentes, ou seja, funcionam em conjunto e são geralmente utilizadas para alterar a rotação ou a velocidade de acionadores de diversos segmentos. Essas duas peças estão presentes em diversos equipamentos industriais, bem como em automóveis, por exemplo.

Os primeiros arranjos de roda de coroa e pinhão usavam dentes de corte reto, porque estes eram os mais fáceis de fazer (CROUSE, 1993). No entanto, os dentes de corte reto significam que a unidade é transportada por um dente de cada vez, o que pode levar a ruídos e vibrações, a menos que todos os dentes estejam exatamente espaçados uniformemente e tenham exatamente a mesma forma (CROUSE, 1993). Para superar este problema, os projetistas se moveram para a forma na qual os dentes da coroa e do pinhão são curvos. Com esta forma de dente, dois ou possivelmente até três pares de dentes estão em contato ao mesmo tempo e resultam em corrida mais suaves, junto com um desgaste mais uniforme (CROUSE, 1993). Um outro desenvolvimento foi destinado a reduzir a quantidade de espaço ocupado no compartimento de passageiros pelo

túnel de transmissão. Isto poderia ser conseguido se o eixo da hélice pudesse ser baixado, mas desde que o eixo tivesse que encontrar o comando final na altura da linha central do eixo traseiro, isso não poderia ser feito facilmente (BEIKMANN, 2015). A resposta foi abaixar o ponto em que o eixo da hélice encontrou o comando final, de modo que, em vez de apontar diretamente para a linha central do eixo, o centro do eixo fosse um pouco abaixo (montagem hipoidal). A penalidade era que uma nova forma de dente de engrenagem tinha que ser desenvolvida para permitir que as duas engrenagens fora de centro se encaixassem (BEIKMANN, 2015). Quando as engrenagens estão com os centros alinhados, os dentes estão apenas em contato de rolagem, mas na forma hipoidal, eles precisam deslizar e rolar (CROUSE, 1993). Este avanço colocou novas demandas na lubrificação e estas foram atendidas pelo desenvolvimento de óleos de extrema pressão. Se um óleo não adequado é usado em um acionamento hipóide, ele se decompõe rapidamente sob o estresse e os danos de engrenagem logo se agravam (CAINES, 2004). Uma outra forma de acionamento também permite que a linha do eixo da hélice seja abaixada (BEIKMANN, 2015). Esta é a movimentação sem-fim que quase poderia ser considerada como uma forma extrema de hipóide na qual todo contato está deslizando em vez de rolar.

Diante de toda essa explicação, podemos concluir que o pinhão e a coroa não trabalham separadamente, por isso abordamos as duas peças como um único conjunto, até mesmo porque eles devem ser fabricados sob medida e por consequência a substituição do pinhão ou da coroa separadamente não é aconselhável.

O pinhão é a engrenagem que aciona a coroa do diferencial, portanto, o pinhão é a engrenagem motora do diferencial, pois é por ela que o torque motor é transmitido ao diferencial. É cônico e possui dentes helicoidais, fato este que reduz os ruídos produzidos pelo engrenamento (BEIKMANN, 2015). O engrenamento do pinhão com a coroa produz a última relação entre as engrenagens antes do torque chegar às rodas, ou seja, além da redução ou desmultiplicação provida pela caixa de marcha, ainda há a redução pinhão-coroa do diferencial (BEIKMANN, 2015). Além disso, é naquele engrenamento que se altera o sentido de transmissão do torque, pois o pinhão e a coroa são engrenagens cônicas, e seu engate é exatamente em 90° , desviando o sentido

do torque na mesma proporção. Podemos ver na Figura 16 um exemplo de pinhão.

Figura 16 - Pinhão



Fonte: <https://www.forgingmachining.com/> acesso em 25 de fevereiro de 2019

A coroa é uma engrenagem cônica, sua faixa dentada é disposta lateralmente, e nesta se engrena o pinhão, no qual recebe o torque do motor. A coroa é feita em aço (e o pinhão também), o número de dentes varia de acordo com o projeto do veículo, por exemplo, no caso de a coroa ter 30 dentes e o pinhão 10 (SHIGLEY, 2005). Isso significa que o pinhão gira três voltas, enquanto que as rodas giram apenas uma. A coroa também aloja a caixa do diferencial, portanto, ao girar, a coroa aciona as engrenagens satélites e planetárias, que transmitem o torque para as rodas (BEIKMANN, 2015). Na Figura 17 podemos ver um exemplo de coroa.

