

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Engrenagens por metalurgia do pó para veículo Baja SAE: projeto,
fabricação e avaliação**

Rodrigo Hideo Nishimura

São Paulo
2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Engrenagens por metalurgia do pó para veículo Baja SAE: projeto,
fabricação e avaliação**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Rodrigo Hideo Nishimura

Orientador: Amilton Sinatora

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2014

Nishimura, Rodrigo Hideo

Engrenagens por metalurgia do pó para veículo Baja SAE: projeto, fabricação e avaliação / R.H. Nishimura. - São Paulo, 2014.

75 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Engrenagens 2.Metalurgia do pó 3.Veículos de competição
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

Aos meus pais e irmã pelo apoio ao longo da
minha vida e à minha namorada Mariana pelo
carinho e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Amilton Sinatora pela orientação e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Roberto Martins de Souza e ao professor Dr. Deniol Katsuki Tanaka, que auxiliaram com sugestões ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, em especial ao Mário Monteiro, pelo apoio desde o início do trabalho e pelas sugestões dadas ao longo de sua elaboração.

À Höganäs do Brasil Ltda., primeiramente pelo fornecimento material sinterizado para realização do trabalho. Aos que direta ou indiretamente permitiram e incentivaram meu aprendizado, que pôde ser aplicado nesse trabalho – Claudinei Marchetto Reche, Adriano Fernandes Machado, Henrique Duarte Lopes, Luiz Roberto Imparato, Julio Cezar da Costa Carmazen e muitos outros colaboradores dessa empresa. Ao Hernando Ibarros e ao Henrique Chiquetto pelo auxílio nas análises de carbono e análises metalográficas.

À Ifer Estamparia e Ferramentaria Ltda. pela usinagem do corpo das engrenagens.

À Mecânica Buker Ltda. pela usinagem dos dentes das engrenagens.

Ao Grupo Combustol & Metalpó pela realização dos tratamentos térmicos e ensaio de dureza nas engrenagens.

À Mitutoyo Sul Americana Ltda., em especial ao Marcelo Mainetti, consultor técnico, e ao Nelson da Cunha Pinto Filho, gerente de promoção técnica, pelas medições realizadas nas engrenagens.

Aos colegas da Equipe Poli de Baja pelo companheirismo e dedicação na realização dos testes realizados na elaboração deste trabalho.

RESUMO

O processo “metalurgia do pó” tem ganhado destaque frente à crescente pressão por redução de custos e padrões ambientais, por apresentar alto aproveitamento de recursos materiais e energéticos, com custos altamente competitivos em larga escala. Apesar de já ser largamente utilizado, o desafio na atualidade é produzir componentes estruturais muito solicitados, como engrenagens automotivas. Para atingir esse objetivo, foram desenvolvidos processos como o HIP (Compactação Isostática a Quente, em inglês), que resulta na densificação total do material e, portanto, melhores propriedades. O objeto de estudo é a engrenagem da transmissão de um veículo do tipo Baja SAE, que originalmente foi projetada para ser fabricada a partir do aço SAE 8620. Após análises preliminares, essa engrenagem foi refabricada utilizando um blanque fabricado pelo HIP a partir da mistura de pós Astaloy™ 85 Mo + 0,28% C. Outra engrenagem também foi fabricada a partir do aço SAE 8620 para servir de referência. Após a fabricação, as engrenagens passaram por análises como ensaio de dureza e medição dos perfis dos dentes, que foram comparados com o perfil evolvente. As engrenagens foram testadas no próprio veículo Baja SAE em um enduro de resistência por um período de 8 horas cada sem apresentarem falhas ou sinais visíveis de fadiga. Posteriormente, os componentes passaram por nova medição dos perfis, que não apontou deformação significativa. Também foram realizadas análises metalográficas nos dentes, que mostraram estrutura martensítica com elevado teor de carbono na superfície para ambas, enquanto que, no núcleo, a engrenagem sinterizada apresentou estrutura martensítica com baixo teor de carbono e a engrenagem fabricada a partir de aço convencional apresentou estrutura bainítica com regiões ferríticas. Os resultados obtidos apontam para a validação da utilização do aço sinterizado analisado em engrenagens da transmissão de veículos do tipo Baja SAE.

ABSTRACT

The process “powder metallurgy” has gained prominence with the rising pressure for cost reduction and environmental issues, due to its high material and energetic resources utilization, with highly competitive costs when applied for mass production. Even though it is already widely used, the challenge nowadays is to produce high strength structural components, such as automotive gears. To achieve this objective, processes are being developed, such as HIP (Hot Isostatic Pressing), that results in the total densification of the material and, therefore, better properties.

The object of study is the gear of the transmission a Baja SAE vehicle, which was originally designed to be manufactured from SAE 8620 steel. After preliminary analyses, this gear was remanufactured utilizing a blank made by HIP from the powder mix Astaloy™ 85 Mo + 0,28% C. Another gear was also manufactured from SAE 8620 steel to serve as reference. After manufacturing, the gears underwent analyses such as hardness testing and measurement of teeth profile, which were compared to the involute profile. The gears were tested on the Baja SAE vehicle in an endurance test for a period of 8 hours each without presenting failures or visible signs of fatigue. Then, the components underwent remeasurement of teeth profile, which did not pointed out any significant deformation. Metallographic analyses of the teeth were also made, which showed a martensitic structure with a high carbon content at the case in both, while, at the core, the sintered gear showed a martensitic structure with low carbon content and the gear manufactured from conventional steel showed bainitic structure with ferritic regions. The results point to the validation of the utilization of the analyzed sintered steel for transmission gears of Baja SAE vehicles.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Protótipo Baja SAE da Equipe Poli de Baja..... | 15 |
| Figura 2 - Engrenagens cilíndricas: dentes retos (a); engrenagem interna (b); com cremalheira (c); dentes inclinados (d); engrenagem dupla de dentes inclinados (e); dentes em V (f)..... | 16 |
| Figura 3 - Engrenagens cônicas: dentes retos (a); dentes inclinados (b); dentes curvos (c); engrenagens cônicas descentradas (hipoides)..... | 17 |
| Figura 4 - Engrenagens helicoidais (a) e parafuso sem-fim (b) | 17 |
| Figura 5 - Nomenclatura para dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos | 18 |
| Figura 6 - Linha de pressão, representada pela linha <i>ab</i> | 19 |
| Figura 7 - Decomposição da força de engrenamento <i>F</i> | 20 |
| Figura 8 - Ilustração fotoelástica de tensões no dente de uma engrenagem | 20 |
| Figura 9 - Carregamento do dente de uma engrenagem como uma viga em balanço | 21 |
| Figura 10 - Distribuição de tensões para flancos de dentes | 22 |
| Figura 11 - Fluxograma de fabricação de uma peça por metalurgia do pó..... | 24 |
| Figura 12 - Comparação do consumo de energia e aproveitamento de matéria-prima entre a metalurgia do pó e outros processos de manufatura..... | 25 |
| Figura 13 - Representação esquemática do processo de atomização em água | 26 |
| Figura 14 - Tipos de misturadores por gravidade ou difusão: (a) Rotativo cilíndrico, (b) Cubo rotativo, (c) Duplo cone, (d) Dupla concha ou tipo “V”..... | 27 |
| Figura 15 - Misturador Nauta..... | 27 |
| Figura 16 - Sequência de operações de compactação de ação simples: (a) Posição de enchimento, (b) Posição de compactação, (c) Posição de extração | 28 |
| Figura 17 - Tipos de compactação em matriz rígida: (a) Ação simples, (b) Dupla ação, (c) Com matriz flutuantes, (d) Com sistema de retirada..... | 29 |
| Figura 18 - Representação esquemática da sinterização de três partículas: (a) pontos originais de contato, (b) crescimento do pescoço, (c) e (d) arredondamento dos poros | 30 |
| Figura 19 - Forno contínuo de esteira e suas seções | 30 |
| Figura 20 - Ensaio metalográfico da superfície densificada de uma engrenagem de dentes retos. A profundidade da região densificada é de 0,3 mm..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 - Processo de rolagem de uma engrenagem de dentes helicoidais | 32 |
| Figura 22 - Propriedades do cobre puro | 33 |
| Figura 23 - Massa média de componentes fabricados pela metalurgia do pó por veículo (kg/veículo) ao longo dos anos..... | 34 |
| Figura 24 - Aplicações atuais da metalurgia do pó em automóveis: peças de motor (a); peças de sistema de direção (b); peças de sistema de transmissão (c); peças extras (d); peças de amortecedor (e); peças do sistema elétrico de um automóvel (f) | 35 |
| Figura 25 - Veículo de <i>rally</i> com caixa de mudanças com engrenagens sinterizadas. | 36 |
| Figura 26 - Representação do trem de força do protótipo..... | 37 |
| Figura 27 - Representação do interior da caixa de transmissão do protótipo. | 38 |
| Figura 28 - Representação da engrenagem escolhida para os estudos..... | 38 |
| Figura 29 - Análise estrutural da engrenagem convencional utilizando o método de elementos finitos. | 40 |
| Figura 30 - Imagem de uma partícula de pó de Astaloy™ 85 Mo obtida através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) | 41 |
| Figura 31 - Esquematização da compactação isostática a quente | 42 |
| Figura 32 - Modelo do aparelho utilizado nas análises de carbono através do método de combustão direta..... | 43 |
| Figura 33 - Curvas de tensões limite de escoamento e de resistência em função da densidade e da quantidade de carbono | 44 |
| Figura 34 - Curvas adaptadas de tensões limite de escoamento e de resistência em função da densidade e da quantidade de carbono | 44 |
| Figura 35 - Engrenagens torneadas e com os alívios de massa fresados (engrenagem sinterizada à esquerda e engrenagem convencional à direita). | 45 |
| Figura 36 - Etapas de fabricação das engrenagens..... | 46 |
| Figura 37 - Engrenagens finalizadas (engrenagem convencional à esquerda e engrenagem sinterizada à direita)..... | 46 |
| Figura 38 - Caixa de transmissão montada com a engrenagem sinterizada..... | 47 |
| Figura 39 - Curva de temperabilidade de um aço 1020 carbonitretado a 900 °C comparado a uma curva para o mesmo aço cementado a 925 °C | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 40 - Microdurômetro utilizado na determinação da microdureza superficial dos componentes. | 49 |
| Figura 41 - Máquina de medir coordenadas utilizada na medição do perfil dos dentes das engrenagens. | 50 |
| Figura 42 - Esquema da pista de testes. | 52 |
| Figura 43 - Amostra de uma das engrenagens preparada para a análise metalográfica. | 53 |
| Figura 44 - Modelo do microscópio utilizado nas análises metalográficas | 54 |
| Figura 45 - Ponto de medição de dureza na engrenagem convencional. | 56 |
| Figura 46 - Medição do perfil dos dentes de uma das engrenagens..... | 57 |
| Figura 47 - Perfil completo da engrenagem convencional antes dos testes..... | 57 |
| Figura 48 - Comparação entre o perfil dos dentes da engrenagem convencional (preto) e o perfil evolvente (azul)..... | 58 |
| Figura 49 - Comparação entre o perfil dos dentes da engrenagem sinterizada (preto) e o perfil evolvente (azul). | 58 |
| Figura 50 - Processo de geração dos dentes de uma engrenagem..... | 59 |
| Figura 51 - Veículo Baja SAE durante a simulação da prova de enduro de resistência. | 60 |
| Figura 52 - Trinca visível devido à fadiga de contato..... | 60 |
| Figura 53 - Dentes das engrenagens após os testes: engrenagem sinterizada à esquerda e engrenagem convencional à direita. | 61 |
| Figura 54 - Comparação entre os perfis de um dente da engrenagem sinterizada referentes a antes dos testes (preto) e após os testes (azul)..... | 62 |
| Figura 55 - Comparação entre os perfis de um dente da engrenagem convencional referentes a antes dos testes (preto) e após os testes (azul)..... | 62 |
| Figura 56 - Análise metalográfica de um dente da engrenagem sinterizada a um aumento de 50x. | 63 |
| Figura 57 - Análise metalográfica da camada carbonitretada de um dente da engrenagem sinterizada a um aumento de 100x. | 65 |
| Figura 58 - Análise metalográfica da região do núcleo de um dente da engrenagem sinterizada a um aumento de 200x. | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 59 - Análise metalográfica de um dente da engrenagem convencional a um aumento de 50x. | 67 |
| Figura 60 - Análise metalográfica da camada carbonitretada da engrenagem convencional a um aumento de 100x. | 68 |
| Figura 61 - Faixa de dureza das diferentes fases do aço | 68 |
| Figura 62 - Análise metalográfica da região do núcleo da engrenagem convencional a um aumento de 200x. | 69 |
| Figura 63 - Comparação entre análises de tensões atuantes na base de dentes com perfis redesenhados (b, c, d) e o perfil original (a)..... | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química do aço SAE 8620..... | 39 |
| Tabela 2 - Conversão dos valores de dureza para aços não-austeníticos (faixa de dureza Rockwell C)..... | 55 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | OBJETIVO | 15 |
| 1.2 | PROJETO BAJA SAE | 15 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 16 |
| 2.1 | ENGRENAGENS | 16 |
| 2.1.1 | Dimensionamento | 19 |
| 2.1.1.1 | Esforços | 19 |
| 2.1.1.2 | Dimensionamento dos dentes da engrenagem | 20 |
| 2.1.1.3 | Dimensionamento do corpo da engrenagem..... | 22 |
| 2.2 | METALURGIA DO PÓ..... | 23 |
| 2.2.1 | Fabricação de pós metálicos..... | 26 |
| 2.2.2 | Mistura | 26 |
| 2.2.3 | Compactação | 28 |
| 2.2.4 | Sinterização | 29 |
| 2.2.5 | Operações posteriores | 31 |
| 2.2.5.1 | Calibragem..... | 31 |
| 2.2.5.2 | Usinagem | 31 |
| 2.2.5.3 | Densificação superficial..... | 31 |
| 2.2.6 | Propriedades | 33 |
| 2.2.7 | Aplicação na indústria automobilística | 33 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 37 |
| 3.1 | TREM DE FORÇA | 37 |
| 3.2 | ENGRENAGEM CONVENCIONAL | 38 |
| 3.3 | ENGRENAGEM SINTERIZADA..... | 40 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.3.1 | Material | 40 |
| 3.3.1.1 | Análise de carbono no material | 42 |
| 3.3.1.2 | Obtenção das tensões limite..... | 44 |
| 3.4 | FABRICAÇÃO | 45 |
| 3.4.1 | Tratamento térmico | 47 |
| 3.5 | AVALIAÇÕES ANTES DOS TESTES | 49 |
| 3.5.1 | Ensaio de dureza | 49 |
| 3.5.2 | Medição do perfil dos dentes | 50 |
| 3.6 | TESTES..... | 51 |
| 3.7 | AVALIAÇÕES APÓS OS TESTES | 52 |
| 3.7.1 | Análise metalográfica..... | 52 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 55 |
| 4.1 | ENSAIO DE DUREZA..... | 55 |
| 4.2 | COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS DENTES COM O PERFIL EVOLVENTE | 56 |
| 4.3 | TESTES..... | 59 |
| 4.4 | ANÁLISE VISUAL | 60 |
| 4.5 | COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS DENTES DE ANTES E APÓS OS TESTES | 61 |
| 4.6 | ANÁLISES METALOGRÁFICAS | 63 |
| 5 | CONCLUSÕES | 70 |
| | REFERÊNCIAS..... | 72 |

1 INTRODUÇÃO

Após décadas de desenvolvimento econômico desvinculado das questões ambientais, finalmente tem sido observada uma mudança no modo de pensar da sociedade moderna, que passou a definir e impor padrões ambientais às indústrias. Por outro lado, há também uma pressão das empresas por redução de custos para que possam investir mais que seus concorrentes e, ao mesmo tempo, manterem boas margens de lucro.

Em meio a interesses conflitantes, pesquisadores e empresas têm investido na procura de produtos e processos mais eficientes e com menor impacto ambiental e, ao mesmo tempo, baratos. Isso fez com que, na área da manufatura, as atenções da indústria voltassem para um processo denominado “metalurgia do pó”, que apresenta alto aproveitamento de recursos materiais e energéticos e custos altamente competitivos quando aplicado em larga escala.

Apesar de existirem indícios de que a metalurgia do pó já era utilizada em cerca de 300 A.C. (THÜMLER; OBERACKER, 1993), pode-se afirmar que o uso dessa tecnologia em larga escala teve início apenas na virada do século passado e que somente a partir da década de 60 passou a apresentar grande crescimento (ABREU, 2009).

Embora a aplicação da metalurgia do pó na indústria moderna seja recente, produtos fabricados através desse processo estão presentes em muitos produtos do cotidiano, sendo que a aplicação mais expressiva da metalurgia do pó é a indústria automobilística. Um carro produzido nos EUA, por exemplo, contém uma média de 18 a 19 kg de peças sinterizadas (LOBERTO et al., 2010).

O desafio na atualidade é produzir através da metalurgia do pó alguns tipos de componentes estruturais muito solicitados, como engrenagens de caixas de transmissão automotivas. No entanto, com a melhoria das etapas do processo e dos ferramentais utilizados, mesmo essa barreira está sendo ultrapassada, sendo que já há casos de engrenagens sinterizadas que foram testadas em protótipos com sucesso.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho consiste em projetar, fabricar e testar uma engrenagem por metalurgia do pó da transmissão de um veículo Baja SAE, além de avaliá-la através da comparação com outra engrenagem fabricada do modo convencional, com o objetivo de verificar a possibilidade de aplicar a metalurgia do pó em engrenagens de veículos comerciais.

1.2 PROJETO BAJA SAE

Baja SAE é um veículo protótipo, monoposto e fora de estrada projetado e fabricado por estudantes para participar de competições promovidas pela Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE), que envolvem faculdades do mundo todo (Figura 1). A Equipe Poli de Baja, fundada em 2001, é a equipe de alunos que atualmente desenvolve o projeto na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



Figura 1 - Protótipo Baja SAE da Equipe Poli de Baja (PIRACICABA EM FESTA, 2013).

Durante a competição, cada equipe visa ter seu projeto aceito por um fabricante fictício. Para tanto, a competição avalia a qualidade do projeto como um todo, desde a segurança e conforto do veículo, seu potencial de produção em série e comercialização, a qualidade técnica do projeto e também o desempenho dinâmico do carro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENGRENAGENS

Entre os diversos tipos de transmissão de potência mecânica, as engrenagens estão entre as mais utilizadas. Essas distinguem-se pela transmissão de forças sem deslizamento, pela segurança de funcionamento e durabilidade, pela resistência a sobrecargas, pela baixa necessidade de manutenção, pelas dimensões reduzidas e pelo seu alto rendimento. Por outro lado, as transmissões por engrenagens apresentam maior custo e mais ruídos durante o funcionamento, além de ser uma transmissão relativamente rígida, havendo menor amortecimento dos choques (NIEMANN, 1971).

Existem diversos tipos de engrenagens, sendo que as mais comuns podem ser divididas a nível macro em engrenagens cilíndricas (Figura 2), engrenagens cônicas (Figura 3), engrenagens helicoidais e parafuso sem-fim (Figura 4).

