

ESTUDO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE UMA PEÇA POR METALURGIA DO PÓ

STUDY OF THE FEASIBILITY OF PRODUCTION OF A PART FOR POWDER METALURGY

OLIVEIRA JR. Alex¹; OLIVEIRA, Diego²;

¹Graduando do Curso de Engenharia Mecânica – Universidade São Francisco

d.a-oliveira@hotmail.com

RESUMO. Em um cenário em que as evoluções e transformações são constantes, torna-se iminente a busca por melhorias no processo de fabricação de peças. Hoje, incorporar a eficácia na fabricação de engrenagens requer diversas etapas de fabricação, juntamente com grande consumo de matéria prima. O presente trabalho tem por objetivo analisar e substituir uma engrenagem do impulsor de partida, fabricada até então pelo processo de forjamento a frio. A engrenagem que substituirá a anterior será fabricada em aço (pós de aço), pelo processo de sinterização, com intuito de gerar resultados com base em estudos de caso, seus quantitativos e detalhes inerentes de sua densidade, esforços e resistência mecânica. Para isso, foram apresentadas as fundamentações teóricas para as definições e dimensões adequadas da engrenagem a ser construída assim como seu ciclo de vida, produtividade e tecnologia no processo de fabricação da metalurgia do pó. O processo de fabricação de engrenagens pelo método sinterizado modificou toda a forma de se construir peças, e têm sido amplamente empregado por dispor de ferramentas precisas, composições homogêneas e custos reduzidos, com garantia e cumprimento das normas especificadas pela *DIN 30910-4 SINT D32 e MPIF FLC-4908*, acerca do escopo e facilitando a fabricação de peças, iniciando o ciclo na formação do *blank*, mistura dos pós, compactação e por fim a sinterização e acabamento da peça final.

Palavras-chave: Sinterização, Metalurgia do Pó, Processo de Fabricação, Compactado verde.

ABSTRACT. In a scenario in which evolutions and transformations are constant, the search for improvements in the parts manufacturing process is imminent. Today, incorporating an effectiveness in the manufacture of gears requires several manufacturing steps along with high consumption of raw material. The present work has the objective of analyzing and replacing a gear of the starting impulse, manufactured until the cold forging process. The gear that replaces an earlier process, in order to generate results based on case studies, their quantitative and inherent details of their density, strength and mechanical strength. Therefore, they were presented as theoretical foundations for the appropriate directions and dimensions of the gear to be built as their life cycle, productivity and technology in the process of manufacturing powder metallurgy. The sintering process has changed the way parts are built, and it has been widely used because it has precise tools, homogenous compositions and low costs, with a guarantee and compliance with the standards specified by *DIN 30910-4 SINT D32 and MPIF FLC-4908*, on its scope and facilitating a part manufacturing, starting the cycle in the formation of the blank space, mixing of powders, compaction and finally the sintering and finishing of the final part.

Keywords: Sintering, Powder metallurgy, Manufacturing process, Green compacted.

INTRODUÇÃO

O mundo apresenta claras evidências de evolução, envolto em um emaranhado de variáveis que estão intimamente interligadas e influenciam direta ou indiretamente outras cadeias de ações. Algumas mudanças são imediatamente percebidas, porém outras somente sentidas e incorporadas ao nosso cotidiano, ao longo de décadas. Esta mutação constante também é verdadeira na evolução dos negócios, sustentados pelos pilares da tecnologia, dos processos de fabricação e da cultura. Entre estas evoluções no processo de fabricação, surgiu à metalurgia do pó, comumente denominada sinterização, que vem a ser um processo altamente desenvolvido de manufatura de peças metálicas ferrosas e não ferrosas.