Figura 17 - Coroa



Fonte: <https://www.forgingmachining.com/> acesso em 25 de fevereiro de 2019

O acionamento hipóide agora é universal, exceto em carros com tração dianteira (a maioria dos carros de passeio são de tração traseira), em que a necessidade de baixar o eixo da hélice não ocorre (BEIKMANN, 2015). Nesses carros, onde o comando final compartilha seu suprimento de óleo com o motor, não seria possível, em hipótese alguma, usar o acionamento hipóide, já que o óleo do motor não seria um lubrificante adequado (CAINES, 2004). Os carros de tração dianteira com transmissão transversal usam uma engrenagem reta na roda de coroa, enquanto aqueles carros com tração dianteira que têm motores em linha usam um acionamento de engrenagem reta em um eixo intermediário curto, transportando uma engrenagem de pinhão normal com dentes em espiral (CROLA, 2009). A outra função importante do conjunto coroa e pinhão é fornecer a relação final de abaixamento na linha de transmissão do motor para as rodas motrizes. A roda de coroa é sempre muito maior que o pinhão, então o comando final é uma redução, as rodas giram mais lentamente que o eixo da hélice (BEIKMANN, 2015). A maioria das transmissões finais de carros apresenta proporções de redução entre 3: 1 e 5: 1, embora veículos comerciais e carros de competição possam usar relações mais altas (BEIKMANN, 2015). Tende a haver um limite para o quão baixo a relação de transmissão pode ser feita, porque a

coroa deve ser menor (deixando pouco espaço para o diferencial) ou o pinhão maior (o que torna toda a unidade final mais volumosa) (SHIGLEY, 2005). Na Figura 18 podemos ver a montagem do conjunto coroa e pinhão sem-fim.

Figura 18 - Coroa e pinhão sem-fim



Fonte: <https://www.uniquecarsandparts.com.au/> acesso em 27 de fevereiro de 2019

O projetista de transmissão é limitado em sua escolha da taxa de transmissão final por vários fatores. Todas as relações são obtidas por meio de engrenagens de dois conjuntos de dentes de engrenagens, de modo que o projetista só pode trabalhar com combinações de números inteiros. Para manter as velocidades de deslizamento dos dentes dentro dos limites, o pinhão deve ter um número razoável de dentes, sete como um mínimo prático, mas mais são preferíveis. Isso significa que a roda da coroa pode ter de 25 a 45 dentes (MILLIKEN, 1995). No entanto, há um outro problema. Se o número de dentes na roda da coroa for um múltiplo exato do número de dentes do pinhão ou, na verdade, se a relação entre os números for simples existe o perigo de entrar em ressonância (BEIKMANN, 2015). Isso significa que as frequências naturais das

duas engrenagens atuam em "sincronia" e, conseqüentemente, causam ruído e, em casos graves, danos à engrenagem. É por isso que as taxas de transmissão final de exatamente 3: 1, 4: 1 ou qualquer outra combinação de números inteiros nunca são usadas dessa maneira (MILLIKEN, 1995).

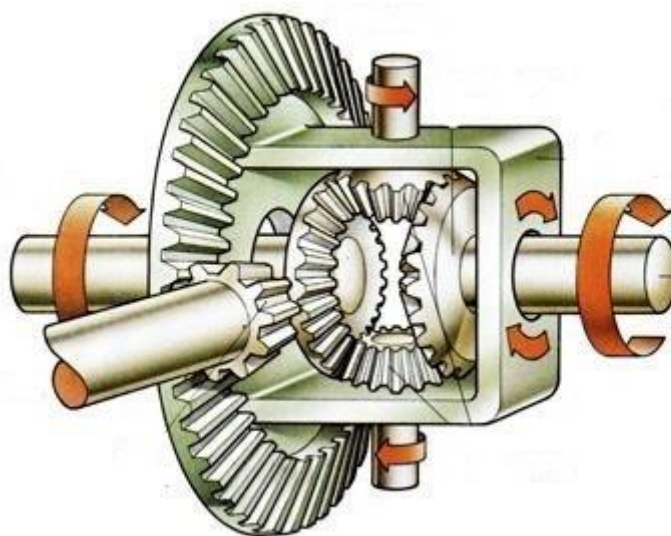
Para manter o problema ao mínimo, os projetistas de transmissão preferem usar números primários de dentes em uma ou ambas as engrenagens. Assim 11 e 13 são boas escolhas para os dentes de pinhão, especialmente em carros maiores e mais potentes, enquanto 37, 41 e 43 são freqüentemente usados para a roda de coroa (KNOWLES, 1995). Em todos esses casos, a fração envolvida é complicada e, conseqüentemente, não há chance alguma das engrenagens ressonarem (BEIKMANN, 2015). As relações de transmissão nos carros com tração dianteira muitas vezes parecem estranhas porque a redução de marcha é feita em dois estágios, levando a transmissão da caixa de câmbio para um mecanismo de transferência e da engrenagem de transferência para a transmissão final (KNOWLES, 1995).