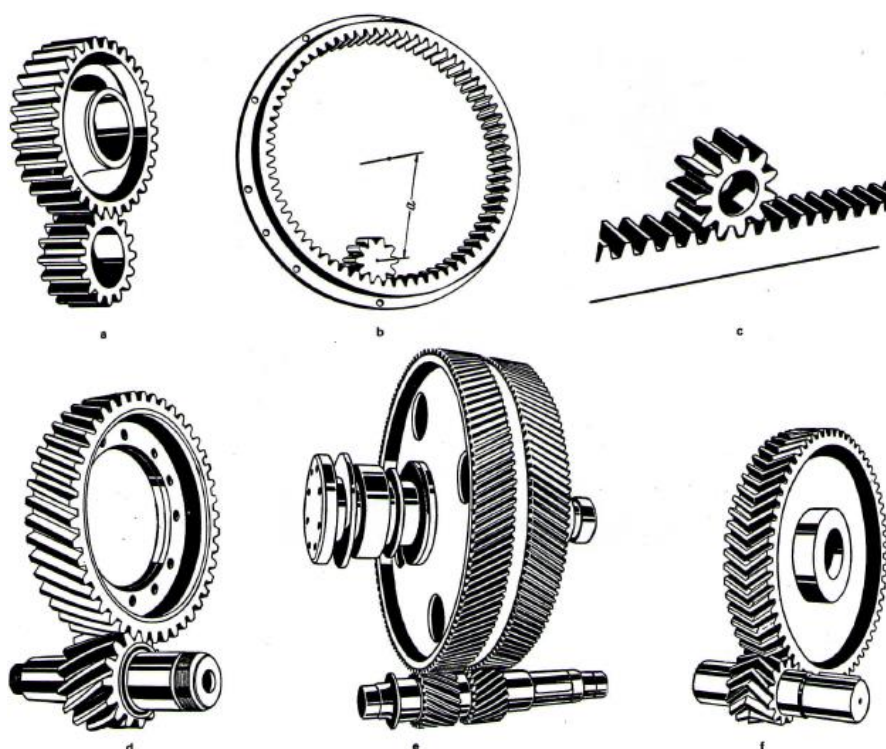


Figura 2 - Engrenagens cilíndricas: dentes retos (a); engrenagem interna (b); com cremalheira (c); dentes inclinados (d); engrenagem dupla de dentes inclinados (e); dentes em V (f) (NIEMANN, 1971).

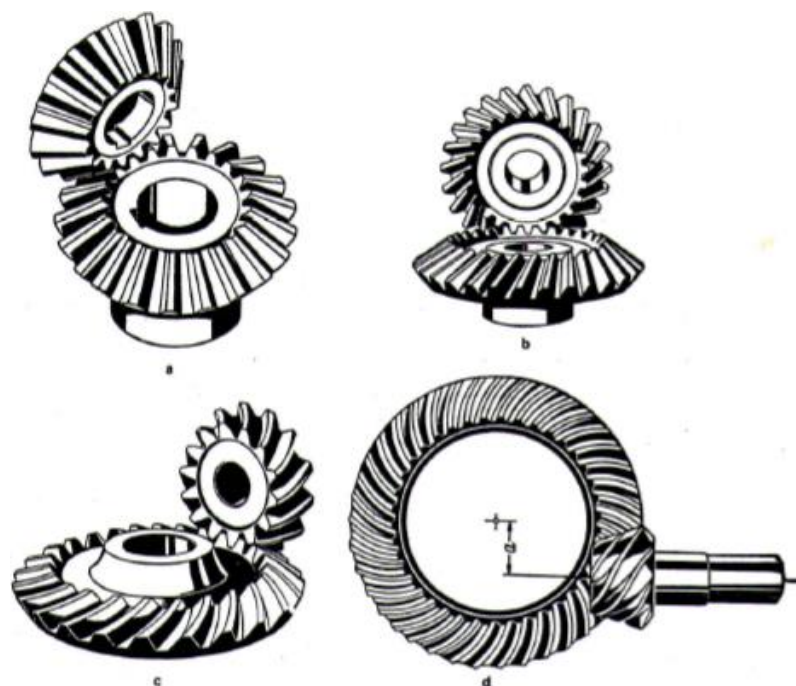


Figura 3 - Engrenagens cônicas: dentes retos (a); dentes inclinados (b); dentes curvos (c); engrenagens cônicas descentradas (hipoides) (NIEMANN, 1971).

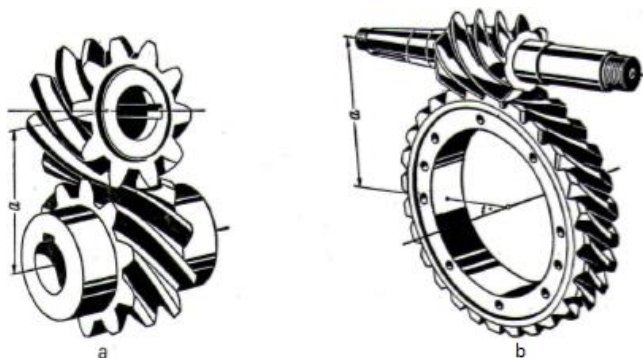


Figura 4 - Engrenagens helicoidais (a) e parafuso sem-fim (b) (NIEMANN, 1971).

Neste trabalho, serão discutidas apenas as engrenagens cilíndricas, mais especificamente as de dentes retos, por serem o objeto de estudo do trabalho.

A nomenclatura para dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos está ilustrada na Figura 5.

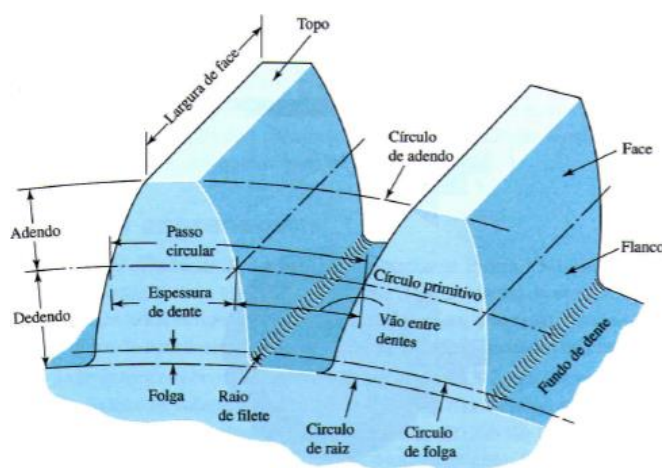


Figura 5 - Nomenclatura para dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

O círculo primitivo é um círculo teórico sobre o qual os cálculos geralmente se baseiam, sendo que os círculos primitivos de um par de engrenagens são tangentes entre si. O passo circular é a distância, medida no círculo primitivo, do ponto de um dente ao seu correspondente no dente adjacente, ou seja, é igual à soma da espessura de dente com a largura de espaçamento. O módulo é a razão entre o diâmetro primitivo e o número de dentes, sendo utilizado como índice de tamanho de dente. O adendo é a distância radial entre o topo do dente e o círculo primitivo, enquanto o dedendo é a distância radial entre o fundo do dente e o círculo primitivo (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Dessa forma, é possível chegar às relações 1 e 2:

$$m = \frac{d}{N} \quad (1)$$

$$p = \frac{\pi \cdot d}{N} = \pi \cdot m \quad (2)$$

em que: N = número de dentes;

d = diâmetro primitivo, em mm;

m = módulo, em mm;

p = passo circular, em mm.

2.1.1 Dimensionamento

2.1.1.1 Esforços

Um conceito importante para se determinar os esforços em engrenagens é o da linha de pressão. A linha de pressão é a linha tangente comum aos círculos de base, passando pelo ponto de tangência dos círculos primitivos P e está representada pela linha ab na Figura 6.

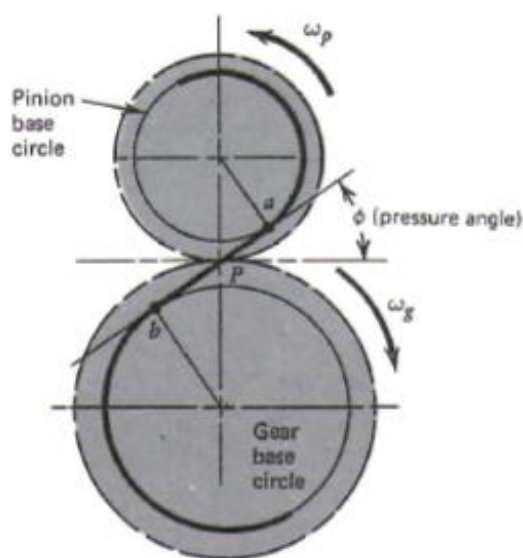


Figura 6 - Linha de pressão, representada pela linha ab (JUVINALL; MARSHEK, 1991).

Os dentes das engrenagens são desenhados de forma que a linha de pressão seja sempre perpendicular às superfícies dos dentes em contato, fazendo com que as reações entre dentes engrenados ocorram na mesma direção da linha de pressão (JUVINALL; MARSHEK, 1991).

Dessa forma, a força atuando em dentes engrenados pode ser decomposta no ponto de tangência dos círculos primitivos P em duas componentes, esquematizadas na Figura 7 (JUVINALL; MARSHEK, 1991):

- Força tangencial F_t , que, multiplicada pela velocidade tangencial do círculo primitivo, resulta na potência transmitida;
- Força radial F_r , que não realiza trabalho, mas atua no sentido de separar as engrenagens.

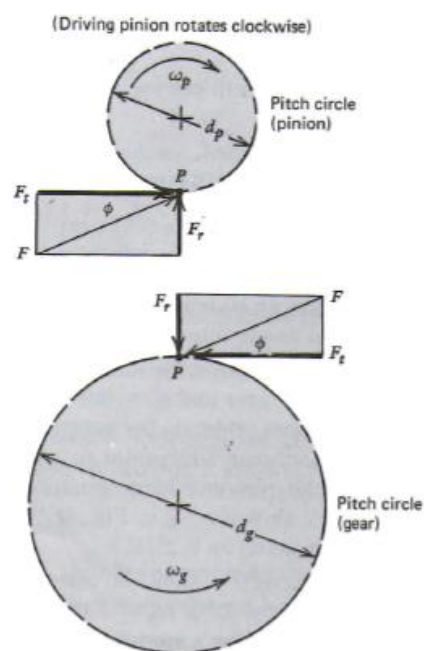


Figura 7 - Decomposição da força de engrenamento F (JUVINALL; MARSHEK, 1991).

2.1.1.2 Dimensionamento dos dentes da engrenagem

A Figura 8 mostra uma ilustração fotoelástica das tensões atuantes no dente de uma engrenagem. É importante ressaltar que as linhas são mais próximas onde as maiores tensões estiverem atuando. Isso ocorre em duas regiões: o ponto de contato com a outra engrenagem do par, onde a força F está atuando, e nos raios de arredondamento na base do dente (JUVINALL; MARSHEK, 1991).



Figura 8 - Ilustração fotoelástica de tensões no dente de uma engrenagem (JUVINALL; MARSHEK, 1991).

Deste modo, os dentes da engrenagem estudada foram dimensionados de acordo com o critério de Lewis e o critério de Hertz, sugeridos por norma da

American Gear Manufacturers Association (AGMA), que avaliam as tensões nas regiões mais solicitadas, descritas anteriormente.

O critério de Lewis avalia a tensão de flexão na base do dente da engrenagem. Nesse critério, considera-se que o dente é carregado como uma viga em balanço de dimensões transversais F e t , comprimento l e uma carga W^t uniformemente distribuída ao longo da largura da face F , como representado na Figura 9 (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

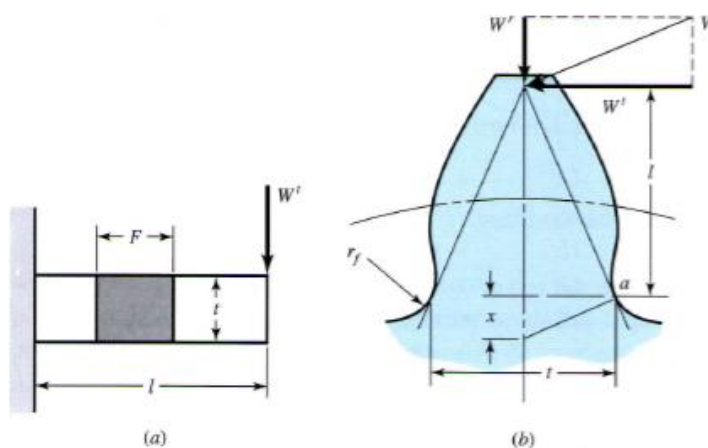


Figura 9 - Carregamento do dente de uma engrenagem como uma viga em balanço (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Basicamente, o critério assume as seguintes hipóteses simplificadoras (JUVINALL; MARSHEK, 1991):

- Todo o carregamento está sendo aplicado no topo de um único dente;
- O carregamento está distribuído uniformemente ao longo do dente;
- A componente radial da força é desconsiderada;
- As forças resultantes do atrito são desconsideradas.

Além disso, diversos outros fatores foram acrescentados ao método, como velocidade linear no diâmetro primitivo, precisão de fabricação, grau de recobrimento e tipo de aplicação. É importante ressaltar que dependendo da ocasião, alguma hipótese simplificadora pode ser aplicada diferentemente (JUVINALL; MARSHEK, 1991).

Já o critério de Hertz verifica a tensão de fadiga devido à pressão de contato nos dentes. Dessa forma, enquanto o critério de Lewis serve como base para analisar a tensão de flexão nos dentes, o critério de Hertz serve como base para analisar a durabilidade as superfície dos dentes (JUVINALL; MARSHEK, 1991).

Em seus estudos publicados em 1881, Hertz calculou a distribuição das tensões em sólidos elásticos de dimensões simples. O critério de Hertz para cálculo de tensões devido à pressão de contato em dentes de engrenagens é baseado nessa teoria (Figura 10).

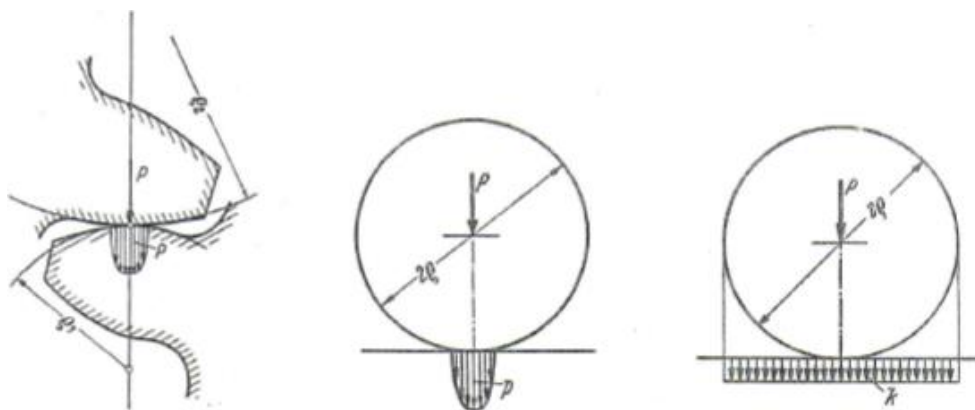


Figura 10 - Distribuição de tensões para flancos de dentes (NIEMANN, 1971).

Apesar de existirem diferenças na teoria de Hertz e a aplicação em engrenagens devido ao processo de rolamento, ao movimento de deslizamento e à pressão do lubrificante, a pressão calculada conserva o seu valor nas engrenagens para a primeira idealização da pressão de contato, e como grandeza comparativa para a solicitação local, que não pode ser determinada exatamente (NIEMANN, 1971).

2.1.1.3 Dimensionamento do corpo da engrenagem

Além do dimensionamento dos dentes, também é importante dimensionar o corpo da engrenagem. Principalmente em veículos de competição, como o Baja SAE, o alívio de massa e inércias rotativas é muito importante para melhorar seu desempenho. Para que seja possível projetar esses alívios sem que haja redução significativa no nível de confiabilidade da peça, o dimensionamento através da análise estrutural utilizando o método de elementos finitos é largamente empregado.

As análises estruturais foram realizadas no *software SolidWorks Simulation* principalmente pela facilidade de uso e por permitir o uso da ferramenta de elementos finitos em conjunto com a ferramenta de desenhos no mesmo ambiente de trabalho.

2.2 METALURGIA DO PÓ

A metalurgia do pó é um processo de fabricação de peças na qual são utilizados pós metálicos e não-metálicos como matéria-prima. A partir dos pós, é realizada a compactação pela aplicação de pressão no interior de matrizes, cujas cavidades correspondem à geometria e dimensões muito próximas às da peça final. Em seguida, é realizada a sinterização da peça compactada, que consiste no seu aquecimento, fazendo com que as partículas do material liguem-se, resultando na mudança de propriedades da peça, como maiores resistência mecânica, densidade e dureza. Algumas vezes ainda é necessário realizar alguns processos complementares após a sinterização, como usinagem ou tratamento térmico, para chegar ao produto final. O fluxograma completo do processo de metalurgia do pó está representado na Figura 11.

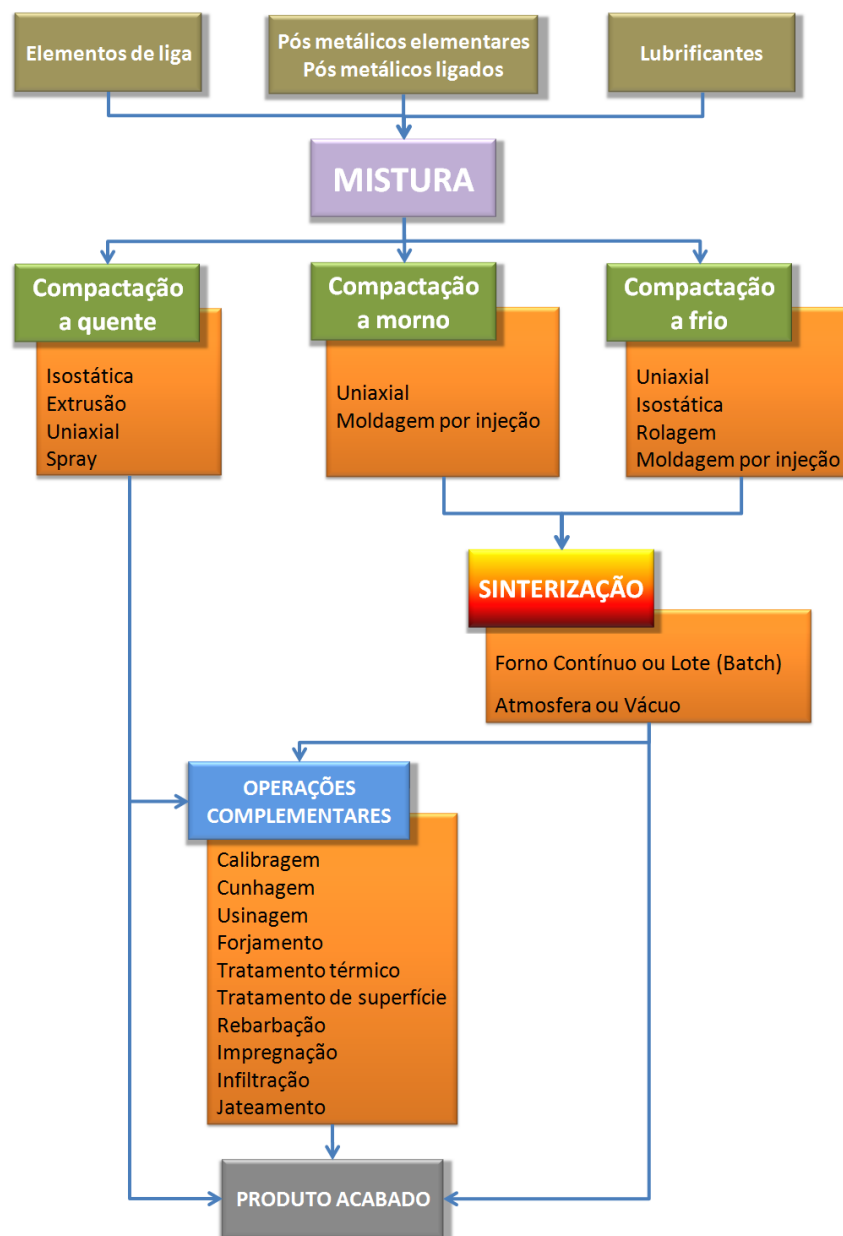


Figura 11 - Fluxograma de fabricação de uma peça por metalurgia do pó (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

A metalurgia do pó apresenta diversas vantagens em relação aos processos de manufatura convencionais, das quais se destacam (IERVOLINO, 2009; CHIAVERINI, 2001):

- Alto aproveitamento de matéria-prima e baixo consumo energético (Figura 12);

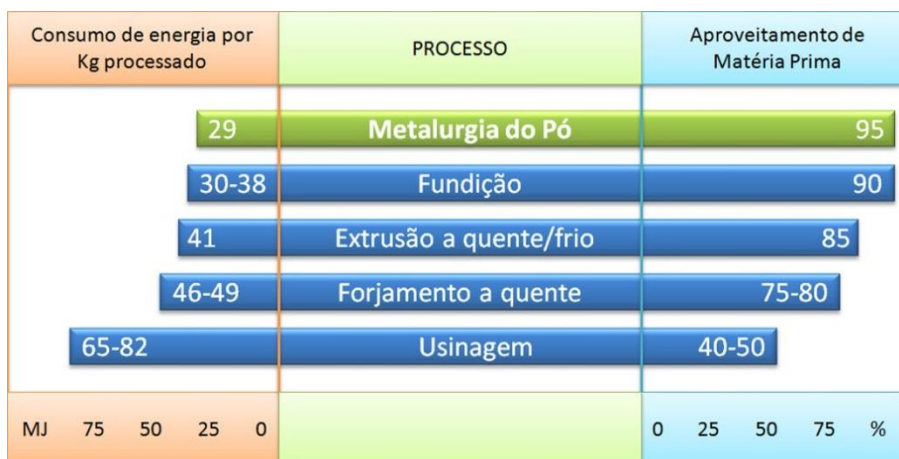


Figura 12 - Comparação do consumo de energia e aproveitamento de matéria-prima entre a metalurgia do pó e outros processos de manufatura (IERVOLINO, 2012).