Como afirmam IERVOLINO *et al.* (2009, p. 20), “Este método teve grande expansão após a Segunda Guerra Mundial (1945)”, ainda segundo o autor, isto ocorreu devido o desenvolvimento e aprimoramento de novos processos de fabricação dos sinterizados, como a compactação isostática. Basicamente, os pós metálicos são configurados em ferramental apropriado com posterior aquecimento sob condições controladas, a temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal base para promover ligação metalúrgica entre as partículas (SILVA, 1998). As matérias primas influenciam no processamento e no acabamento final das peças e componentes, na consistência e qualidade dos pós metálicos. Por isso elas passam por uma verificação, adequação e análise, para depois serem definidas. As principais diferenças das matérias-primas são as partículas que alteram o tamanho, forma, porosidade, estrutura, superfície, densidade aparente, velocidade de escoamento, compressibilidade, composição química e pureza (IERVOLINO *et al.* 2009, p. 133).

Atualmente são inúmeras as aplicações industriais de peças sinterizadas. A exatidão no controle da composição química desejada do produto final, a redução ou eliminação das operações de usinagem, o bom acabamento superficial, a pureza dos produtos obtidos e a facilidade de automação do processo produtivo, são alguns dos motivos que tornaram a metalurgia do pó uma fonte produtora de peças para, praticamente, todos os ramos industriais, como o automobilístico, o da informática, o aeroespacial (IERVOLINO *et al.* 2009, p. 20).

Torna-se importante destacar que há vários processos de fabricação de peças metálicas, e estes procedimentos envolvem passos químicos ou mecânicos, que fazem parte da manufatura de um ou vários itens, alguns dos principais processos são, forjamento, fundição, metalurgia do pó, entre outros. Sendo cada uma com suas particularidades e, escolhidos dependendo do que se deseja obter, e quais as aplicações da peça a ser construída. Por meio de pesquisas, espera-se analisar a viabilidade em produzir e substituir uma engrenagem, cuja fabricação atualmente é forjada a frio por uma engrenagem fabricada pelo processo de sinterização, engrenagem esta que pertence ao grupo automobilístico, sendo utilizada no impulsor de partida do veículo corsa 1.0, 1.4, 1.6 litros EFI, conforme ilustra a Figura 1.



Figura 1- Engrenagem do motor de partida do corsa 1.0, 1.4, 1.6. (Fonte: Próprio autor)

O processo de fabricação da engrenagem passa por diversas etapas, até chegar ao produto final. Ela pode ser obtida pelos processos de forjamento ou pelo processo de sinterização. Conforme ilustra a figura 2, a engrenagem forjada a frio inicia-se na formação do *blank* e termina no processo de tratamento térmico de nitretação.

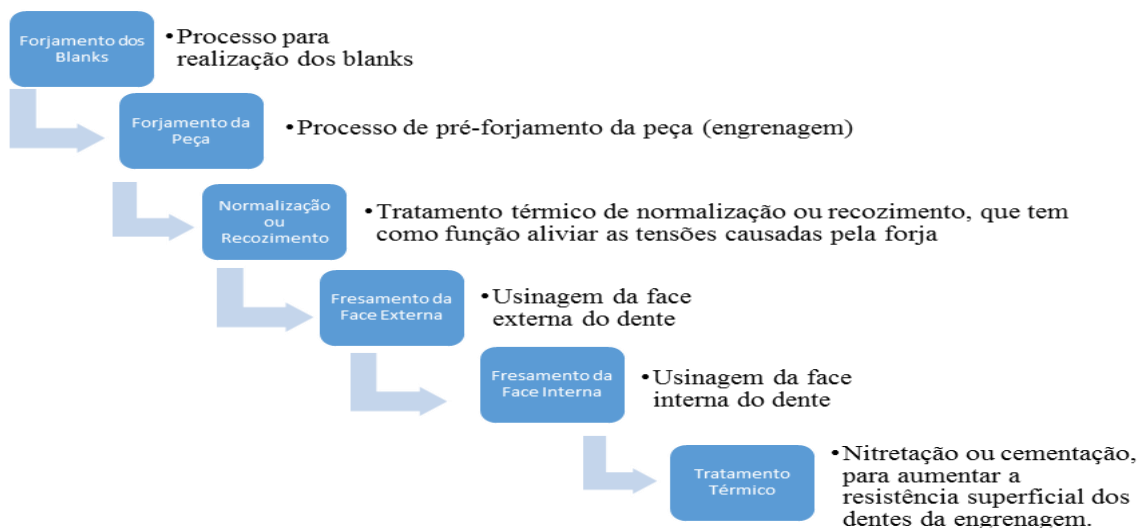


Figura 2- Etapas de fabricação da engrenagem pelo processo de forjamento (Fonte: Próprio autor)

As etapas de fabricação da engrenagem pelo método de sinterização estão ilustradas na Figura 3.