Uma vez que o torque do motor tenha atingido a roda de coroa, ele ainda precisa ser dividido igualmente e alimentado às rodas, permitindo que as rodas viajem em velocidades diferentes (BEIKMANN, 2015). Esta é a função do diferencial que consiste em um tambor aparafusado à coroa e carregando duas engrenagens satélites. Estas, por sua vez, engrenam com mais duas engrenagens planetárias, uma na extremidade de cada eixo de acionamento (BEIKMANN, 2015). Enquanto o carro estiver se movendo em linha reta, cada roda está viajando na mesma velocidade e não há movimento relativo entre as engrenagens montadas nos eixos de transmissão. Elas e a caixa do diferencial giram todos na mesma velocidade. As duas engrenagens de satélites não giram em seus eixos, mas simplesmente atuam como elos de transferência do acionamento da roda de coroa, através da caixa do diferencial, para as próprias engrenagens planetárias do eixo de acionamento (BEIKMANN, 2015).

Quando o carro entra em uma curva, ou se uma roda começa a escorregar devido a rotação da roda, as engrenagens planetárias do eixo de transmissão começarão a girar em velocidades diferentes (CROLA, 2009). Elas são capazes de fazer isso porque as pequenas engrenagens satélites começam a girar em seus eixos, permitindo o movimento diferencial (CROLA, 2009). Ao mesmo tempo, a caixa do diferencial continua a ser impulsionado pela roda de coroa

com o resultado de que as engrenagens satélites estão sendo carregadas em volta, bem como girando em seus eixos (BEIKMANN, 2015). Porque eles estão sendo carregados, e porque qualquer que seja sua própria rotação, elas ainda estão em engrenamento com as engrenagens planetárias do eixo de transmissão, elas ainda transmitem o torque do motor e, conseqüentemente, dividem igualmente entre as duas rodas acionadas (BEIKMANN, 2015). Na figura 19 podemos ver o conjunto pinhão e coroa em funcionamento no diferencial.

Figura 19 - Pinhão e coroa no diferencial



Fonte: <https://www.uniquecarsandparts.com.au/> acesso em 01 de março de 2019

5.2 Caixa do diferencial

A caixa do diferencial é uma estrutura na qual estão todas as engrenagens do diferencial, mas apenas a coroa e as engrenagens satélites estão fixas na caixa (CROLA, 2009). Portanto, todo o torque transmitido para a coroa será transmitido para a caixa do diferencial, por consequência, da caixa do diferencial será transmitido para as engrenagens satélites (CROLA, 2009). Sem esse componente não seria possível o diferencial desempenhar sua função em um espaço reduzido, uma vez que a caixa do diferencial conecta as duas engrenagens satélites de uma vez só (BEIKMANN, 2015). Se a caixa do diferencial não estivesse presente na configuração do diferencial uma outra forma para conectar e transmitir o torque da coroa para as engrenagens satélites

deveria existir que poderia não ser de forma simultânea, mas a conexão poderia ser individual o que ocasionaria em ocupar um espaço muito maior e mais componentes para desempenhar a função e alguns outros problemas podem ocorrer como intensificar o ruído, mais peças desgastadas com o tempo, maior uso de lubrificação. Na Figura 20 podemos ver um exemplo de caixa de diferencial vazia e a caixa do diferencial com as engrenagens satélites e planetárias montadas em seu interior.