- Ausência ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processo de fabricação;
- Eliminação ou minimização de refugo;
- Produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, geralmente sem necessidade de operações posteriores;
- Possibilidade de combinação de diversos elementos químicos, permitindo o controle sobre a microestrutura e as propriedades do material;
- Fonte de porosidade controlada, possibilitando a fabricação de mancais autolubrificantes e filtros metálicos, por exemplo;
- Produção de peças dentro de tolerâncias muito estreitas.

Existem, porém, algumas desvantagens e limitações da metalurgia do pó (CHIAVERINI, 2001):

- Para que o processo seja competitivo com as técnicas convencionais é necessário que a quantidade de peças produzidas seja muito grande devido ao alto custo do ferramental;
- Há limitações dimensionais, uma vez que à medida que as dimensões das peças aumentam, torna-se necessário o emprego de prensas de compactação cada vez maiores;
- Apresenta algumas limitações de forma da peça para que seja possível extraí-la da matriz.

2.2.1 Fabricação de pós metálicos

Há diversos métodos de fabricação de pós metálicos, intrinsecamente relacionados a características do material como geometria da partícula, tamanho das partículas e densidade (ORLANDIN, 2009). O método de atomização em água, em particular, está sendo largamente utilizado, principalmente devido à relativa facilidade de se produzir metais muito puros e pós pré-ligados diretamente do metal líquido (UPADHYAYA, A.; UPADHYAYA, G., 2011).

Na atomização em água, o metal líquido é vazado por um orifício no inferior de uma panela e é atingido por jatos de água de alta pressão. O filete de metal líquido então explode em finas partículas que são resfriadas rapidamente, solidificando e depositando-se no fundo da câmara de atomização. (ORLANDIN, 2009; CHIAVERINI, 2001). O processo de atomização em água está esquematizado na Figura 13.

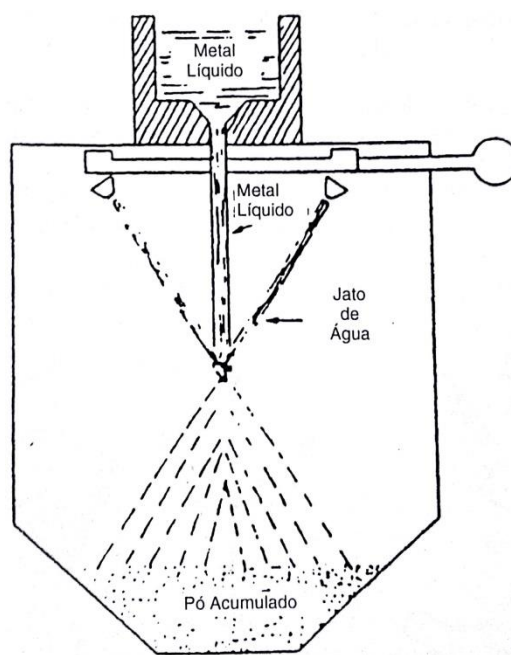


Figura 13 - Representação esquemática do processo de atomização em água (CHIAVERINI, 2001).

2.2.2 Mistura

Essa etapa consiste na mistura de todas as matérias-primas que irão compor o material sinterizado, o que inclui pós metálicos, elementos de liga e lubrificantes. A mistura deve atender à composição química especificada, além de se adequar às

demais propriedades desejadas, como densidade e escoabilidade (ORLANDIN; CARVALHO; PEGORER, 2009).

Existem diversos tipos de equipamentos que são utilizados atualmente para realizar a mistura de pós. Alguns tipos de misturadores que funcionam por gravidade ou difusão estão mostrados na Figura 14, sendo que os mais utilizados são os misturadores duplo cone e tipo “V”.

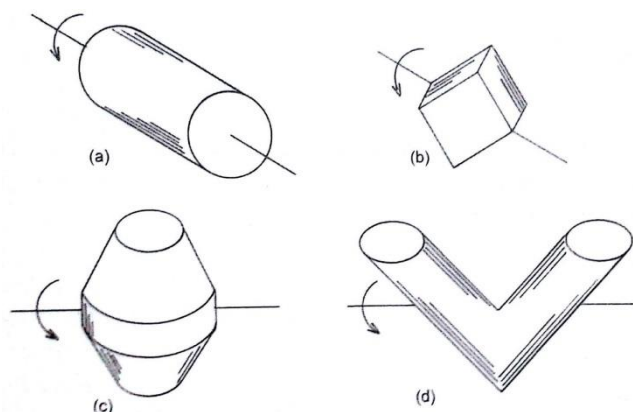


Figura 14 - Tipos de misturadores por gravidade ou difusão: (a) Rotativo cilíndrico, (b) Cubo rotativo, (c) Duplo cone, (d) Dupla concha ou tipo “V” (UPADHYAYA, A.; UPADHYAYA, G., 2011).

Também são muito utilizados misturadores em que a ação da mistura é criada por convecção, que são mais eficientes, como é o caso do misturador Nauta (ORLANDIN; CARVALHO; PEGORER, 2009). Nesse caso, a mistura é realizada a partir de 3 fatores: mistura axial realizada pela rotação da rosca, mistura radial favorecida pelo formato cônico do misturador, e mistura tangencial realizada pelo movimento de rotação do braço (HOSOKAWA MICRON B.V., 2014). O misturador Nauta está ilustrado na Figura 15.

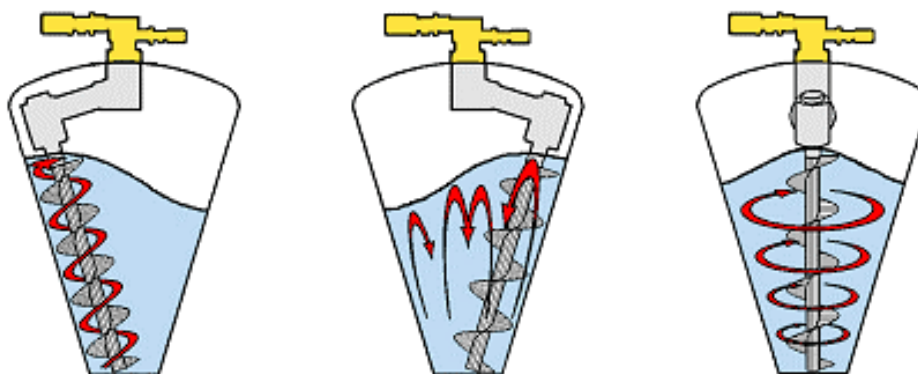


Figura 15 - Misturador Nauta (HOSOKAWA MICRON B.V., 2014).

2.2.3 Compactação

É a etapa em que o pó é prensado no formato desejado, conferindo as dimensões finais, ou aproximadamente finais da peça. É também a etapa mais crítica de todo o processo, visto que uma compactação mal feita pode levar a variações de densidade, podendo comprometer o desempenho do produto final (IERVOLINO; BULLA, 2009).

A operação de compactação inicia-se com o enchimento das cavidades da matriz com o pó. Em seguida, acontece a compactação do pó através do deslocamento dos punções em relação à matriz. Por último, o punção superior é retirado e a extração da peça verde, como é denominada a peça compactada antes da sinterização, é realizada. A sequência de operações em uma prensa de ação simples está esquematizada na Figura 16.

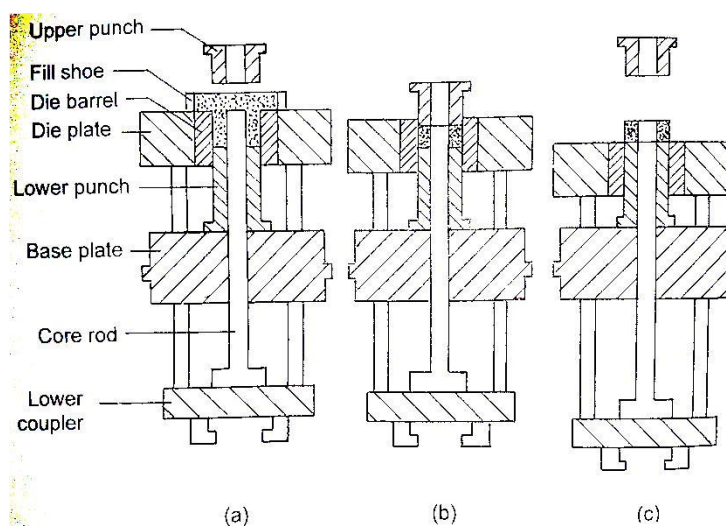


Figura 16 - Sequência de operações de compactação de ação simples: (a) Posição de enchimento, (b) Posição de compactação, (c) Posição de extração (UPADHYAYA, A.; UPADHYAYA, G., 2011).

Além do sistema de compactação de ação simples, existem outros tipos, que diferenciam-se pelo movimento que os punções superior e inferior e a matriz realizam um em relação ao outro. Os principais tipos estão ilustrados na Figura 17.

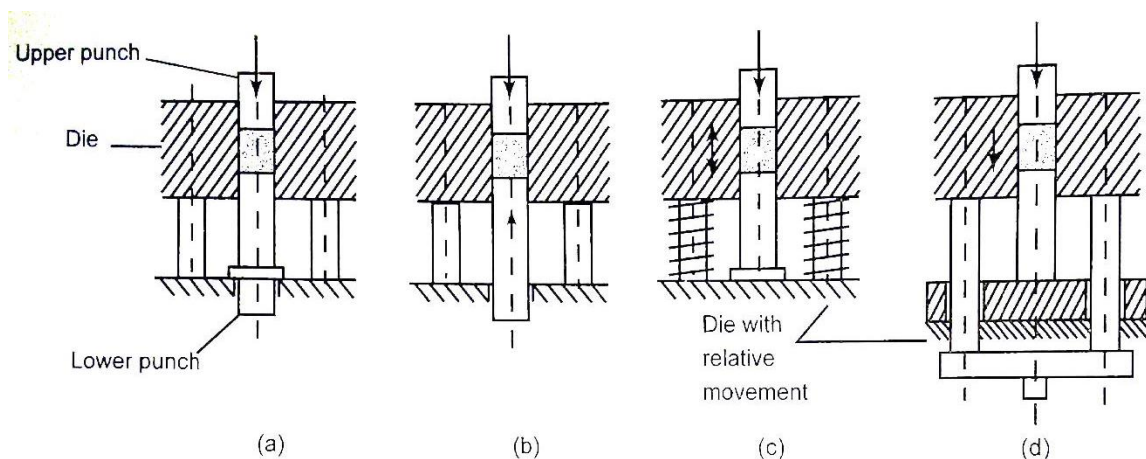


Figura 17 - Tipos de compactação em matriz rígida: (a) Ação simples, (b) Dupla ação, (c) Com matriz flutuantes, (d) Com sistema de retirada (UPADHYAYA, A.; UPADHYAYA, G., 2011).

Os punções devem ser fabricados de modo a ajustarem-se bem nas matrizes, com folga especificada. As folgas variam de 0,005 a 0,025 mm, dependendo da aplicação. O acabamento superficial de todos os componentes do ferramental deve ser de 0,10 μm (CHIAVERINI, 2001). A alta precisão necessária faz com que o custo do ferramental seja muito alto, fazendo com que a metalurgia do pó viabilize-se apenas quando o tamanho da produção seja muito grande.

2.2.4 Sinterização

A sinterização consiste no aquecimento das peças verdes a temperaturas elevadas, geralmente da ordem de $2/3$ a $3/4$ da temperatura de fusão do material da peça, sob condições controladas também de tempo e meio ambiente (CHIAVERINI, 2001).

Durante o processo ocorre a redução de energia livre do sistema através da diminuição da superfície específica do material, resultando na formação de grãos e crescimento de pescoço entre as partículas, levando o sistema à densificação e, conseqüentemente, à contração volumétrica. A representação esquemática do mecanismo de sinterização está ilustrada na Figura 18.

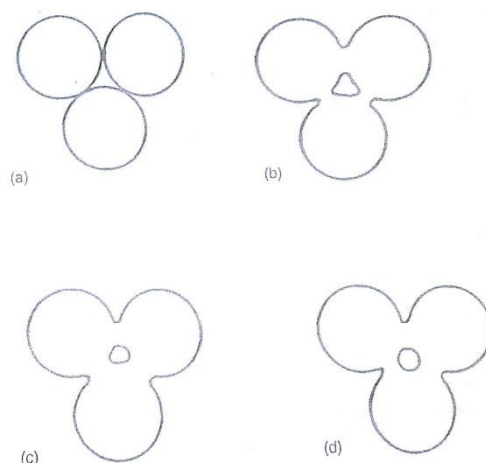


Figura 18 - Representação esquemática da sinterização de três partículas: (a) pontos originais de contato, (b) crescimento do pescoço, (c) e (d) arredondamento dos poros (CHIAVERINI, 2001).

Os fornos utilizados para a sinterização de peças são similares aos utilizados em operações de brasagem e tratamento térmico de aços, porém a temperatura para a sinterização é mais alta e é necessário um maior controle da atmosfera pois a peça tem uma maior área superficial devido à porosidade e, portanto, a reatividade entre a peça e a atmosfera é maior (LOBERTO; GENOVA; SILVA, 2009).

O tipo de forno mais utilizado é o contínuo devido à grande capacidade de carga e boa produtividade. Os fornos contínuos possuem quatro seções distintas: pré-aquecimento, sinterização, resfriamento lento e resfriamento final, como mostra a Figura 19.

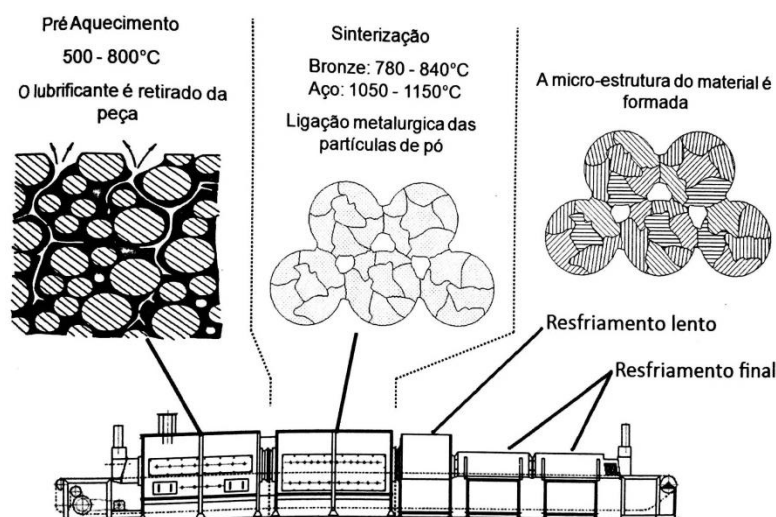


Figura 19 - Forno contínuo de esteira e suas seções (LOBERTO; GENOVA; SILVA, 2009).

2.2.5 Operações posteriores

Embora apenas através dos processos de compactação e sinterização seja possível obter peças com formas e dimensões definitivas, às vezes é necessário submetê-las a outras operações, visando, por exemplo, tolerâncias dimensionais mais estreitas ou melhores propriedades mecânicas. A seguir, estão apresentados apenas os principais processos aplicáveis a engrenagens sinterizadas:

2.2.5.1 Calibragem

A calibragem consiste na prensagem da peça sinterizada em uma ferramenta similar à utilizada durante o processo de compactação. A principal função da calibragem é melhorar as tolerâncias dimensionais da peça, visto que podem haver mudanças nas dimensões durante a sinterização. Em geral, as tolerâncias dimensionais finais chegam à classe IT 7 após a calibragem (BULLA, 2009).

Além da melhoria nas tolerâncias dimensionais, o processo de calibragem também possui outras vantagens, como aumento da densidade, redução da rugosidade e aumento da dureza (BULLA, 2009).

2.2.5.2 Usinagem

Como o processo de compactação, que é o que define o formato e as dimensões da peça, atua em uma única direção, algumas características exigem que o componente passe por um processo de usinagem posterior. Nesses casos, a usinagem é utilizada para, por exemplo, formar roscas, canais, furos laterais ou rebaixos perpendiculares à direção de prensagem.

2.2.5.3 Densificação superficial

A densificação superficial consiste na aplicação de tensões compressivas na superfície de um componente, reduzindo ou eliminando a porosidade na superfície no caso de um componente sinterizado, como mostra a Figura 20. Além de melhorar

as propriedades estáticas e dinâmicas do componente, a densificação superficial também melhora propriedades como módulo de Young, coeficiente de Poisson e resistência à fadiga (FLODIN; FORDÉN, 2004).

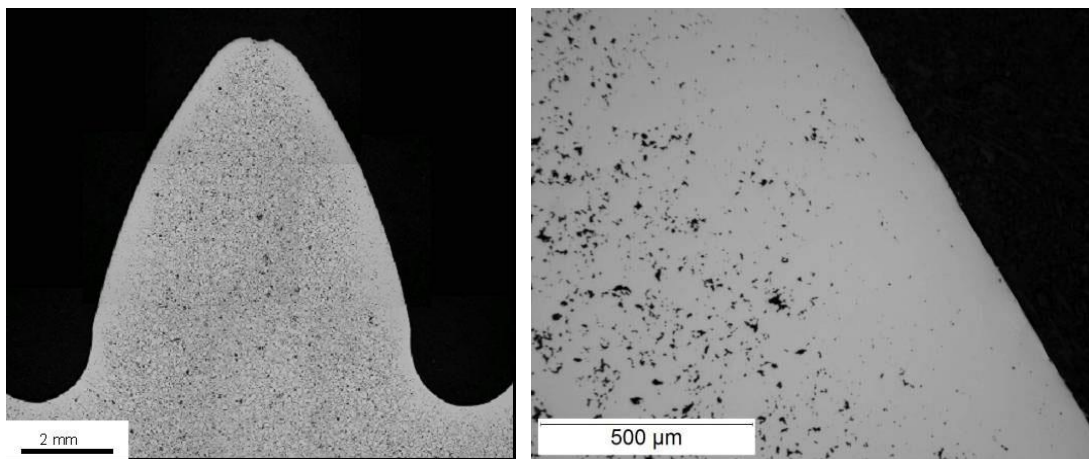


Figura 20 - Ensaio metalográfico da superfície densificada de uma engrenagem de dentes retos. A profundidade da região densificada é de 0,3 mm (BENGTTSSON; FORDÉN; SKOGLUND, 2005).

A densificação superficial é muito importante em engrenagens sinterizadas, em que as tensões máximas ocorrer na superfície ou logo abaixo desta, além de sofrerem fadiga de contato. Nas engrenagens, a densificação é realizada através do engrenamento e da rolagem da peça entre engrenagens-ferramenta, como mostra a Figura 21.