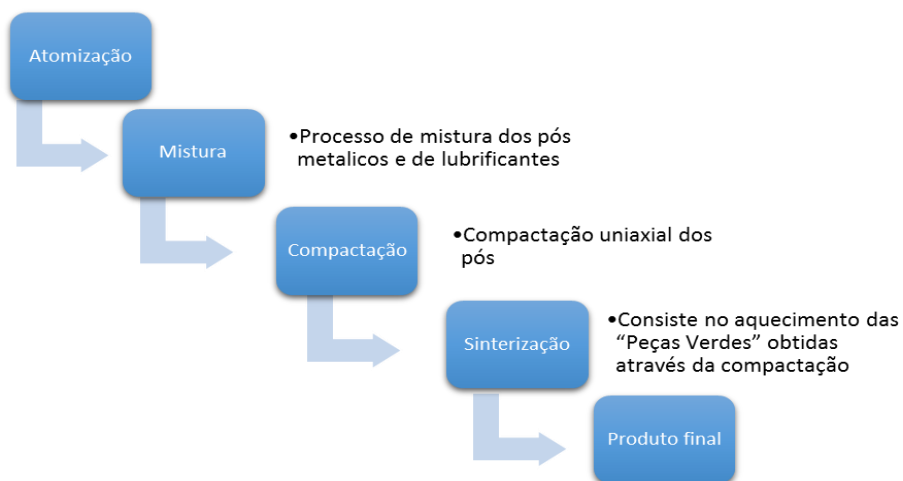


Figura 3: Etapas de fabricação da engrenagem pelo processo de sinterização (Fonte: Próprio autor).

Por apresentar um processo simples e de baixo custo de fabricação, a técnica da metalurgia do pó vem sendo amplamente utilizada e, segundo CHIAVERINI (1992, p.05) “As aplicações de peças sinterizadas vêm se estendendo aos mais diversos campos industriais e avançando para áreas tecnológicas cada vez mais sofisticadas”.

Como é apresentado na figura 3, a fabricação da engrenagem pelo método de metalurgia do pó passa por algumas etapas e tem suas particularidades, como são vistas a seguir:

Atomização: “A matéria prima, na metalurgia do pó, constitui em um fator básico, principalmente no que se refere à sua uniformidade”. CHIAVERINI (1992, p.11).

Ainda segundo o autor, os três métodos de obtenção dos pós são:

- Reação química e decomposição
- Atomização em água de metais fundidos (mais utilizado)
- Deposição eletrolítica

Por ser um processo simples é extremamente importante o seu controle, ou seja, todos seus característicos devem ser conhecidos, determinados e controlados com a maior profundidade.

Mistura: “Operação em que dois ou mais pós de composição diferentes são intimamente misturados”, CHIAVERINI (1992, p.49). A escolha da liga depende das características mecânicas finais desejadas para o produto.

Compactação: A compactação constitui na fase inicial do ciclo de consolidação dos pós metálicos, e estes compactados são chamados de “PEÇAS VERDES”.

Segundo IERVOLINO *et al.* (2009, p. 163), “A compactação do pó pode ser realizada de várias maneiras”, o processo pode ser por uma compactação de alta velocidade, isostática, conformação sem pressão, moldagem de pós por injeção (PIM/MIM) e compactação uniaxial. A compactação uniaxial é o sistema mais simples de conformação dos pós, pois possui componentes (ferramental) básicos como mostra a Figura 4, e será o utilizado no estudo.