Figura 20 - Caixa do diferencial vazia e com engrenagens montadas



Fonte: <https://www.carid.com/american-axle/differential-case.html> acesso em 03 de março de 2019

5.3 Engrenagens satélites e planetárias

Assim como o pinhão e a coroa as engrenagens satélites e planetárias trabalham de tal forma que podem ser consideradas um único elemento do diferencial, sendo essas engrenagens fabricadas sob medida e a substituição de uma única engrenagem não é recomendado. Por esse motivo será abordado o conjunto de engrenagens planetárias e satélites.

As engrenagens satélites são pequenas engrenagens cônicas fabricadas em aço alojadas na caixa do diferencial, geralmente em número de duas, as

engrenagens satélites engrenam nas duas engrenagens planetárias (CROLA, 2009). Além disso, são responsáveis pela distribuição de torque para as rodas, realizando a equalização entre estas, e possibilitando que o automóvel contorne curvas (CROLA, 2009). Já as engrenagens planetárias também são engrenagens cônicas, feitas em aço e dispostas em pares. As planetárias são as últimas engrenagens antes do torque chegar as rodas do veículo (CROLA, 2009). Aquelas são montadas em seus suportes dentro da caixa do diferencial. As engrenagens planetárias se ligam as semi-árvores, estas se encaixam no centro daquelas, em seus estriados ou chavetas. Dessa forma a semi-árvore recebe o torque do motor e o transmite as rodas (CROLA, 2009). Na Figura 21 podemos ver um conjunto de engrenagens satélites e planetárias usadas no diferencial.

Figura 21 - Conjunto de engrenagens satélites e planetárias



Fonte: <https://www.amtechinternational.com/bevel-gear-manufacturer/> acesso em 28 de março de 2019

O conjunto de engrenagens satélites e planetárias são uma das principais subdivisões das engrenagens epicicloidais simples. Devido à analogia com o sistema solar, o trem epicicloidal é frequentemente chamado de trem planetário ou trem de engrenagens planetárias ou, simplesmente, de TEP (CROLA, 2009). Em virtude disso, a engrenagem central é chamada de solar e as engrenagens que giram em torno dela são chamadas de planetárias ou satélites ou, simplesmente, planetas (CROLA, 2009). Muitos trens de força são

"confortavelmente" dispostos em linha reta, e a ausência de eixos de compensação não só diminui o espaço, como também elimina a necessidade de redirecionar a energia ou realocar outros componentes (CROLA, 2009). Esse é um fator determinante para as engrenagens do diferencial, uma vez que, a redução do espaço é essencial para qualquer conjunto mecânico dentro de um automóvel.

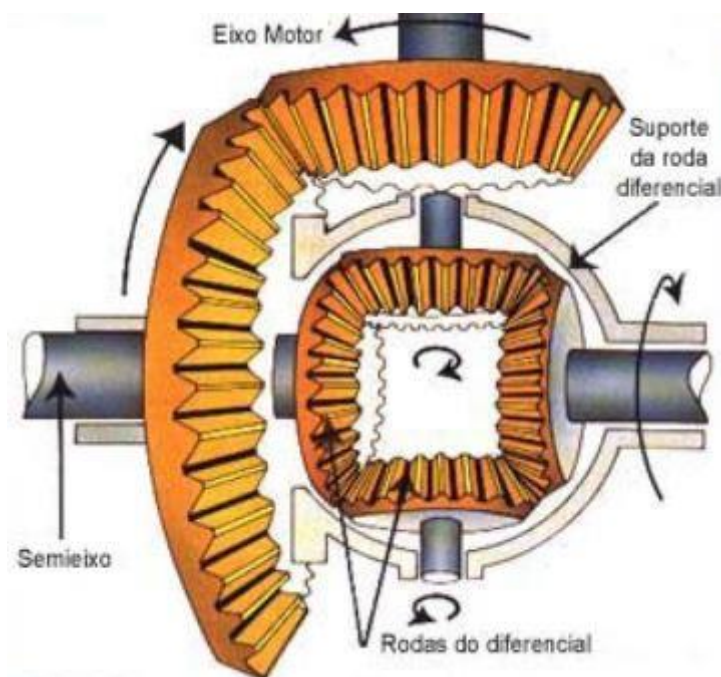
Em uma configuração planetária simples, a potência de entrada gira a engrenagem solar em alta velocidade (CROLA, 2009). As satélites, espaçadas em torno do eixo central de rotação, engrenam com as engrenagens planetárias, assim como com o anel fixo, de modo que elas são forçadas a orbitar enquanto rolam (CROLA, 2009). Todas as satélites são montadas em um único membro giratório, chamado de gaiola, braço ou transportador, no caso a caixa do diferencial que faz esse papel. À medida que a caixa do diferencial gira, ela fornece saída de baixa velocidade e alto torque. Um componente fixo nem sempre é essencial, no entanto, nos sistemas diferenciais, cada membro gira (CROLA, 2009). Arranjos planetários como esse acomodam uma única saída acionada por duas entradas ou uma única entrada acionando duas saídas. No diferencial temos uma entrada e duas saídas que são as rodas que devem girar em velocidades diferentes no momento da curva (CROLA, 2009). Os sistemas planetários de engrenagens cônicas operam segundo o mesmo princípio dos sistemas de eixos paralelos.