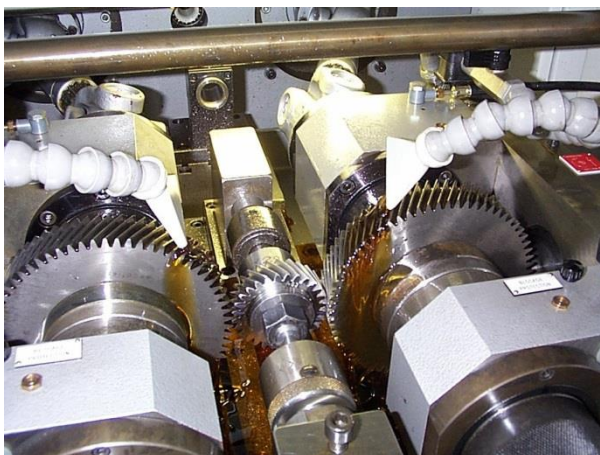


Figura 21 - Processo de rolagem de uma engrenagem de dentes helicoidais (BENGTTSSON; FORDÉN; SKOGLUND, 2005).

2.2.6 Propriedades

Em peças fabricadas por metalurgia do pó, as propriedades físicas e mecânicas são diretamente influenciadas pela densidade final do produto devido à porosidade do material.

À medida que a densidade do material varia em relação à densidade do material equivalente sem poros, as propriedades diminuem, como mostra o gráfico da Figura 22, que relaciona algumas propriedades do cobre em função de sua densidade.

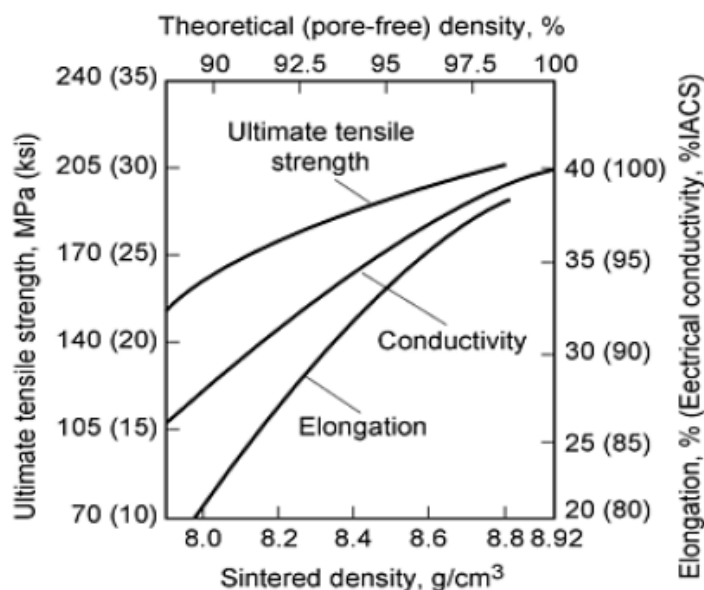


Figura 22 - Propriedades do cobre puro (LENEL, 1980).

É desejável, portanto, que a densidade de peças sinterizadas bastante solicitadas, como é o caso das engrenagens de câmbio automotivo, aproxime-se ao máximo da densidade do material convencional, de forma que suas propriedades sejam as melhores possíveis.

2.2.7 Aplicação na indústria automobilística

Apesar de a aplicação da metalurgia do pó na indústria em geral ser recente, produtos fabricados através desse processo estão presentes em muitas atividades do cotidiano. Alguns dos exemplos são peças de eletrodomésticos e ferramentas elétricas, buchas autolubrificantes, filamentos de tungstênio para lâmpadas, ímãs e

inclusive produtos de aplicações médicas e dentárias e nas indústrias alimentícia e farmacêutica.

A aplicação mais significativa da metalurgia do pó, no entanto, é a indústria automobilística, na qual é aplicado aproximadamente 70% do que é fabricado mundialmente e vem crescendo cada vez mais (IERVOLINO, 2011). A massa média utilizada por veículo varia conforme a região, porém é visível o crescimento do uso da metalurgia do pó ao longo dos anos na maioria dos países (Figura 23).

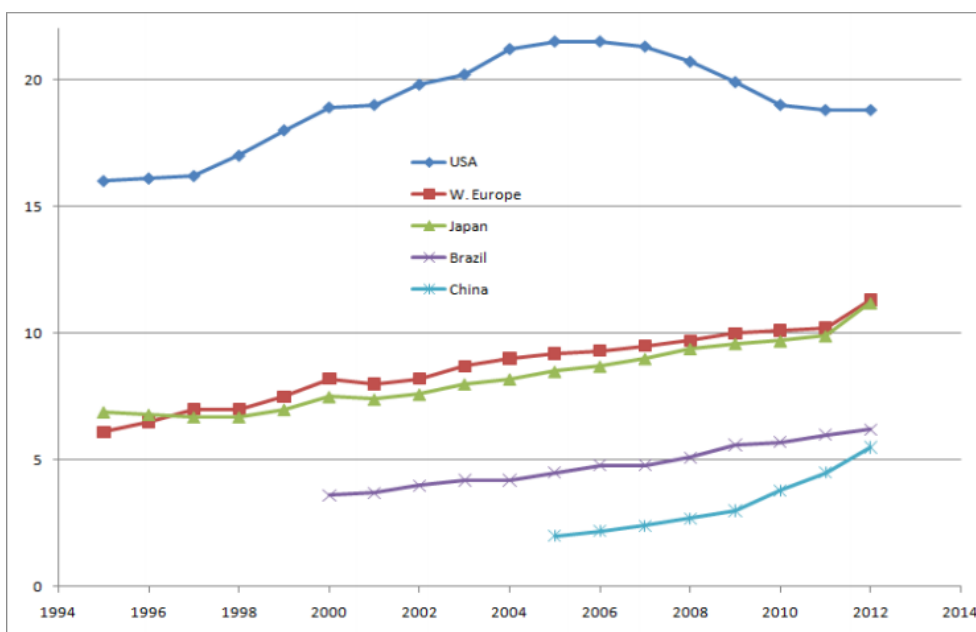


Figura 23 - Massa média de componentes fabricados pela metalurgia do pó por veículo (kg/veículo) ao longo dos anos (LOBERTO et al., 2010).

É importante ressaltar que nos EUA, país que mais aplica a metalurgia do pó na indústria automobilística, a redução da massa média utilizada por veículo deve-se principalmente à pressão pela redução do consumo de combustível e emissão de gases poluentes, que teve como consequência a redução de tamanho e peso dos veículos (LOBERTO et al., 2010).

A vasta aplicação da metalurgia do pó em automóveis tem como causa o desejo da indústria automobilística em reduzir custos, aumentando o interesse pela metalurgia do pó, viabilizada pelas largas escalas de produção. O resultado disso é o uso de peças sinterizadas em praticamente todas as partes de carro, como mostra a Figura 24.



Figura 24 - Aplicações atuais da metalurgia do pó em automóveis: peças de motor (a); peças de sistema de direção (b); peças de sistema de transmissão (c); peças extras (d); peças de amortecedor (e); peças do sistema elétrico de um automóvel (f) (UPADHYAYA, A.; UPADHYAYA, G., 2011).

Apesar de já serem produzidas diversas peças automotivas em série, o atual desafio da metalurgia do pó é a fabricação de engrenagens para caixas automotivas. Alguns trabalhos já estão sendo feitos nesse sentido, como é o caso de alguns carros de *rally* (Figura 25), cujas engrenagens de todas as marchas foram substituídas por engrenagens sinterizadas, não sendo detectado nenhum problema após o uso (IERVOLINO, 2012).



Figura 25 - Veículo de *rally* com caixa de mudanças com engrenagens sinterizadas (IERVOLINO, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os objetos de estudo, assim as técnicas e procedimentos a serem utilizados neste trabalho. É importante ressaltar que foi avaliada uma rota alternativa na qual seriam apenas realizados ensaios de bancada em amostras feitas a partir dos materiais convencional e sinterizado a fim de prever o comportamento de engrenagens com essas características. No entanto, foi optado por fabricar e testar as engrenagens tanto por representar uma situação mais próxima do produto real, quanto para que o trabalho auxilie a Equipe Poli de Baja de forma mais direta, visto que o componente será utilizado em um dos protótipos da equipe.

3.1 TREM DE FORÇA

O trem de força do protótipo em questão é composto, principalmente, por um motor com potência nominal máxima de 10 HP, um câmbio do tipo CVT (Transmissão Continuamente Variável) de polias expansivas (ou de diâmetro variável), uma caixa de transmissão por engrenagens, semieixos com juntas homocinéticas (ou de velocidade constante) e pneus próprios para aplicação fora-de-estrada. Uma representação do trem de força está ilustrada na Figura 26.

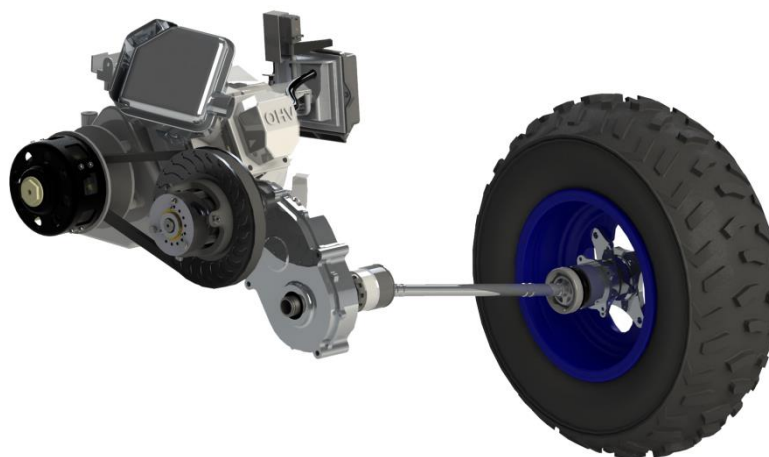


Figura 26 - Representação do trem de força do protótipo.

A engrenagem objeto do estudo é componente da caixa de transmissão do protótipo (Figura 27). Essa caixa possui apenas uma relação fixa, obtida através de

dois pares de engrenagens, que estão envoltos por um invólucro de alumínio. Todo o projeto da caixa de transmissão é realizado pela própria equipe.



Figura 27 - Representação do interior da caixa de transmissão do protótipo.

3.2 ENGRENAGEM CONVENCIONAL

A engrenagem a partir da qual será realizado o projeto da engrenagem sinterizada e com a qual também serão realizadas as comparações pertinentes após a realização de testes, é a coroa do estágio final da caixa de transmissão do protótipo (Figura 28). Essa engrenagem foi escolhida por ser a que sofre mais esforços devido ao fato de ser o último elemento de redução da transmissão e, portanto, representar um desafio maior ao projeto.

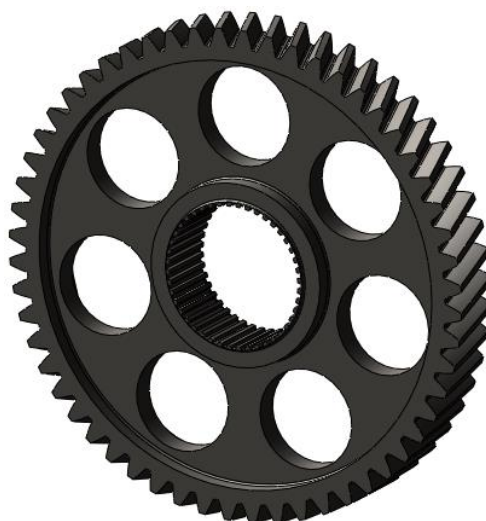


Figura 28 - Representação da engrenagem escolhida para os estudos.

Os dentes da engrenagem foram dimensionados através do critério de Lewis e do critério de Hertz. O resultado foi uma engrenagem de 56 dentes, módulo 2,0 mm e largura dos dentes igual a 17,0 mm. Optou-se por dentes helicoidais com um ângulo de hélice de 20° por possuírem um maior grau de recobrimento e área de contato, diminuindo as tensões e permitindo um engrenamento mais suave e silencioso. O ângulo de pressão dos dentes é de 20°.

O material utilizado foi o aço SAE 8620, comumente utilizado na fabricação de engrenagens por possuir boas propriedades mecânicas e por ser relativamente fácil realizar tratamentos superficiais com adição de carbono, como cementação ou carbonitretação, possibilitando a otimização das propriedades tanto do núcleo quanto da superfície. A Tabela 1 mostra a composição química do aço SAE 8620.

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 8620 (adaptado de HUDOK et al., 1990).

| C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,18 - 0,23 | 0,70 - 0,90 | máx 0,035 | máx 0,040 | 0,15 - 0,30 | 0,40 - 0,70 | 0,40 - 0,60 | 0,15 - 0,25 |

Já o corpo da engrenagem foi dimensionado através de simulações utilizando o método de elementos finitos com o auxílio do *software SolidWorks Simulation*. No projeto final, a engrenagem contém alívios de massa através de redução da espessura da alma e de furos. Na análise realizada, a engrenagem foi engastada na face de contato com o eixo e as forças radial e tangencial foram aplicadas no círculo primitivo. Os valores das forças aplicadas foram determinados considerando-se a situação de maior torque do motor multiplicado pela máxima relação de transmissão da CVT, ou seja, o maior torque sobre o eixo de entrada. É importante ressaltar que essa situação dificilmente ocorrerá na prática devido ao modo como a CVT está calibrada, tendo sido considerada apenas como uma sobrecarga no sistema. Dessa forma, foi considerada uma força de 7.677 N sendo aplicada tangencialmente ao círculo primitivo, uma força de 2.976 N na direção radial da engrenagem, e outra força de 2.794 N na direção axial, sendo verificada uma tensão de Von Mises máxima de 427 MPa, localizada na região dos alívios de massa (Figura 29).

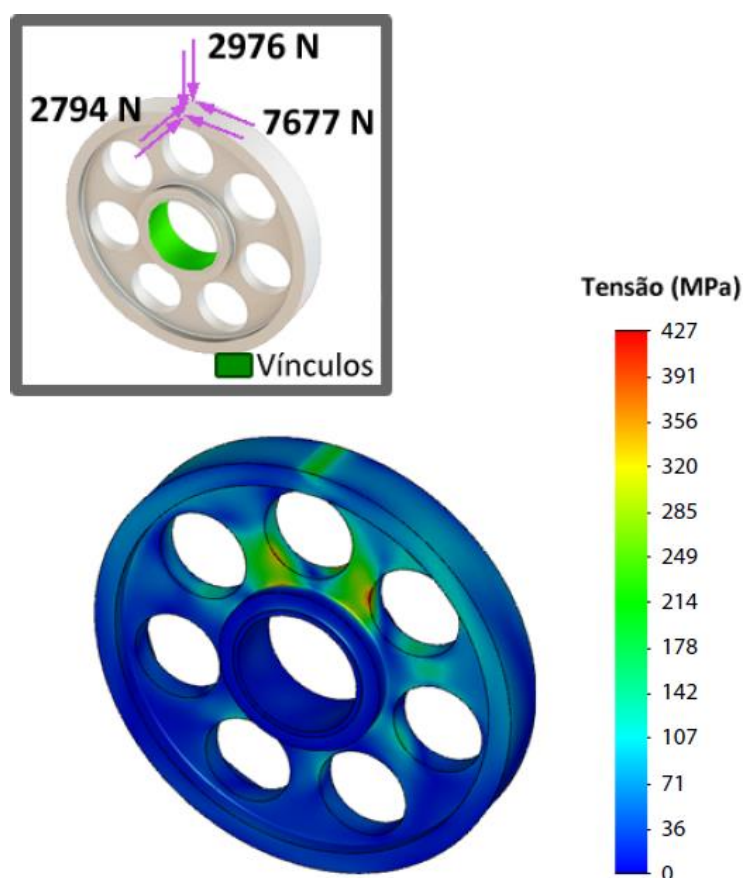


Figura 29 - Análise estrutural da engrenagem convencional utilizando o método de elementos finitos.

3.3 ENGRENAGEM SINTERIZADA

O projeto da engrenagem sinterizada será baseado no projeto da engrenagem convencional, podendo haver modificações em virtude da mudança do material e modo de fabricação do blanque, fazendo com que as características dos materiais difiram em alguns aspectos.

3.3.1 Material

O material escolhido para a fabricação da engrenagem sinterizada foi o Astaloy™ 85 Mo + 0,28% C.

O Astaloy™ 85 Mo (Figura 30) é um pó de aço produzido pelo processo de atomização em água, que contém 0,85% de molibdênio pré-ligado, ou seja, cada partícula de ferro deve conter 0,85% de molibdênio. Já o carbono é adicionado na forma de grafite ao material e homogeneizado através de uma mistura dos pós. Esse

material possui uma boa compressibilidade, permitindo alta densificação da peça e, portanto, melhores propriedades de resistência (HÖGANÄS AB, 2002). Além disso, esse material é recomendado para componentes que necessitam de alta dureza e boa resistência (EGOROVA; EGOROV; SKORIKOV, 2013), sendo muito utilizado na fabricação de engrenagens.

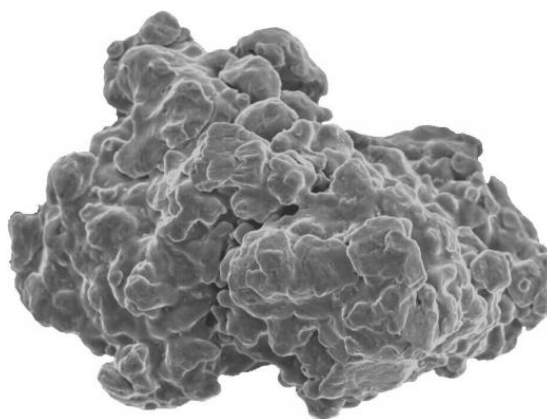


Figura 30 - Imagem de uma partícula de pó de Astaloy™ 85 Mo obtida através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (HÖGANÄS AB, 2002).

Como o ferramental utilizado na fabricação de um componente através da metalurgia do pó é muito caro, ao invés de a engrenagem ser fabricada através do método usual de compactação do pó, a mesma foi confeccionada através da usinagem de um blanque do material escolhido.

O material foi compactado em uma matriz rígida na forma de discos, que depois passaram pela sinterização a 1.120 °C durante 45 minutos em atmosfera contendo 95% de nitrogênio (N₂) e 5% de hidrogênio (H₂). Posteriormente, os discos foram empilhados dentro de um recipiente cilíndrico de aço inox, que foi então lacrado com solda e passou por um processo denominado HIP (compactação isostática a quente, em inglês), em que foi aplicada uma pressão de 1.000 bar simultaneamente a uma temperatura de 1.150 °C. Um esquema desse processo pode ser visualizado na Figura 31.

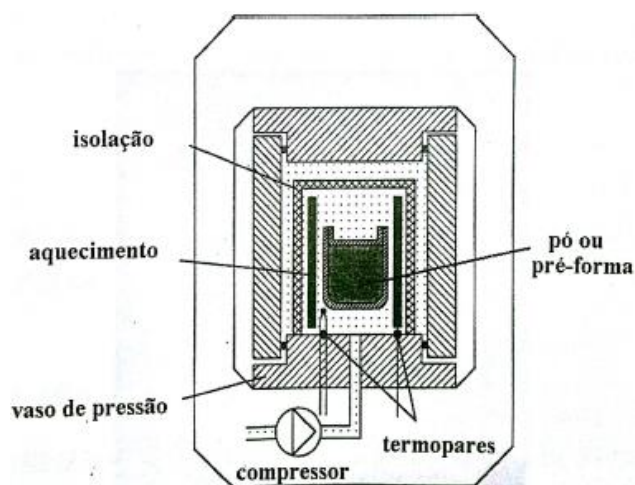


Figura 31 - Esquematisação da compactação isostática a quente (RODRIGUES, 2009).

O resultado é um corpo inteiramente denso, diferentemente do processo convencional de compactação e sinterização. No caso do blanque utilizado, a densidade final é de $7,85 \text{ g/cm}^3$ segundo o fornecedor. A principal vantagem é a obtenção de um material com melhores propriedades devido à ausência de poros. Isso também elimina possíveis problemas no tratamento térmico, que geralmente necessita de ambientes muito bem controlados em peças sinterizadas, além de eliminar a necessidade da densificação superficial.

Para evitar outras variações nas engrenagens além da substituição do material, o ideal seria que as duas engrenagens possuíssem as mesmas dimensões. Isso também eliminaria possíveis problemas de montagem, visto que o conjunto foi projetado contemplando apenas a engrenagem convencional. No entanto, deve-se antes fazer uma análise das tensões admissíveis a fim de garantir que a engrenagem sinterizada será tão ou mais resistente em relação à engrenagem convencional com as mesmas dimensões, visando evitar falhas.

3.3.1.1 Análise de carbono no material

Como o grafite foi adicionado ao material base e homogeneizado através de uma mistura, existe a possibilidade de segregação na mistura, fazendo com que possa haver variação na concentração de carbono. Também é possível que ocorra a decarbonetação do material durante a sinterização, resultante do elevado ponto de orvalho ou alto teor de dióxido de carbono (CO_2) no forno (LOBERTO; GENOVA;

SILVA, 2009), fazendo com que o teor de carbono diminua. Portanto, foi realizada uma análise de carbono no blanque para verificar o teor real na região do blanque utilizada, visto que é importante na obtenção das propriedades do material. Foram obtidas amostras de 3 pontos diferentes do blanque, que foram analisadas através do método de combustão direta.

O método de análise de carbono através da combustão direta consiste, resumidamente, em colocar a amostra do material em um ambiente com oxigênio puro a cerca de 1.350 °C, que é então submetido a combustão completa, liberando o carbono na forma de dióxido de carbono (CO_2). A medição da concentração de carbono é então feita indiretamente através da medição da concentração de dióxido de carbono (LECO, 2014b). O aparelho utilizado também realiza análises de enxofre, sendo que o método utilizado é o mesmo, porém a medição é feita através da concentração do dióxido de enxofre (SO_2) liberado durante a combustão. O modelo do aparelho utilizado para realizar as análises é o CS744, da LECO, e está ilustrado na Figura 32.



Figura 32 - Modelo do aparelho utilizado nas análises de carbono através do método de combustão direta (LECO, 2014a).

As análises mostraram que a região a ser utilizada contém uma concentração de 0,28% de carbono em média, valor muito próximo ao especificado. Já a concentração de enxofre encontrada é residual, menor que 0,01%.

3.3.1.2 Obtenção das tensões limite

As curvas das tensões limite de escoamento e de resistência em função da densidade do material e da quantidade de carbono estão representadas na Figura 33. Segundo (HÖGANÄS AB, 2002), as propriedades foram obtidas através de um ensaio baseado na norma ISO 2740: 1986 utilizando corpos de prova padrão com comprimento de 90 mm.

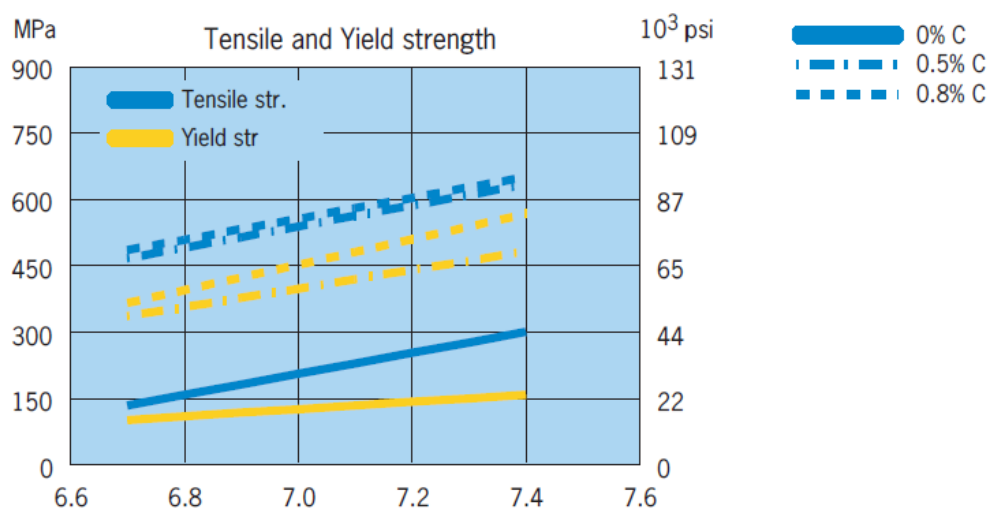


Figura 33 - Curvas de tensões limite de escoamento e de resistência em função da densidade e da quantidade de carbono (HÖGANÄS AB, 2002).

No entanto, como a densidade do blanche utilizado ultrapassa o gráfico da Figura 33 e a quantidade de 0,28% de carbono adicionado não está contemplada, faz-se necessário uma extrapolação do gráfico e a adição de uma nova linha entre as linhas de 0% C e 0,5% C. O gráfico modificado está representado na Figura 34.

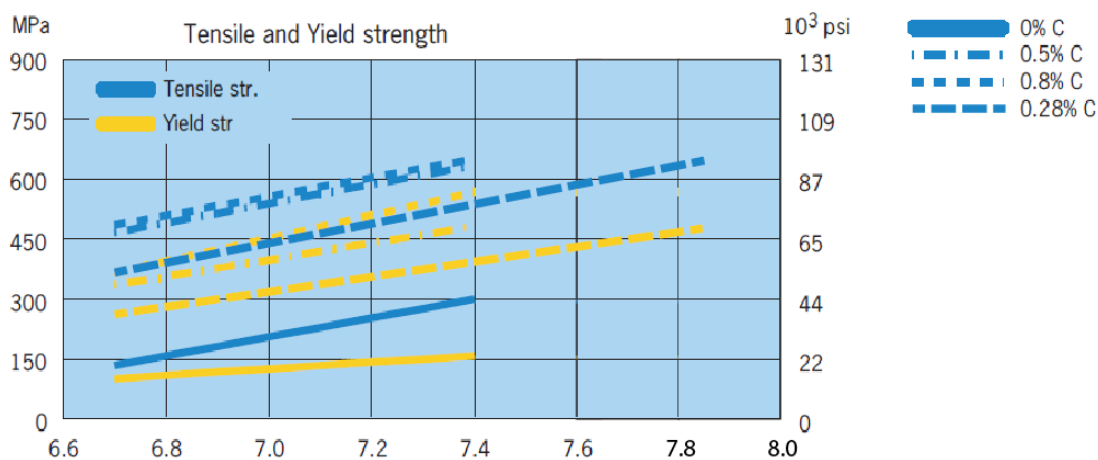


Figura 34 - Curvas adaptadas de tensões limite de escoamento e de resistência em função da densidade e da quantidade de carbono (adaptado de HÖGANÄS AB, 2002).

O gráfico da Figura 34 mostra que a tensão limite de escoamento do material utilizado é de 480 MPa e a tensão limite de resistência é de 655 MPa. Apesar de esses valores não terem sido obtidos a partir de ensaios, mas estimados através das curvas fornecidas por (HÖGANÄS AB, 2002), e se referirem ao material sem ter passado por qualquer tratamento térmico após a sinterização, acredita-se que os valores possam ser utilizados para comparar as tensões limites dos dois materiais. Segundo (ASM INTERNATIONAL, 1990), as tensões limite de escoamento e de resistência do aço SAE 8620, utilizado na engrenagem convencional, são, respectivamente, 385 MPa e 530 MPa. Dessa forma, torna-se possível utilizar no veículo uma engrenagem com o material sinterizado analisado com as mesmas dimensões da engrenagem projetada para o material convencional.

3.4 FABRICAÇÃO

Como as especificações geométricas e dimensionais de ambas as engrenagens são iguais, essas foram fabricadas da mesma maneira. Os blanques foram primeiramente torneados e os alívios de massa, em seguida, fresados. Os corpos das engrenagens usinados estão representados na Figura 35.



Figura 35 - Engrenagens torneadas e com os alívios de massa fresados (engrenagem sinterizada à esquerda e engrenagem convencional à direita).

Posteriormente, os dentes das engrenagens foram fresados. Também foram realizados tratamentos térmicos de carbonitretação, têmpera e revenimento e, por

último, as estrias para acoplamento no eixo foram usinadas através da eletroerosão a fio. O fluxograma com as etapas de fabricação está ilustrado na Figura 36.

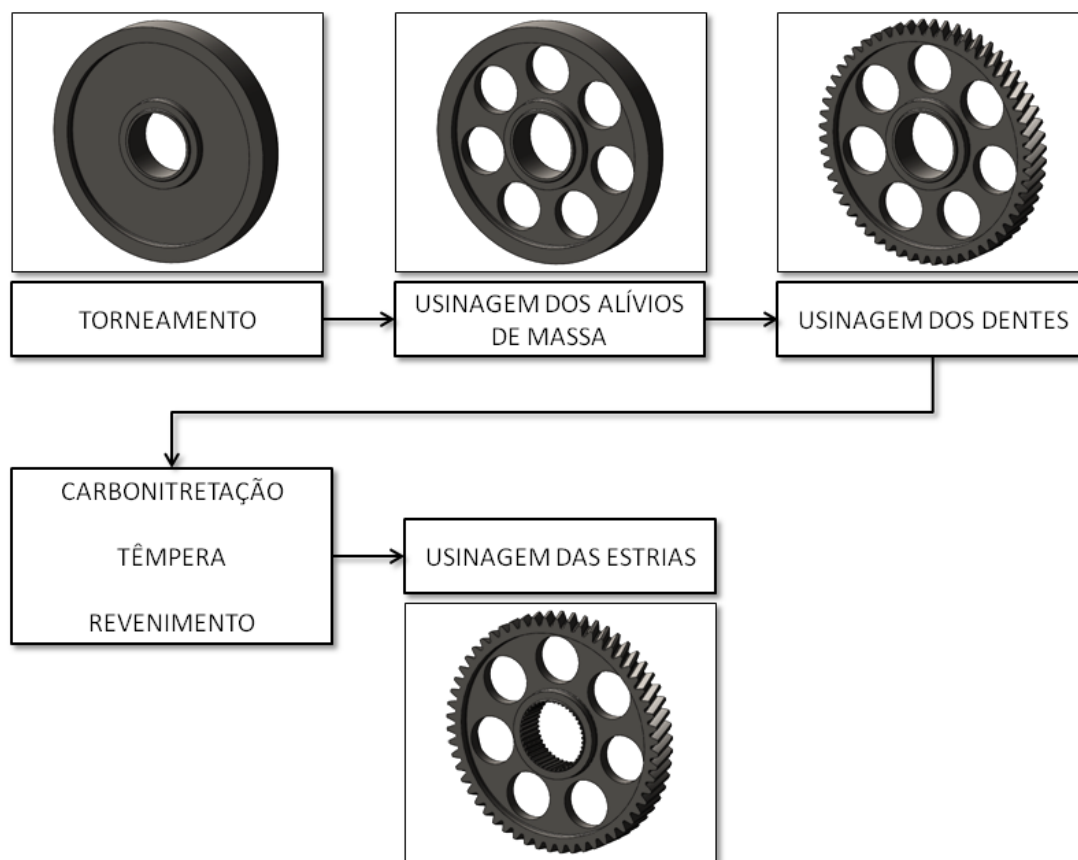


Figura 36 - Etapas de fabricação das engrenagens.

A Figura 37 mostra ambas as engrenagens finalizadas, enquanto que a Figura 38 mostra a engrenagem sinterizada montada na caixa de transmissão.



Figura 37 - Engrenagens finalizadas (engrenagem convencional à esquerda e engrenagem sinterizada à direita).



Figura 38 - Caixa de transmissão montada com a engrenagem sinterizada.

3.4.1 Tratamento térmico

A etapa de tratamento térmico requer uma atenção especial e, portanto, será descrita com mais detalhes. Para o tratamento térmico, foram realizadas as etapas de pré-aquecimento, carbonitreção, têmpera e revenimento.

A carbonitreção consiste no aquecimento do aço a uma temperatura elevada, acima da temperatura de transformação, em uma atmosfera gasosa que pode oferecer carbono e nitrogênio, simultaneamente, que são absorvidos pela superfície do metal. Dessa forma, esse tratamento tem como principal objetivo conferir uma camada dura e resistir ao desgaste, que será obtida após a têmpera subsequente, responsável por transformar a austenita em martensita através do rápido resfriamento do material. A espessura desta camada pode variar de 0,07 a 0,7 mm. Uma vantagem da camada carbonitretada é o fato de o nitrogênio absorvido diminuir a taxa de resfriamento crítica na têmpera, o que faz com que seja possível obter uma camada dura e resistente ao atrito dentro da espessura solicitada, com um custo mais baixo. Além disso, como são aplicadas temperaturas menores e/ou taxas de resfriamento menores, a carbonitreção tende a resultar em menores distorções e um melhor controle dimensional em relação à cementação, podendo eliminar procedimentos posteriores de acabamento (CHIAVERINI, 1998; LAMPMAN, 1990). Nas curvas

representadas na Figura 39 é possível observar a maior temperabilidade de um aço carbonitretado em relação ao mesmo aço apenas cementado.

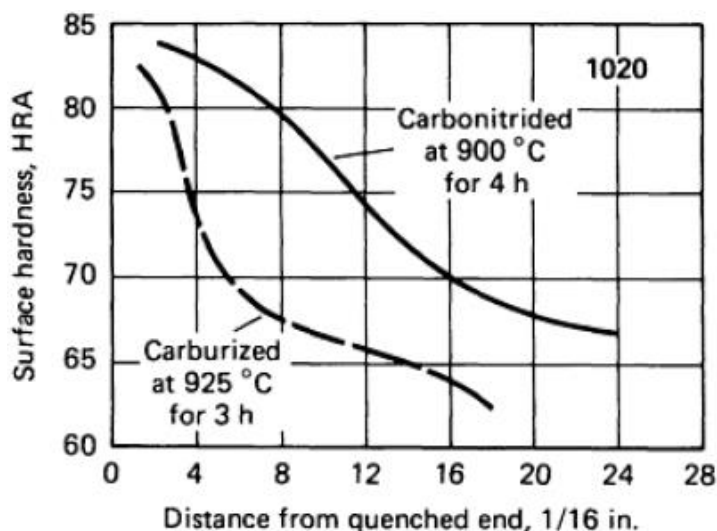


Figura 39 - Curva de temperabilidade de um aço 1020 carbonitretado a 900 °C comparado a uma curva para o mesmo aço cementado a 925 °C (POWELL; BEVER; FLOE, 1954 apud LAMPMAN, 1990).

O revenimento, por sua vez, consiste no reaquecimento após a têmpera para obter valores específicos de propriedades mecânicas e também para alívios das tensões de têmpera e, além disso, para garantir estabilidade dimensional (ERICSSON, 1990).

As temperaturas e períodos de tempo pelos quais as engrenagens foram submetidas em cada etapa do tratamento são as seguintes:

- Pré-aquecimento: 400 °C por 30 minutos;
- Carbonitretação: 830 °C por 50 minutos;
- Têmpera: 70 °C por 15 minutos;
- Revenimento: 180 °C por 90 minutos.

A espessura da camada carbonitretada especificada foi de 0,35 mm. Esse valor de espessura está de acordo com o valor recomendado por (NIEMANN, 1971), de $0,15m$ a $0,2m$, onde m é o módulo da engrenagem e vale 2 mm, ou seja, de 0,30 a 0,40 mm. Além disso, os tratamentos resultaram em uma camada com 0,9% de carbono nas duas engrenagens segundo a empresa responsável pelo serviço.

3.5 AVALIAÇÕES ANTES DOS TESTES

Após o recebimento das engrenagens prontas, foram realizados ensaios e medições para verificar a qualidade de fabricação das peças e adquirir parâmetros para poder realizar avaliações com relação ao desgaste após os testes.

3.5.1 Ensaio de dureza

Um parâmetro importante a ser analisado é a dureza, visto que essa influencia diretamente na resistência ao desgaste da engrenagem. Para determinar a dureza aparente do material, também conhecida como macrodureza, em peças sinterizadas, geralmente são utilizados os ensaios Brinell, Rockwell, Rockwell Superficial e Vickers com cargas acima de 1 kg (LOBERTO et al., 2009). No entanto, quando se deseja comparar os valores de dureza com os obtidos a partir de material convencional é importante determinar a microdureza, que é a dureza da partícula do material, devido à porosidade, que interfere na medição da macrodureza (LOBERTO et al., 2009). Apesar de o material sinterizado utilizado ser totalmente denso, foi determinada a microdureza dos materiais para evitar que haja influência de quaisquer poros residuais.

Foi utilizado um microdurômetro da marca Fixo Test para medição de dureza Vickers com uma escala de 100 gf a 10 kgf (Figura 40).



Figura 40 - Microdurômetro utilizado na determinação da microdureza superficial dos componentes.

No caso da medição da microdureza das engrenagens desse estudo, foram utilizadas cargas de 5 kg, ou seja, a escala HV5.

3.5.2 Medição do perfil dos dentes

Também foram realizadas medições do perfil dos dentes tanto para verificar a qualidade dos mesmos após a usinagem e o tratamento térmico, quanto para que seja possível realizar uma comparação dos perfis após os testes em pista e avaliar o desgaste.

Para realizar a medição do perfil dos dentes, foi utilizada uma máquina de medir coordenadas, capaz de realizar medições tridimensionais com alta precisão. O modelo utilizado foi o CRYSTA-Apex S 7106, da Mitutoyo. A Figura 41 ilustra a máquina utilizada e uma das engrenagens posicionada para a medição.



Figura 41 - Máquina de medir coordenadas utilizada na medição do perfil dos dentes das engrenagens.

No caso do modelo e configuração utilizados, o erro máximo das medições $E_{0,MPE}$, em μm , pode ser calculado através da fórmula 3 (MITUTOYO, 2012):

$$E_{0,MPE} = 1,7 + 3 \frac{L}{1000} \quad (3)$$

em que L = distância máxima percorrida, em mm.

No caso da medição das engrenagens, considerar-se-á que a distância L possui um valor equivalente ao diâmetro de cabeça dos dentes das engrenagens, ou seja, $L = 123,2 \text{ mm}$ e, portanto, $E_{0,MPE} = 2,1 \mu\text{m}$. Como as tolerâncias dimensionais dos processos de fabricação dos componentes são da ordem de décimo de milímetro e, portanto, maiores do que o erro máximo calculado, esse valor foi considerado suficiente para realizar as medições.

3.6 TESTES

Os testes das engrenagens foram realizados no próprio veículo Baja SAE da Equipe Poli de Baja em simulações da prova de enduro de resistência, umas das avaliações realizadas em competições da categoria.

O enduro de resistência é a prova de maior importância da competição, pois compreende 40% do total de pontos disputados. Nessa prova, os veículos devem completar voltas em uma pista irregular com obstáculos, em qualquer condição climática, por um período de 4 horas. No enduro de resistência, há um índice muito elevado de falhas de componentes dos veículos, de forma que, caso a engrenagem sinterizada seja utilizada nessa prova sem apresentar falhas, pode-se afirmar que a tecnologia pode ser aplicada em engrenagens de veículos Baja SAE. Além disso, esse teste também pode ser considerado como um teste de durabilidade acelerada se for considerado o uso regular do veículo por parte de consumidores finais em uma hipotética produção em larga escala visando sua venda.

A Equipe Poli de Baja, com a experiência adquirida ao longo dos anos, consegue simular a prova com certa precisão em uma pista construída dentro da própria faculdade, sendo, portanto, adequado testar as engrenagens nessa condição (Figura 42).