Trens planetários simples geralmente oferecem reduções de até 10: 1 (CROLA, 2009). Sistemas planetários compostos, que são muito mais elaborados que as versões simples, podem fornecer reduções muitas vezes maiores. Há maneiras óbvias de reduzir ainda mais (ou, conforme o caso, aumentar) a velocidade, como conectar os estágios planetários em série. A saída rotacional do primeiro estágio é vinculada à entrada do próximo, e o múltiplo das proporções individuais representa a redução final (SHIGLEY, 2005).

Outra opção é introduzir redutores de engrenagem padrão em um trem planetário (SHIGLEY, 2005). Por exemplo, a potência de alta velocidade pode passar por um conjunto de pinhão e engrenagem de eixo fixo comum antes do redutor planetário. Tal configuração, chamada de híbrida, é às vezes preferida como uma alternativa simplista para estágios planetários adicionais, ou para

reduzir velocidades de entrada que são muito altas para algumas unidades planetárias manipularem (CROLA, 2009). Também fornece um deslocamento entre a entrada e a saída. Se um ângulo reto for necessário, engrenagens chanfradas ou hipóides são às vezes conectadas a um sistema planetário em linha (CROLA, 2009). Na Figura 22 podemos ver um esquema do trem planetário em funcionamento no diferencial.

Figura 22 - Trem planetário em funcionamento



Fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAyzMAK/engrenagens-movimento> acesso em 29 de março de 2019

Nos trens planetários, o ruído geralmente não é agravante, e geralmente é melhor do que os redutores padrão de engrenagem. Ter engrenagens menores significa uma velocidade de linha mais baixa do que um conjunto de engrenagens comuns com classificação comparável (CROLA, 2009). No entanto, ter muitos dentes planetários idênticos engatando na mesma frequência com cada rotação do eixo de entrada contribui para o ruído, especialmente em velocidades muito altas. E o fato de essas malhas ocorrerem em órbita circular pode tornar a situação mais complexa (SHIGLEY, 2005). Obviamente, o uso de engrenagens de alta qualidade pode não danificar o sistema. Outra estratégia de

redução de ruído que foi usada envolve projetar o sistema de modo que as engrenagens entrem em conflito com a fase uma da outra e, assim, fornecer um efeito de cancelamento da ressonância. Amortecer o sistema usando lubrificantes também pode ajudar, pois desencoraja a ressonância (CAINES, 2004).

6 PROBLEMAS NO DIFERENCIAL

Neste capítulo será abordado alguns problemas que podem ocorrer no diferencial. Como todo conjunto mecânico o diferencial não está livre de problemas provenientes dos esforços gerados pela transmissão do torque do motor com o atrito entre as peças.

Podemos exemplificar com a seguinte situação se uma roda tem pouca ou nenhuma resistência ao movimento se estiver no gelo, na lama ou simplesmente fora do chão praticamente nenhum torque pode ser transmitido a ela, porque ela girará mais e mais rápido até que parte do mecanismo se quebre (CROLA, 2009). Como o diferencial atua como um divisor de torque, isso significa que virtualmente nenhum torque pode ser transmitido para a outra roda. As engrenagens giram impotentes, a roda escorregadia gira descontroladamente e a outra, a roda "boa" simplesmente para de girar (CROLA, 2009). O problema é mais sério para dois tipos de motoristas um que usa um veículo fora da estrada, onde lama e condições geralmente escorregadias são encontradas, e o motorista de competição que precisa manter a tração em todos os momentos para manter velocidades competitivas. Para o motorista off-road, o principal requisito é continuar e a maneira mais simples de fazer isso é fornecer a ele alguns meios de bloquear o diferencial.