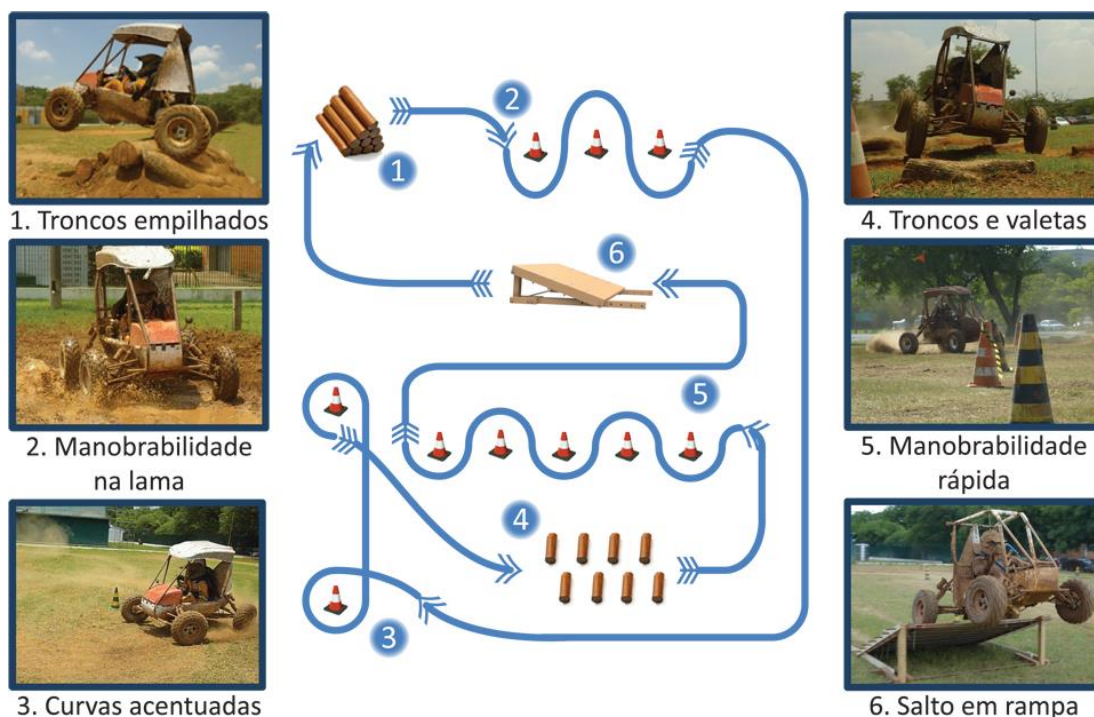


Figura 42 - Esquema da pista de testes.

3.7 AVALIAÇÕES APÓS OS TESTES

Após a realização dos testes, é necessário realizar as avaliações e comparações pertinentes. Primeiramente, deverá ser realizada uma inspeção ótica para verificar se há indícios de falhas visíveis. Posteriormente, deverá ser realizada a medição do perfil dos dentes de forma equivalente à realizada anteriormente, que serão comparados com as medições realizadas antes dos testes para avaliar o desgaste dos dentes.

3.7.1 Análise metalográfica

Também é interessante realizar análises metalográficas na região dos dentes para verificar a microestrutura do material tanto na superfície quanto no núcleo. A metalografia geralmente é utilizada no controle de qualidade em processos de manufatura ou na investigação de falhas de componentes, porém nesse trabalho o intuito é discutir se a estrutura resultante é a esperada de acordo com os materiais e tratamentos térmicos pelos quais as peças passaram, além de fazer uma comparação das duas. Como é um ensaio destrutivo, esse estudo foi o último realizado.

As engrenagens foram cortadas cuidadosamente tomando o cuidado de resfriá-las durante os cortes para não haver mudança de fase dos materiais. Os cortes menores foram realizados em um equipamento denominado “Cut-Off”, capaz de realizar um corte mais preciso. Esse procedimento foi realizado de forma a restar uma pequena amostra com 3 dentes cortados em um plano próximo à metade da largura da face para que seja possível observar a camada carbonitretada e o núcleo do material.

O embutimento da amostra foi realizado a quente utilizando-se baquelite e uma embutidora metalográfica. O lixamento foi realizado utilizando-se lixas d’água com granulometria de 220 a 1.200 mesh, totalizando cinco lixas com granulometrias diferentes. O polimento foi realizado em uma politriz, em que foi utilizado óxido de alumínio (alumina) como abrasivo.

O ataque químico, realizado para revelar a estrutura do material, foi realizado com Nital Fe 1, o qual é preparado com 1 ml de ácido nítrico (HNO_3) concentrado para 100 ml de álcool etílico 95%. Esse reagente foi utilizado por ser o mais recomendado para definir a espessura de uma camada martensítica (HÖGANÄS AB, 2007). A Figura 43 mostra uma das amostras após passar pelos procedimentos descritos.



Figura 43 - Amostra de uma das engrenagens preparada para a análise metalográfica.

Para visualizar a estrutura dos materiais, foi utilizado o microscópio Leica DM LM da marca Leica Microsystems, próprio para análises metalográficas. Esse microscópio permite visualizar imagens com um aumento total de 16x a 1.500x

(LEICA MICROSYSTEMS WETZLAR GMBH, 2014). O modelo utilizado está representado na Figura 44.



Figura 44 - Modelo do microscópio utilizado nas análises metalográficas (LEICA MICROSYSTEMS WETZLAR GMBH, 2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO DE DUREZA

Em ambas as engrenagens foram realizadas duas medições em dentes de extremidades opostas. Apesar de as medições terem sido realizadas na escala HV5, os valores foram convertidos para a escala Rockwell C, por ser a mais utilizada em materiais duros como aços temperados (REVANKAR, 1990). A conversão foi realizada conforme a norma da American Society for Testing and Materials - ASTM E140 – 07 (Tabela 2).

Tabela 2 - Conversão dos valores de dureza para aços não-austeníticos (faixa de dureza Rockwell C) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012).

| Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC) | Vickers Hardness Number (HV) | Brinell Hardness Number ^C | | Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK) | Rockwell Hardness Number | | Rockwell Superficial Hardness Number | | | Sclero- scope Hard- ness Number ^D | Rock- well C Hardness Number 150 kgf (HRC) |
|--|---------------------------------------|---|--|--|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|---|
| | | 10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS) | 10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW) | | A Scale, 60-kgf (HRA) | D Scale, 100-kgf (HRD) | 15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N) | 30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N) | 45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N) | | |
| 58 | 940 | --- | --- | 920 | 85.6 | 76.9 | 93.2 | 84.4 | 75.4 | 97.3 | 68 |
| 57 | 900 | --- | --- | 895 | 85.0 | 76.1 | 92.9 | 83.6 | 74.2 | 95.0 | 67 |
| 56 | 865 | --- | --- | 870 | 84.5 | 75.4 | 92.5 | 82.8 | 73.3 | 92.7 | 66 |
| 55 | 832 | --- | (739) | 846 | 83.9 | 74.5 | 92.2 | 81.9 | 72.0 | 90.6 | 65 |
| 54 | 800 | --- | (722) | 822 | 83.4 | 73.8 | 91.8 | 81.1 | 71.0 | 88.5 | 64 |
| 53 | 772 | --- | (705) | 799 | 82.8 | 73.0 | 91.4 | 80.1 | 69.9 | 86.5 | 63 |
| 52 | 746 | --- | (688) | 776 | 82.3 | 72.2 | 91.1 | 79.3 | 68.8 | 84.5 | 62 |
| 51 | 720 | --- | (670) | 754 | 81.8 | 71.5 | 90.7 | 78.4 | 67.7 | 82.6 | 61 |
| 50 | 697 | --- | (654) | 732 | 81.2 | 70.7 | 90.2 | 77.5 | 66.6 | 80.8 | 60 |
| 59 | 674 | --- | 634 | 710 | 80.7 | 69.9 | 89.8 | 76.6 | 65.5 | 79.0 | 59 |
| 58 | 653 | --- | 615 | 690 | 80.1 | 69.2 | 89.3 | 75.7 | 64.3 | 77.3 | 58 |
| 57 | 633 | --- | 595 | 670 | 79.6 | 68.5 | 88.9 | 74.8 | 63.2 | 75.6 | 57 |
| 56 | 613 | --- | 577 | 650 | 79.0 | 67.7 | 88.3 | 73.9 | 62.0 | 74.0 | 56 |
| 55 | 595 | --- | 560 | 630 | 78.5 | 66.9 | 87.9 | 73.0 | 60.9 | 72.4 | 55 |
| 54 | 577 | --- | 543 | 612 | 78.0 | 66.1 | 87.4 | 72.0 | 59.8 | 70.9 | 54 |
| 53 | 560 | --- | 525 | 594 | 77.4 | 65.4 | 86.9 | 71.2 | 58.6 | 69.4 | 53 |
| 52 | 544 | (500) | 512 | 576 | 76.8 | 64.6 | 86.4 | 70.2 | 57.4 | 67.9 | 52 |
| 51 | 528 | (487) | 496 | 558 | 76.3 | 63.8 | 85.9 | 69.4 | 56.1 | 66.5 | 51 |
| 50 | 513 | (475) | 481 | 542 | 75.9 | 63.1 | 85.5 | 68.5 | 55.0 | 65.1 | 50 |
| 49 | 498 | (464) | 469 | 526 | 75.2 | 62.1 | 85.0 | 67.6 | 53.8 | 63.7 | 49 |
| 48 | 484 | 451 | 455 | 510 | 74.7 | 61.4 | 84.5 | 66.7 | 52.5 | 62.4 | 48 |
| 47 | 471 | 442 | 443 | 495 | 74.1 | 60.8 | 83.9 | 65.8 | 51.4 | 61.1 | 47 |
| 46 | 458 | 432 | 432 | 480 | 73.6 | 60.0 | 83.5 | 64.8 | 50.3 | 59.8 | 46 |
| 45 | 446 | 421 | 421 | 466 | 73.1 | 59.2 | 83.0 | 64.0 | 49.0 | 58.5 | 45 |
| 44 | 434 | 409 | 409 | 452 | 72.5 | 58.5 | 82.5 | 63.1 | 47.8 | 57.3 | 44 |
| 43 | 423 | 400 | 400 | 438 | 72.0 | 57.7 | 82.0 | 62.2 | 46.7 | 56.1 | 43 |
| 42 | 412 | 390 | 390 | 426 | 71.5 | 56.9 | 81.5 | 61.3 | 45.5 | 54.9 | 42 |
| 41 | 402 | 381 | 381 | 414 | 70.9 | 56.2 | 80.9 | 60.4 | 44.3 | 53.7 | 41 |
| 40 | 392 | 371 | 371 | 402 | 70.4 | 55.4 | 80.4 | 59.5 | 43.1 | 52.6 | 40 |
| 39 | 382 | 362 | 362 | 391 | 69.9 | 54.6 | 79.9 | 58.6 | 41.9 | 51.5 | 39 |
| 38 | 372 | 353 | 353 | 380 | 69.4 | 53.8 | 79.4 | 57.7 | 40.8 | 50.4 | 38 |
| 37 | 363 | 344 | 344 | 370 | 68.9 | 53.1 | 78.8 | 56.8 | 39.6 | 49.3 | 37 |
| 36 | 354 | 336 | 336 | 360 | 68.4 | 52.3 | 78.3 | 55.9 | 38.4 | 48.2 | 36 |
| 35 | 345 | 327 | 327 | 351 | 67.9 | 51.5 | 77.7 | 55.0 | 37.2 | 47.1 | 35 |
| 34 | 336 | 319 | 319 | 342 | 67.4 | 50.8 | 77.2 | 54.2 | 36.1 | 46.1 | 34 |
| 33 | 327 | 311 | 311 | 334 | 66.8 | 50.0 | 76.6 | 53.3 | 34.9 | 45.1 | 33 |
| 32 | 318 | 301 | 301 | 326 | 66.3 | 49.2 | 76.1 | 52.1 | 33.7 | 44.1 | 32 |
| 31 | 310 | 294 | 294 | 318 | 65.8 | 48.4 | 75.6 | 51.3 | 32.5 | 43.1 | 31 |
| 30 | 302 | 286 | 286 | 311 | 65.3 | 47.7 | 75.0 | 50.4 | 31.3 | 42.2 | 30 |
| 29 | 294 | 279 | 279 | 304 | 64.8 | 47.0 | 74.5 | 49.5 | 30.1 | 41.3 | 29 |
| 28 | 286 | 271 | 271 | 297 | 64.3 | 46.1 | 73.9 | 48.6 | 28.9 | 40.4 | 28 |
| 27 | 279 | 264 | 264 | 290 | 63.8 | 45.2 | 73.3 | 47.7 | 27.8 | 39.5 | 27 |
| 26 | 272 | 258 | 258 | 284 | 63.3 | 44.6 | 72.8 | 46.8 | 26.7 | 38.7 | 26 |
| 25 | 266 | 253 | 253 | 278 | 62.8 | 43.8 | 72.2 | 45.9 | 25.5 | 37.8 | 25 |
| 24 | 260 | 247 | 247 | 272 | 62.4 | 43.1 | 71.6 | 45.0 | 24.3 | 37.0 | 24 |
| 23 | 254 | 243 | 243 | 266 | 62.0 | 42.1 | 71.0 | 44.0 | 23.1 | 36.3 | 23 |
| 22 | 248 | 237 | 237 | 261 | 61.5 | 41.6 | 70.5 | 43.2 | 22.0 | 35.5 | 22 |
| 21 | 243 | 231 | 231 | 256 | 61.0 | 40.9 | 69.9 | 42.3 | 20.7 | 34.8 | 21 |
| 20 | 238 | 226 | 226 | 251 | 60.5 | 40.1 | 69.4 | 41.5 | 19.6 | 34.2 | 20 |

Ainda segundo a norma da ASTM E140 – 07, a conversão de dureza Vickers para Rockwell C pode ser feita a partir da fórmula 4, que possui um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9999$ dentro da faixa determinada na Tabela 2:

$$HRC = +3,14900 \cdot 10^1 + 7,96683 \cdot 10^{-2}(HV) - 3,55432 \cdot 10^{-5}(HV)^2 - 6,72816 \cdot 10^3(HV)^{-1} \quad (4)$$

Na engrenagem convencional foram encontrados os valores 61 e 62 HRC, enquanto que na engrenagem sinterizada foram encontrados os valores 59 e 60 HRC. Esses valores encontram-se dentro da faixa recomendada para engrenagens desse porte, de 58 a 62 HRC (DUDLEY; RADZEVICH, 1994). A Figura 45 mostra a região da peça polida para a realização do ensaio, assim como um dos pontos de medição.



Figura 45 - Ponto de medição de dureza na engrenagem convencional.

4.2 COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS DENTES COM O PERFIL EVOLVENTE

Antes de iniciar as medições, as engrenagens permaneceram em ambiente com temperatura controlada em 20 ± 1 °C por, no mínimo, 1 hora. Como os dentes das engrenagens são helicoidais, a haste de medição teve que ser inclinada para que fosse possível fazer a medição próximo ao plano médio da largura de face dos dentes. A Figura 46 mostra uma das engrenagens sendo medida.

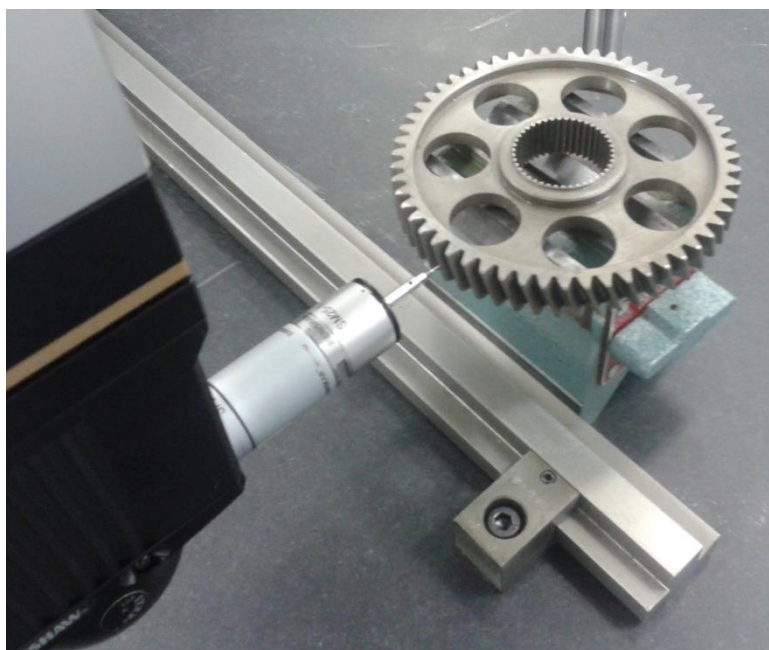


Figura 46 - Medição do perfil dos dentes de uma das engrenagens.

As medições foram realizadas ponto a ponto, espaçadas de cerca de 0,10 mm, ao redor de todo o perfil das engrenagens, totalizando mais de 7.200 pontos em cada peça. O perfil completo resultante de uma das engrenagens está representado na Figura 47.

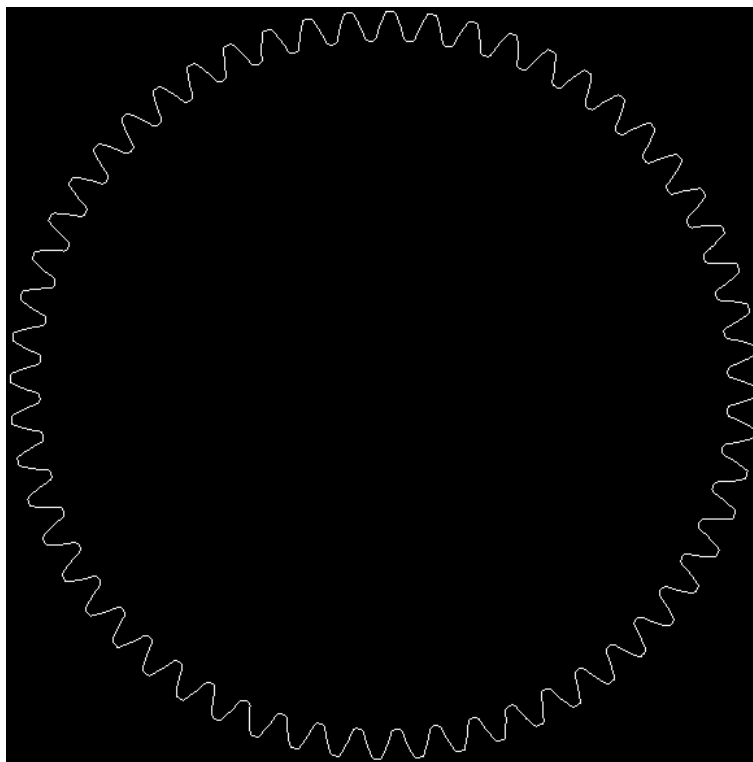


Figura 47 - Perfil completo da engrenagem convencional antes dos testes.

O perfil dos dentes foi então comparado ao perfil evolvente. Para melhor visualização, foi escolhida aleatoriamente uma sequência de 3 dentes, sobre a qual foi sobreposta uma sequência de perfis evolventes. A Figura 48 mostra a comparação para a engrenagem convencional, enquanto que a Figura 49 mostra a comparação para a engrenagem sinterizada.

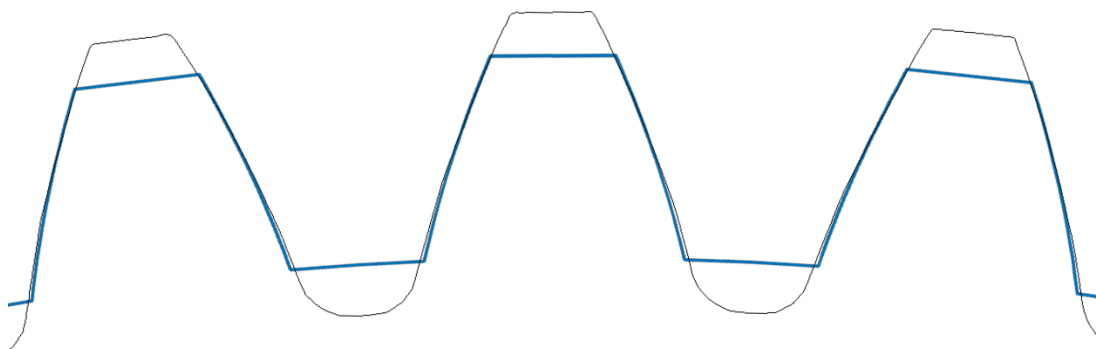


Figura 48 - Comparação entre o perfil dos dentes da engrenagem convencional (preto) e o perfil evolvente (azul).

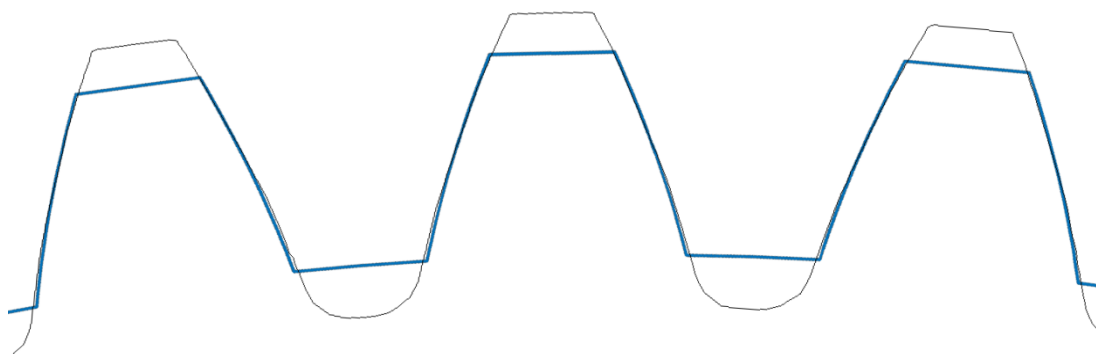


Figura 49 - Comparação entre o perfil dos dentes da engrenagem sinterizada (preto) e o perfil evolvente (azul).

As diferenças mais notáveis entre os perfis ocorre no topo dos dentes e nas regiões entre os dentes, no fundo dos dentes. A primeira diferença ocorre devido ao fato de as engrenagens foram usinadas com um diâmetro de cabeça dos dentes maior do que o especificado. Como foi verificado que, mesmo assim, o topo dos dentes não possui interferência com o par engrenado, esse fato pode ser desconsiderado. Já a diferença na região entre os dentes ocorre devido ao processo de geração dos dentes, originando o raio de filete, como mostra a Figura 50.

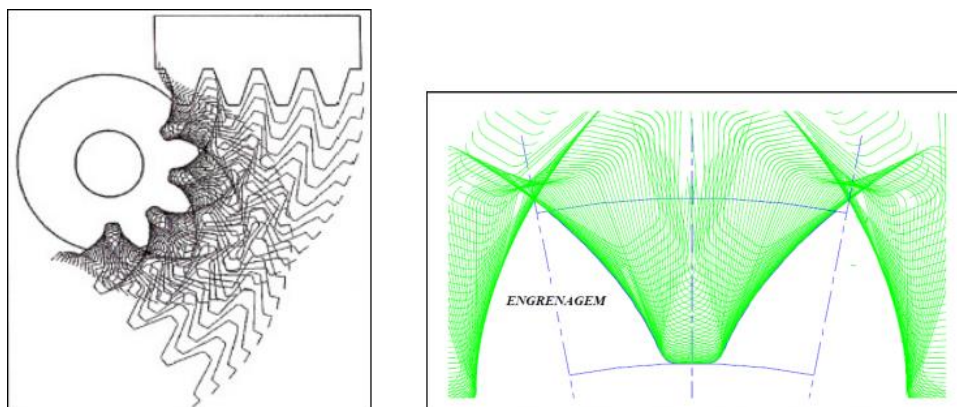


Figura 50 - Processo de geração dos dentes de uma engrenagem (BUOGO, R. P. F., 2010).

Há também uma pequena diferença na região do flanco dos dentes, provavelmente originada durante a usinagem. Como a diferença faz com que a base dos dentes seja maior do que o perfil evolvente, não há enfraquecimento dos dentes. Além disso, como foi identificada uma diferença pequena, de no máximo 0,09 mm, espera-se que haja uma interferência desprezível no engrenamento. Dessa forma, é possível considerar que o perfil dos dentes das engrenagens é bastante próximo do perfil evolvente.

4.3 TESTES

Os testes das engrenagens foram realizados em simulações da prova de enduro de resistência das competições de Baja SAE, conforme descrito anteriormente. Para cada engrenagem, foi realizado um teste de 8 horas, o equivalente a duas provas de enduro. A realização de um teste mais longo tem como objetivo considerar uma margem de segurança, de forma a garantir que o componente não falhe durante a prova. A Figura 51 mostra o protótipo realizando o teste.



Figura 51 - Veículo Baja SAE durante a simulação da prova de enduro de resistência.

Ambas as engrenagens resistiram aos testes sem apresentarem falhas, o que mostra que a engrenagem sinterizada pode ser utilizada em veículos Baja SAE com sucesso, inclusive em situações adversas.

4.4 ANÁLISE VISUAL

Após a realização dos testes e desmontagem da engrenagem do veículo, foi feita uma análise visual para detecção de falhas ou evidências de fadiga de contato. Um exemplo de trinca visível devido à fadiga de contato está ilustrado na Figura 52.



Figura 52 - Trinca visível devido à fadiga de contato (REGO, R. R., 2011).

A análise visual não identificou quaisquer indícios de trincas na superfície dos dentes, como pode ser observado na Figura 53.

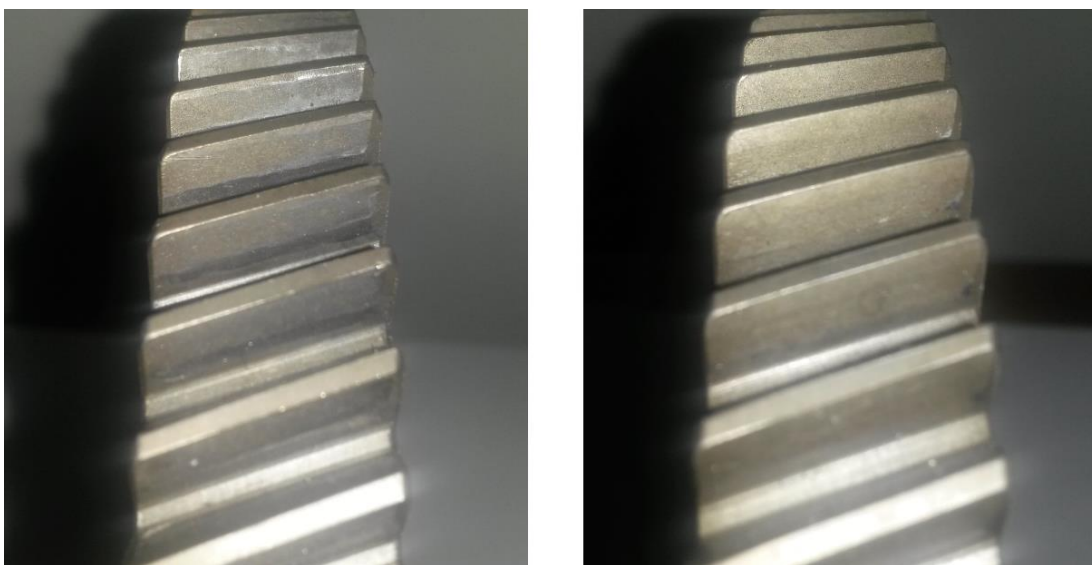


Figura 53 - Dentes das engrenagens após os testes: engrenagem sinterizada à esquerda e engrenagem convencional à direita.

4.5 COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS DENTES DE ANTES E APÓS OS TESTES

Nessa etapa, a medição do perfil dos dentes foi realizada nos mesmos moldes da medição realizada antes dos testes em campo, apenas dando uma atenção maior à limpeza das peças antes das medições devido ao fato de terem sido lubrificadas com óleo nos testes em campo.

Para facilitar a visualização, foi escolhido um dente aleatoriamente para ilustração. A comparação entre os perfis de um dente referentes a antes e após os testes para a engrenagem sinterizada está representada na Figura 54.

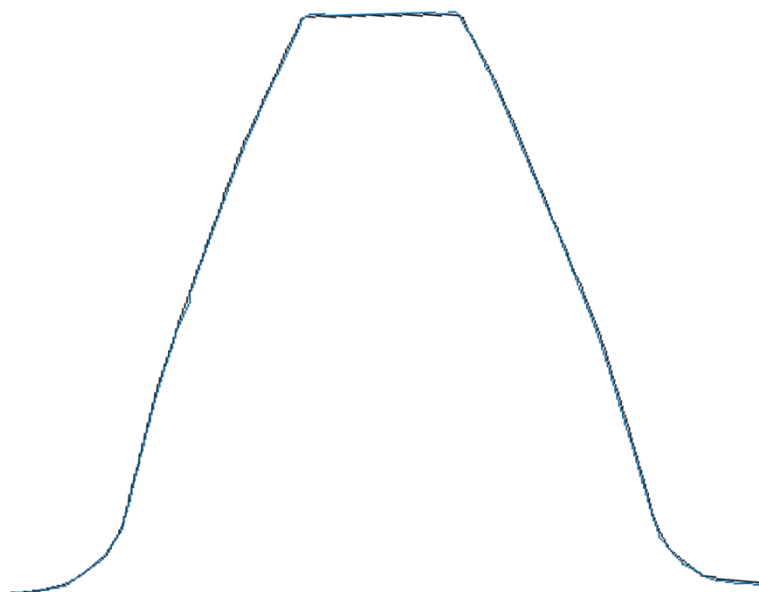


Figura 54 - Comparação entre os perfis de um dente da engrenagem sinterizada referentes a antes dos testes (preto) e após os testes (azul).

É possível observar que o perfil dos dentes da engrenagem sinterizada não foi modificado com os testes, de forma que não foi possível quantificar a diferença entre os perfis.

Já a comparação entre os perfis da engrenagem convencional está ilustrada na Figura 55.

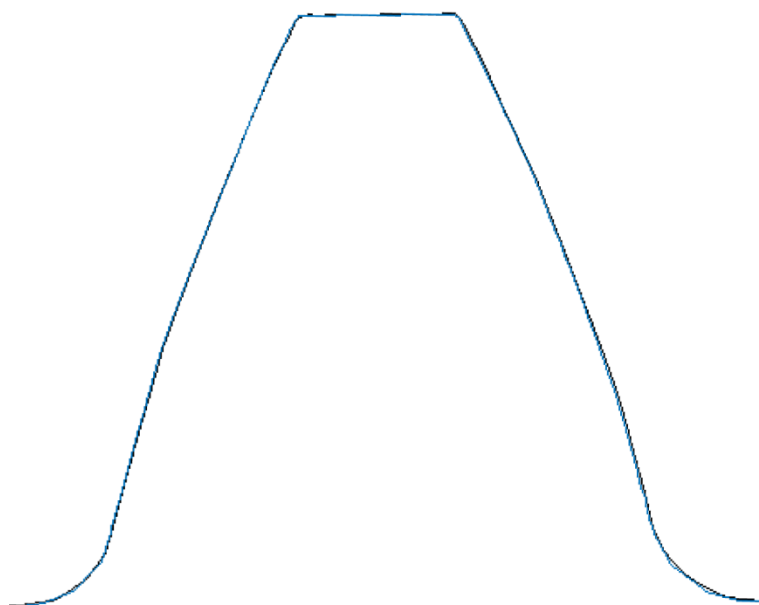


Figura 55 - Comparação entre os perfis de um dente da engrenagem convencional referentes a antes dos testes (preto) e após os testes (azul).

De forma similar à engrenagem sinterizada, os perfis obtidos são muito parecidos e não foi possível quantificar a diferença entre eles.

Assim, apesar de terem sido submetidos a um teste de enduro, os dentes das engrenagens não apresentam sinal de deformação ou desgaste.

4.6 ANÁLISES METALGRÁFICAS

A análise metalográfica da engrenagem sinterizada mostrou que sua estrutura é martensítica com um alto teor de carbono na superfície, enquanto que no núcleo sua estrutura é basicamente martensítica com um baixo teor de carbono. Uma imagem da análise a um aumento de 50x pode ser visualizada na Figura 56.

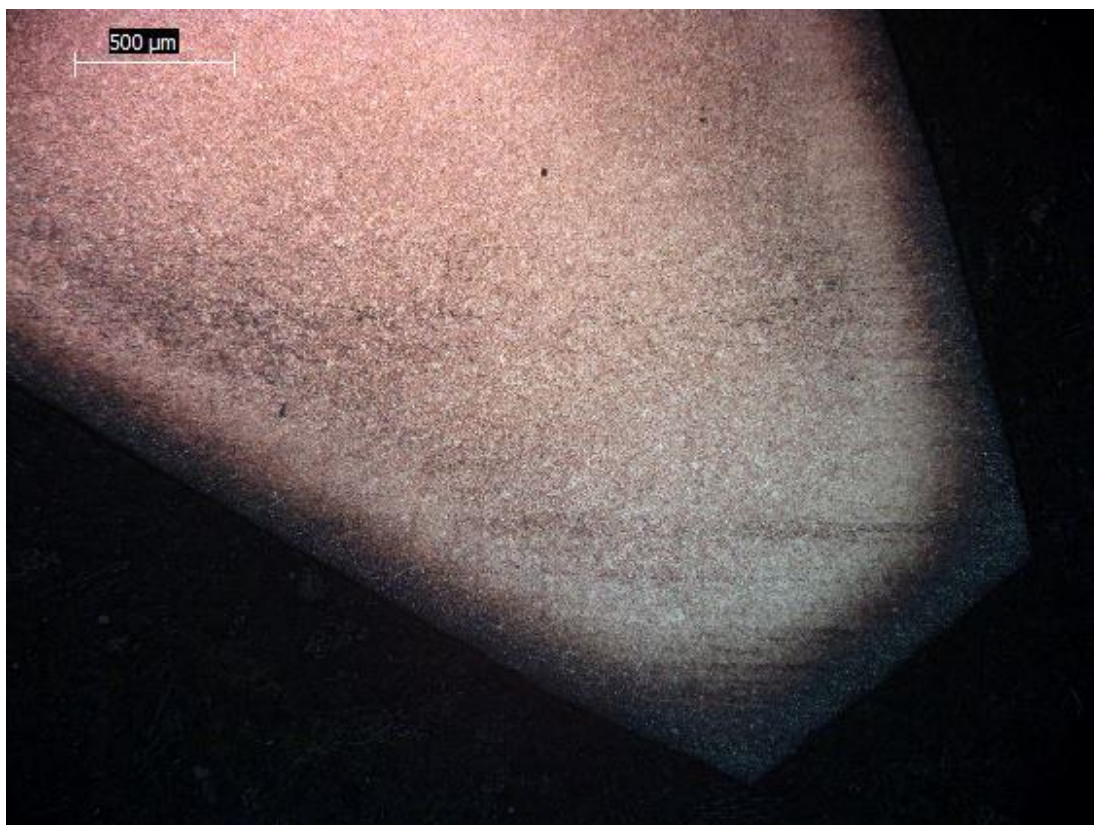


Figura 56 - Análise metalográfica de um dente da engrenagem sinterizada a um aumento de 50x.

A transformação de todo o material em martensita, inclusive no núcleo, é facilitada pelo fato de o Astaloy™ 85 Mo conter um teor relativamente elevado de molibdênio, de 0,85%. Além disso, uma possibilidade é a de que o material ainda contém pequenos poros, que permitem uma difusão da atmosfera rica em carbono e

nitrogênio no interior do componente, favorecendo a mudança de fase. No entanto, não foram encontrados poros no material durante a análise metalográfica, fazendo crer que a transformação para martensita tem como principal fator responsável o elevado teor de molibdênio.

A espessura da camada carbonitretada pode ser definida como a distância o ponto em que a dureza cai para 550 HV_{0,1} e a superfície (BENGTSSON; FORDÉN; BERGSTRÖM, 2004). No entanto, um indicador desse valor é a espessura da camada com estrutura martensítica, facilmente obtida através da análise metalográfica.

Na engrenagem sinterizada, apesar de sua estrutura ser totalmente martensítica, foi determinada a espessura da camada com alto teor de carbono na região do flanco através da análise metalográfica (Figura 57). A espessura encontrada foi de aproximadamente 0,13 mm. Esse valor está aquém do especificado, porém como seu núcleo é essencialmente constituído por martensita, uma estrutura com dureza elevada, é provável que a espessura da camada definida pela queda de dureza a partir da superfície seja maior do que a observada e se aproxime mais do valor especificado.

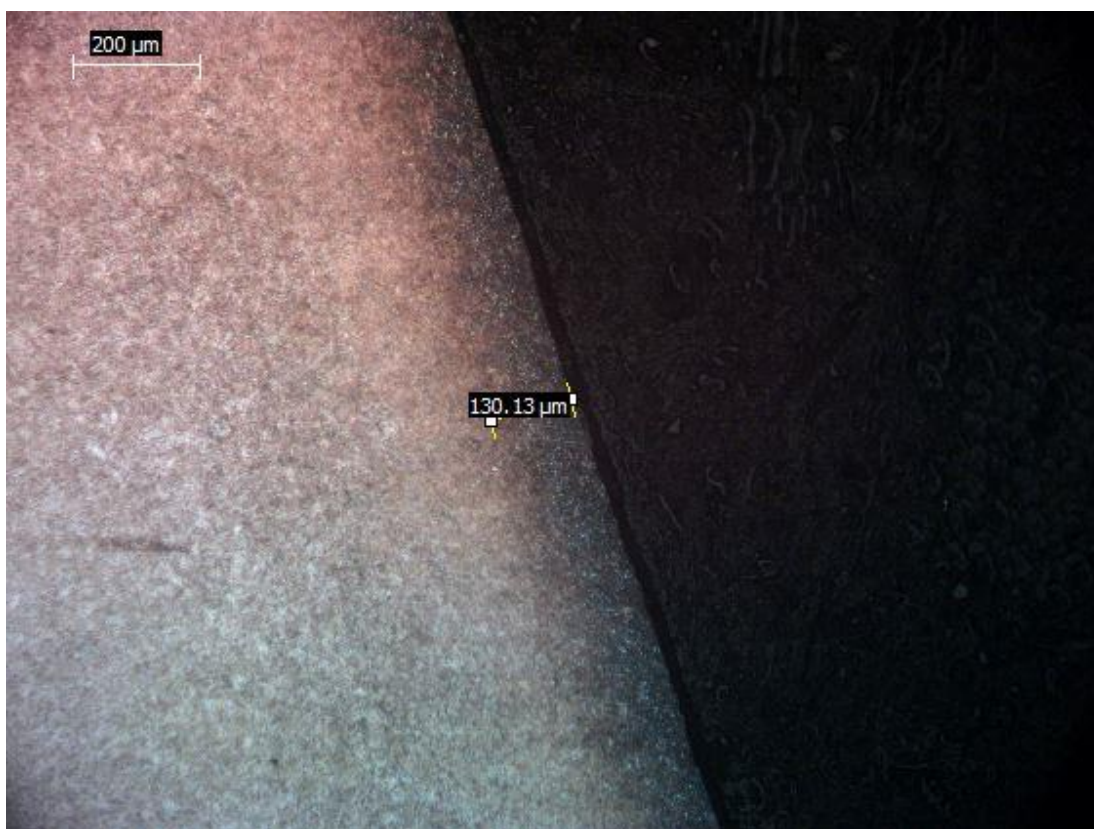


Figura 57 - Análise metalográfica da camada carbonitretada de um dente da engrenagem sinterizada a um aumento de 100x.

A imagem da análise metalográfica do núcleo dos dentes da engrenagem sinterizada, essencialmente martensítica com baixo teor de carbono, pode ser melhor visualizada na Figura 58, obtida com um aumento no microscópio de 200x.



Figura 58 - Análise metalográfica da região do núcleo de um dente da engrenagem snterizada a um aumento de 200x.

Já as análises metalográficas nos dentes da engrenagem fabricada a partir de aço convencional mostraram que a estrutura da sua superfície é martensítica com um alto teor de carbono e seu núcleo é composto essencialmente por bainita com regiões ferríticas. Uma imagem da análise obtida a um aumento de 50x está representada na Figura 59.



Figura 59 - Análise metalográfica de um dente da engrenagem convencional a um aumento de 50x.

A existência de ferrita acontece provavelmente devido a uma relativamente baixa taxa de resfriamento durante a têmpera. Isso acontece pois, à medida que a taxa de resfriamento é elevada, a taxa de difusão do carbono, que controla o crescimento da ferrita, diminui (HÖGANÄS AB, 2007).

No material convencional, a distinção entre a superfície e o núcleo é mais evidente devido à mudança de fase. A espessura da camada martensítica é pouco maior do que 0,35 mm, valor muito próximo do especificado (Figura 60). Esse valor pode ser utilizado com maior confiança na determinação da camada tratada pois a estrutura bainítica possui uma dureza menor do que 550 HV, valor utilizado como limite da camada, como mostra a Figura 61 (HÖGANÄS AB, 2007).