Na prática, um bloqueio do diferencial funciona tanto pela embreagem das engrenagens do eixo de acionamento quanto pela caixa do diferencial, forçando-o a girar na mesma velocidade do próprio invólucro ou travando as engrenagens do diferenciado de modo que não possam girar nos eixos (novamente forçando os veios de transmissão a rodar na mesma velocidade) (CROLA, 2009).

Muitos problemas comuns com diferenciais podem se transformar em grandes problemas se não lidar com eles de maneira oportuna (SENAI, 2001).

Mais importante, um diferencial comprometido pode impactar negativamente na segurança do motorista ao volante e passageiros, dificultando a mudança de direção (SENAI, 2001). Um diferencial com defeito também pode travar as rodas do carro, o que pode colocar o motorista em uma situação perigosa se isso acontecer enquanto estiver no trânsito. Na Figura 23 podemos ver o conjunto pinhão e coroa com os dentes desgastados.

Figura 23 - Pinhão e coroa desgastados



Fonte: <http://www.differentials.com/technical-help-2/failure-analysis/> acesso em 05 de março de 2019

O diferencial é composto de muitas engrenagens com dentes entrelaçados entre si (CROA, 2009). A eficácia de sua função depende da precisão com que essas engrenagens são organizadas e orientadas em relação uma à outra. Se, por exemplo, a lubrificação se mantiver baixa no mecanismo ou a disposição das engrenagens ficar fora do lugar, ocorre um ruído incomum (CAINES, 2004). Engasgos e ruídos de rolamentos são ruídos que devem ser uma preocupação para os proprietários de veículos.

Podemos listar alguns problemas mais comuns e de fácil identificação que podem ocorrer no diferencial.

Um dos principais problemas é o ruído, resultante do atrito entre as engrenagens internas do mecanismo diferencial. Este ruído é mais um tipo de rosnado e fica mais alto quando você entra em uma curva. A razão para o ruído pode ser uma queda nos níveis de óleo lubrificante do diferencial (CAINES, 2004). Se não for verificado, esse problema pode crescer, resultando em uma

falha completa e reparo importante do carro. Portanto, ao menor sinal de ruído, é melhor fazer com que o mecanismo seja verificado por um mecânico de automóveis (SENAI, 2001).

Outro problema comum, que muitas vezes passa despercebido, é o vazamento de óleo lubrificante (CAINES, 2004). Como discutido no ponto anterior, se os níveis de lubrificante caírem, então o atrito entre as engrenagens aumenta. Se o óleo lubrificante ficar com pouca carga ou ficar excessivamente sujo, poderá fazer com que as engrenagens vibrem ou façam ruído incomum ao girar (CAINES, 2004). Durante um período de tempo, isso pode levar a um grande desgaste nas engrenagens (CAINES, 2004). É por isso que é necessário verificar o vazamento de fluido, se ocorrer. Se o nível de óleo lubrificante tiver caído substancialmente, poderá ocorrer ruído (SENAI, 2001). Deve-se reabastecer imediatamente os níveis de fluido para o normal, para evitar qualquer desgaste adicional.

Um outro problema comum que pode ser causado pelo superaquecimento devido à lubrificação deficiente das engrenagens é identificado por um odor ardente característico (CAINES, 2004). O odor pode estar vindo do vazamento de óleo lubrificante. O óleo muito velho não pode lubrificar adequadamente as partes móveis, fazendo com que os componentes de metal queimem o óleo em alta temperatura (CAINES, 2004). Na Figura 24 podemos ver um diferencial danificado com óleo lubrificante envelhecido em seu interior.

Figura 24 - Diferencial danificado



Fonte: <https://www.digitalcorvettes.com/forums/showthread.php?t=278666> acesso em 15 de março de 2019

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo possibilitou a compreensão da maneira mais simplificada possível do que é e como funciona um diferencial automotivo. Em relação aos objetivos propostos no início desse trabalho, o autor tenta explicitar ao máximo a situação à qual está inserido ao expor seus pensamentos em relação ao estudo e busca expor, clarear e separar ao máximo cada parte da análise a fim de que o entendimento do assunto para que quem deseja também realizar um estudo semelhante.

Ao decorrer do trabalho realizado foram abordados desde a criação do que se conhece como diferencial moderno, os processos de fabricação em que seus componentes são submetidos, as variações e aplicações do diferencial, seus componentes internos e como eles funcionam até os possíveis problemas que podem ocorrer em um diferencial.

Apesar do objetivo final ter sido obtido algumas limitações para a realização desse estudo foram encontradas. O tempo curto para a realização de um trabalho mais aprofundado em relação as outras variações do diferencial, a falta de literatura nacional com o tema específico como também para a área automobilística em geral.

Por fim, em geral, a proposta apresentada aqui cumpre seu papel de situar o leitor que não está acostumado a ter contado com a área automobilista e, também, de guiar a outros a continuidade do estudo realizado até mesmo para outros componentes de um veículo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEIKMANN, Randy. **Physics for Gearheads: An Introduction to Vehicle Dynamics, Energy, and Power - With Examples from Motorsports**, Cambridge, MA, Bentley Publishers, 2015.

CAINES, Arthur J.; HAYCOCK, Roger F. **Automotive Lubricants Reference Book**, 2. ed. Warrendale, PA, EUA, Society of Automotive Engineers, 2004.

CHOCHOLEK, S. E. **The development of a differential for the improvement of traction control**. Disponível em:

<<http://faq.ford77.ru/trans/torsendifferential.htm>> Acesso em: 11 de janeiro de 2019.

CROLA, David A. **Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body**, Oxford, UK, Elsevier, 2009.

CROUSE, William H.; ANGLIN, Donald L. **Automotive Mechanics**, 10. ed. New York, NY, McGraw-Hill, 1993.

FILETCHER, David. **Cromwell Tank: Vehicle History and Specifications**, Dorset, UK, HMSO, 1983.

GAWANDE, S. H. **Design, Manufacturing & Analysis of Differential Crown Gear and Pinion for MFWD Axle**. Disponível em:

<<http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/RDME-Volume2/RDME-20.pdf>> Acesso em: 25 de janeiro de 2019.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**, 3. ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, INC. 2007.

HEISSING, Bernhard; ERSOY, Metin. **Chassis Handbook – Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives**, Brunswick, Germany, Vieweg+Teubner, 2011.

JAZAR, Reza N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application**, New York, NY, Springer, 2008.

KNOWLES, Don. **Today's Technician: Automotive Suspension and Steering Systems**, 2. ed. Boston, MA, Cengage Learning, 1999.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA, EUA: Society of Automotive Engineers, 1995.

MORELLO, L.; ROSSINI, L. Rosti; PIA, G.; TONOLI, A. **The Automotive Chassis: Volume 1 – Components Design**, New York, NY, Springer, 2011.

MORELLO, L.; ROSSINI, L. Rosti; PIA, G.; TONOLI, A. **The Automotive Chassis: Volume 2 – Components Design**, New York, NY, Springer, 2011.

PACEIKA, H. B. **Tire and Vehicle Dynamics**, 2. ed. Warrendale, PA, EUA, Society of Automotive Engineers, 2002.

PROVATIDIS, Christopher G. **A Critical Presentation of Tsiriggakis' Gearless Differential. Mobility & Vehicles Mechanics**. 2. ed. New York, NY, Springer (2003).

RAPOSO, Nilton; SRIVASTAVA, Jayesh; SULTAN, Farhan, **Design of the differential unit for the 2006/2007 pace vehicle**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228823542_DESIGN_OF_THE_DIFFERENTIAL_UNIT_FOR_THE_20062007_PACE_VEHICLE> Acesso em: 16 de janeiro de 2019.

SENAI, SP. **Sistema de transmissão**. São Paulo, 2001, 54p. it (Formação básica, 13)

SHIGLEY, Joseph E; BUDYMAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Projeto de engenharia mecânica**. Tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar 7. ed. Porto Alegre, RS, Bookman, 2005.

STONE, Richard; BALL, Jeffrey K. **Automotive Engineering Fundamentals**, SAE - International, 2004.

WAN, Mark. **Technology breakthrough**. Disponível em:
<https://www.autozine.org/911/911_9.htm> Acesso em: 05 de fevereiro de 2019.