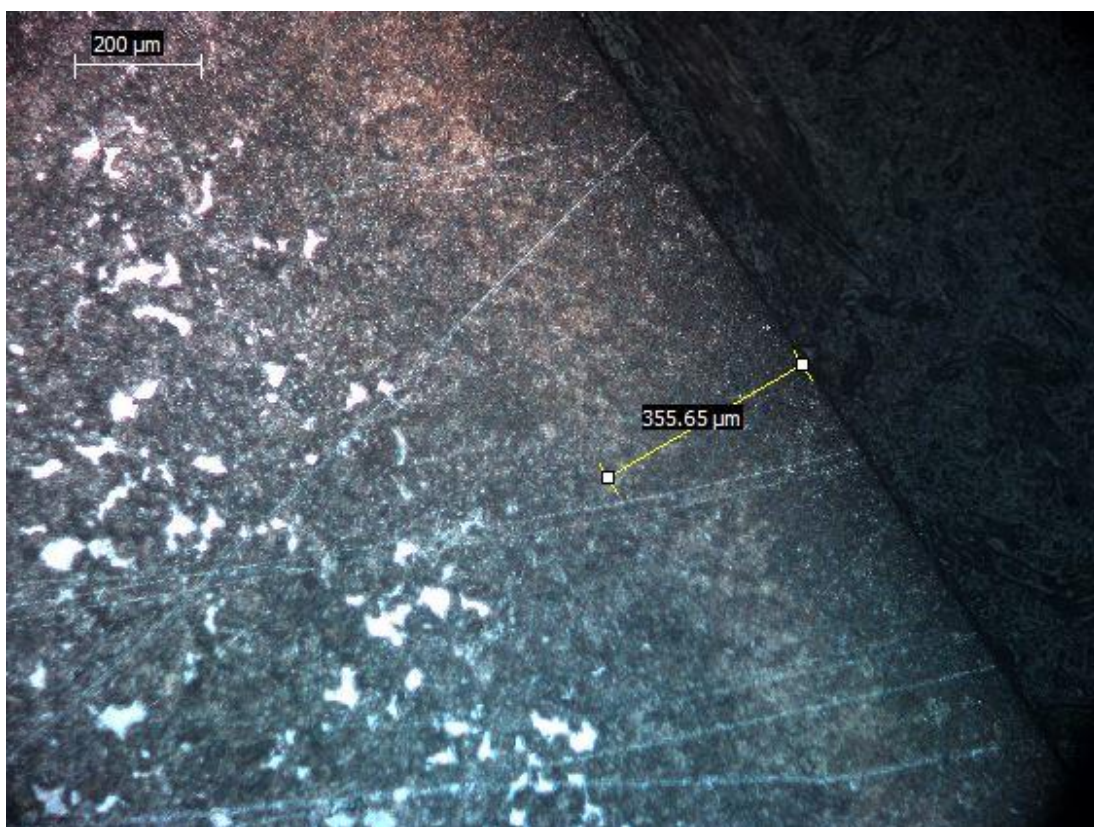


Figura 60 - Análise metalográfica da camada carbonitretada da engrenagem convencional a um aumento de 100x.

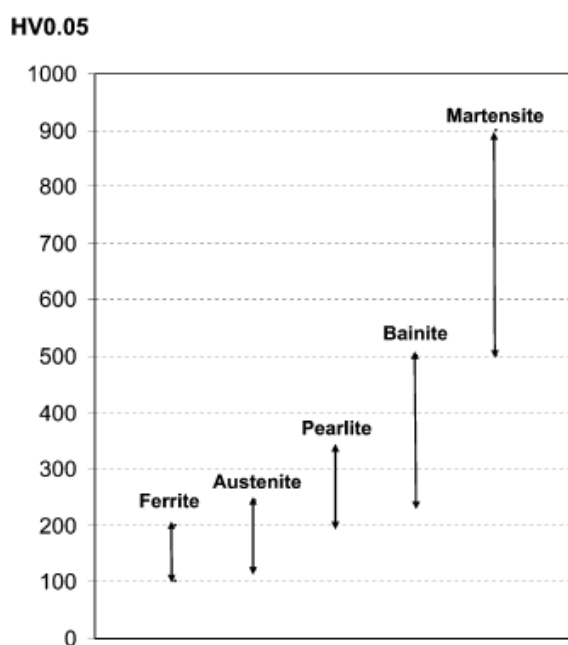


Figura 61 - Faixa de dureza das diferentes fases do aço (HÖGANÄS AB, 2007).

Na Figura 62 é possível visualizar melhor a estrutura do núcleo dos dentes da engrenagem de aço convencional. A matriz é formada por estrutura bainítica, enquanto que as regiões esbranquiçadas são ferríticas.

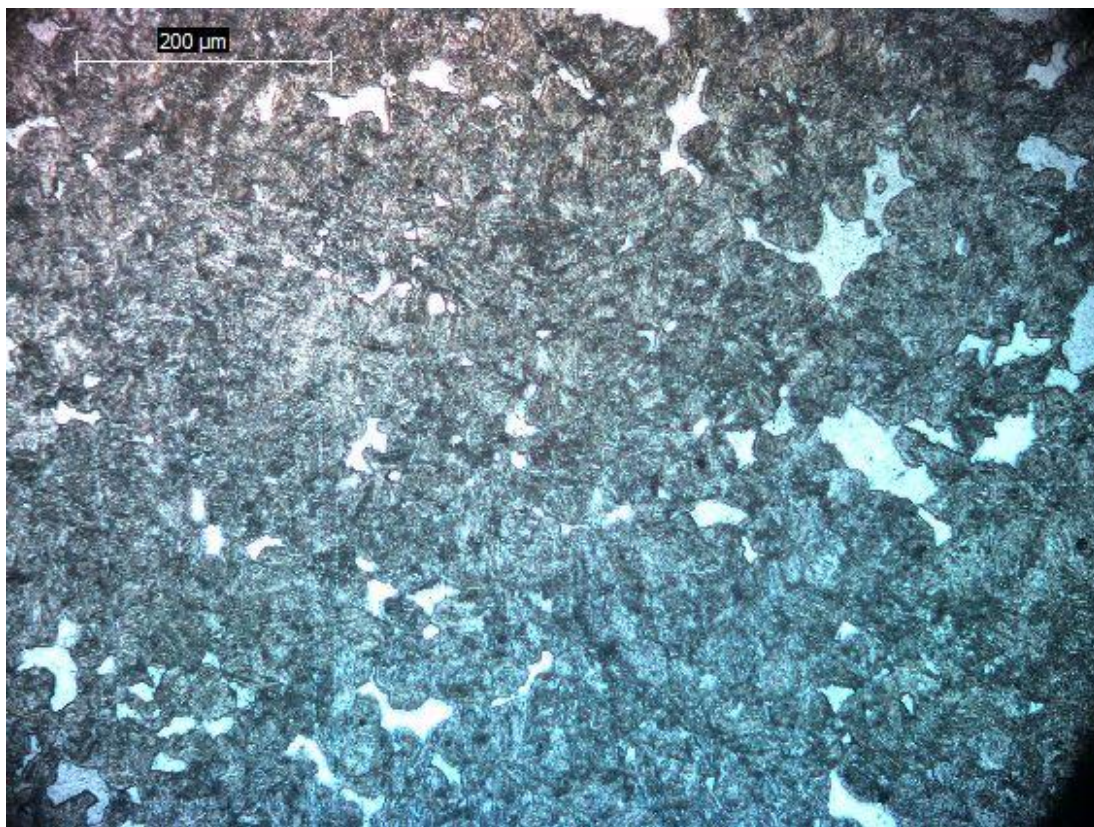


Figura 62 - Análise metalográfica da região do núcleo da engrenagem convencional a um aumento de 200x.

5 CONCLUSÕES

Primeiramente, para que uma engrenagem fabricada a partir de aço sinterizado ou a partir de qualquer novo material ou processo de fabricação seja totalmente viabilizada para produção em larga escala, suas propriedades devem ser iguais ou superiores em relação ao que já é usado atualmente. Uma primeira análise das tensões admissíveis dos materiais mostrou que o material sinterizado a partir da mistura de pós metálicos composta por Astaloy™ 85 Mo e 0,28% C tem propriedades de resistência superiores às do aço SAE 8620, comumente utilizado na fabricação de engrenagens.

O estudo também mostrou que a engrenagem de aço sinterizado consegue sobreviver aos testes mais severos pelos quais um veículo Baja SAE deve passar sem apresentar falhas ou sinais visíveis de fadiga.

A engrenagem fabricada a partir de aço convencional também sobreviveu aos testes, não sendo possível quantificar a diferença com relação ao desempenho dos dois componentes. Entretanto, é importante salientar que o objetivo do trabalho não é mostrar que um material ou processo de fabricação é melhor do que o outro, mas fazer o projeto, fabricação e avaliação da engrenagem sinterizada. A engrenagem convencional serve apenas como parâmetro, visto que o material e os processos de fabricação aplicados na mesma são muito semelhantes aos utilizados pela equipe há anos.

A diferença mais notável entre as duas engrenagens foi observada durante as análises metalográficas dos componentes. Os dois componentes apresentaram uma camada superficial com estrutura martensítica com elevado teor de carbono, porém no núcleo a engrenagem sinterizada apresentou uma estrutura essencialmente martensítica com baixo teor de carbono e a engrenagem convencional apresentou uma estrutura bainítica com regiões ferríticas.

Dessa forma, pode-se dizer que o uso de aço sinterizado para a fabricação de engrenagens em veículos Baja SAE foi validado com relação à sua resistência e durabilidade.

Apesar de o estudo ter atingido seu objetivo, não foi possível determinar empiricamente o número de ciclos até a falha do componente e o modo de falha ou a

máxima resistência à flexão dos dentes, por exemplo. Esses dados poderiam ser obtidos através de ensaios em bancada, que não foram realizados principalmente pela dificuldade em encontrar bancadas disponíveis para utilização, além da limitação de material para fabricação das engrenagens sinterizadas.

O material sinterizado utilizado nesse estudo passou pelo processo HIP, que resulta em densificação total, porém é um processo mais caro e com menor produtividade. Dessa forma, uma sugestão para um próximo estudo é a utilização e avaliação de materiais a partir de pós metálicos apenas compactados e sinterizados.. Nesse caso, é recomendado fazer a densificação superficial dos dentes por rolagem, que também pode ser um parâmetro avaliado.

Além disso, outra grande vantagem das engrenagens moldadas pelo processo de compactação de pós é que não há a limitação no desenho do perfil dos dentes que existe no processo de geração. Dessa forma, outra sugestão para um próximo estudo é o reprojeto dos dentes de forma a minimizar as tensões atuantes. A Figura 63 mostra alguns exemplos de perfis de dentes projetados para engrenagens sinterizadas.

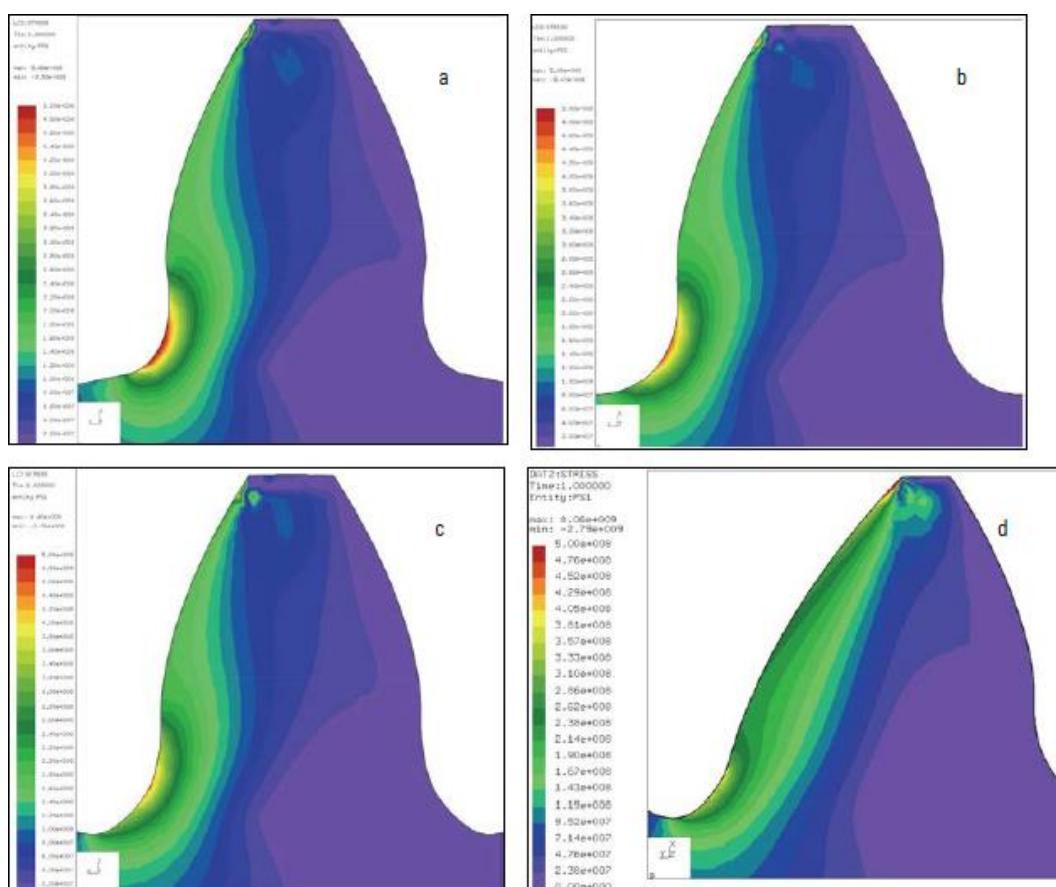


Figura 63 - Comparação entre análises de tensões atuantes na base de dentes com perfis redesenhados (b, c, d) e o perfil original (a) (FLODIN; ANDERSSON, 2013).

REFERÊNCIAS

ABREU. Histórico. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 19 - 23.

ASM INTERNATIONAL. Physical properties of carbon and low-alloy steels. In: _____. **ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys**. 10ª ed. Materials Park: ASM International, 1990. p. 517 - 532. v. 1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E140 – 07**: standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness and scleroscope hardness. West Conshohocken, 2012. 21 p.

BENGTSSON; FORDÉN; BERGSTRÖM. High performance gears. In: PM2004 WORLD CONGRESS, 6., 2004, Vienna. **Proceedings of World Congress and Exhibition of Powder Metallurgy, PM 2004: World Congress and Exhibition on Powder Metallurgy**. Shrewsbury: European Powder Metallurgy Association, 2004.

BENGTSSON; FORDÉN; SKOGLUND. Advanced forming process for high density PM gears. In: PM Asia 2005, 1., 2005, Shanghai. **PM Asia 2005 conference proceedings**. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 2005.

BUDYNAS; NISBETT. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.

BULLA. Operações posteriores: calibragem. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 231 - 233.

BUOGO, R. P. F. **Desgaste de fresa caracol na usinagem de engrenagens**. 2010. 63 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CHIAVERINI. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998. 599 p.

_____. **Metalurgia do pó: técnica e produtos**. 4ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. 326 p.

DUDLEY; RADZEVICH. **Handbook of practical gear design**. London: CRC Press, 1994. 688 p.

EGOROVA; EGOROV; SKORIKOV. Free upsetting of heated cylindrical specimens of powder materials Astaloy™ 85 Mo and Distaloy HP-1 from Höganäs. **Metallurgist**, v. 57, nos. 5-6, 2013.

ERICSSON. Principles of heat treating of steels. In: ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Heat Treating**. 10^a ed. Materials Park: ASM International, 1990. p. 13 - 49. v. 4.

FLODIN; ANDERSSON. Powder metal tooth root optimization. **GEAR TECHNOLOGY, The Journal of Gear Manufacturing**. Elk Grove Village, v. 30, n. 04, p. 56 - 59, Jun. 2013.

FLODIN; FORDÉN. Root and contact stress calculations in surface densified PM gears. In: PM2004 WORLD CONGRESS, 6., 2004, Vienna. **Proceedings of World Congress and Exhibition of Powder Metallurgy, PM 2004: World Congress and Exhibition on Powder Metallurgy**. Shrewsbury: European Powder Metallurgy Association, 2004.

GOTOH; MASUDA; HIGASHITANI. **Powder technology handbook**. 2^a ed. New York: Marcel Dekker, 1997. 944 p.

GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. METALURGIA DO PÓ – Fluxograma do processo. In: _____. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 17.

HÖGANÄS AB. **Höganäs iron and steel powders for sintered components**. Höganäs: Höganäs AB, 2002. 393 p.

_____. **Höganäs handbook for sintered components: Metallography**. Höganäs: Höganäs AB, 2007. 289 p. v. 6.

HOSOKAWA MICRON B.V. Doetinchem. **Vrieco-Nauta® mixer**. Disponível em: <<http://www.hosokawamicron.nl>>. Acesso em: 31 mar. 2014.

HUDOK et al. Carbon and low-alloy steel sheet and strip. In: ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys**. 10^a ed. Materials Park: ASM International, 1990. p. 532 - 566. v. 1

IERVOLINO. Aplicações: quando aplicar a metalurgia do pó. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 37 - 39.

_____. Metalurgia do pó presente em nossos automóveis. **Revista Industrial Heating**. Campinas, n. 11, p. 23, Abr. 2011.

_____. Engrenagens sinterizadas para caixas de transmissão automotiva. **Revista Industrial Heating**. Campinas, n. 16, p. 72-76, Jul. 2012.

IERVOLINO; BULLA. Compactação. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 163 - 208.

JUVINALL; MARSHEK. **Fundamentals of machine component design**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1991. 804 p.

LAMPMAN. Introduction to surface hardening of steels. In: ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Heat Treating**. 10ª ed. Materials Park: ASM International, 1990. p. 606 - 624. v. 4.

LECO. **CS744 Series: Carbon/Sulfur by Combustion**. St. Joseph, [2014a]. 5 p. (209-229).

_____. **SC-144DR Series: Sulfur/Carbon**. St. Joseph, [2014b]. 1 p. (209-134).

LEICA MICROSYSTEMS WETZLAR GMBH. **LEICA DM LM: System microscope for material control**. Wetzlar, [2014]. 8 p. (501-126).

LENEL. **Powder metallurgy: principals and applications**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1980. 593 p.

LOBERTO et al. Controle de qualidade. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 257 - 275.

LOBERTO et al. **PM trends for the automotive industry**. Warrendale: SAE International, 2010. 7 p.

LOBERTO; GENOVA; SILVA. Sinterização. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 209 - 230.

MITUTOYO. **Coordinate Measuring Machines: Crysta-Apex S Series**. Kanagawa, [2012]. 10 p. (E16004(3)).

NIEMANN. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Editôra Edgard Blücher Ltda., 1971. v. 2. 207 p.

ORLANDIN et al. Pós metálicos. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 127 - 141.

ORLANDIN; CARVALHO; PEGORER. Misturas. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 143 - 162.

PIRACICABA EM FESTA. Piracicaba. **Equipe da UFMG vence a Baja SAE BRASIL-PETROBRAS**. Disponível em: <<http://www.piracicabaemfesta.com.br>>. Acesso em: 10 out. 2013.

POWELL; BEVER; FLOE. Carbonitriding of plain carbon and boron steels. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Transactions of American Society for Metals**. Ohio: Metals Park, 1954. p. 1359 - 1371. v. 46.

REGO, R. R. **Influência do uso de distribuição bimodal de classes de granalha no processo de shot peening sobre o perfil de tensões residuais de engrenagens**. 2011. 179 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2011.

REVANKAR. Introduction to hardness testing. In: ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation**. 10^a ed. Materials Park: ASM International, 1990. p. 415 - 427. v. 8.

RODRIGUES. Compactação isostática. In: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. p. 301 - 303.

THÜMMLER; OBERACKER. **An introduction to powder metallurgy**. London: The Institute of Materials, 1993. 332 p.

UPADHYAYA, A.; UPADHYAYA, G. **Powder metallurgy: science, technology and materials**. Hyderabad: University Press (India) Private Limited, 2011. 518 p.