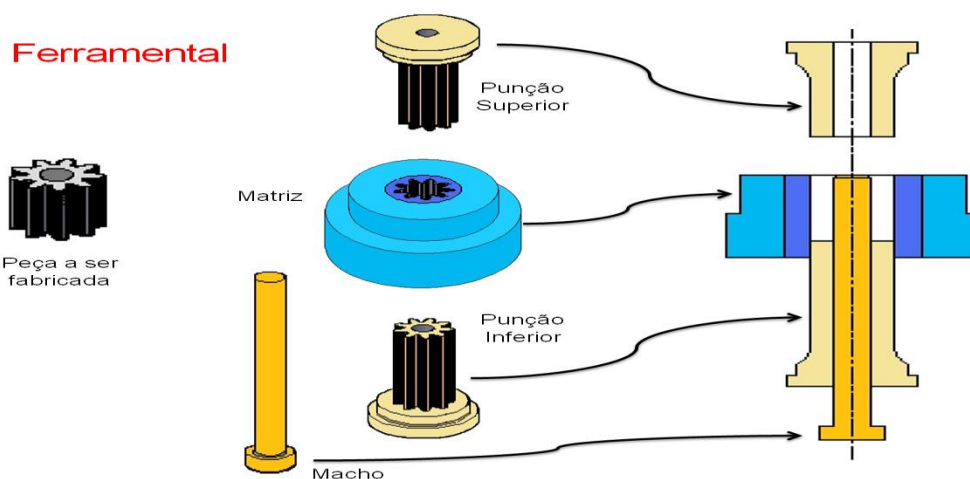


Figura 4- Ferramental para compactação (Fonte: Site grupo setorial de metalurgia do pó)

Sinterização: “A sinterização é a operação fundamental da técnica de metalurgia do pó, pois ela finaliza o ciclo de consolidação dos pós metálicos, ciclo esse iniciado com a compactação”, CHIAVERINI (1992, p. 109).

Ainda segundo o autor, “A sinterização consiste no aquecimento das “PEÇAS VERDES” obtidos através da compactação, este processo de transformação ocorre por mecanismo de transportes atômicos difusionais a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do constituinte principal”.

Produto final: “Os produtos finais passam por operação complementar, como calibragem, cunhagem, usinagem, tratamento térmico, tratamento de superfície, rebarbação, infiltração ou jateamento”, - (CHIAVERINI 1992, p. 150)

Ainda segundo o Autor, estes processos são necessários dependendo do que se deseja obter no produto acabado.

Inicialmente, serão realizados os cálculos para dimensionar a engrenagem a ser fabricada, como é apresentado nas equações 1 a 13:

Os parâmetros mais importantes na fabricação de uma engrenagem são diâmetro externo (d_e), diâmetro interno (d_i), diâmetro primitivo (d_p), diâmetro de base (d_b), módulo (m), passo da engrenagem (p), vão do dente da engrenagem (v), adendo (a), dedendo (b), altura do dente (h), densidade (D), e o torque (T).

As geometrias dos dentes da engrenagem são apresentadas na Figura 5.

O diâmetro externo (d_e) pode ser calculado pela equação 1, onde m é módulo em mm e z o número de dentes da engrenagem.

$$d_e = m * (z + 2) \quad (1)$$

Já o diâmetro interno (d_i) pode ser calculado pela equação 2, onde d_p é o diâmetro primitivo em mm e m é módulo em mm.

$$d_i = d_p - 2 * 1,166 * m \quad (2)$$

Para o diâmetro primitivo (d_p) pode ser calculado pela equação 3, onde m é módulo em mm e z o número de dentes da engrenagem.

$$d_p = m * z \quad (3)$$

O diâmetro de base (d_b) pode ser calculado pela equação 4, onde d_p é o diâmetro primitivo em mm e θ é o ângulo teta da saída do dente da engrenagem ($^\circ$).

$$d_b = d_p * \cos\theta \quad (4)$$

Conforme mencionado anteriormente, a Figura 5 a seguir representa a geometria dos dentes da engrenagem.

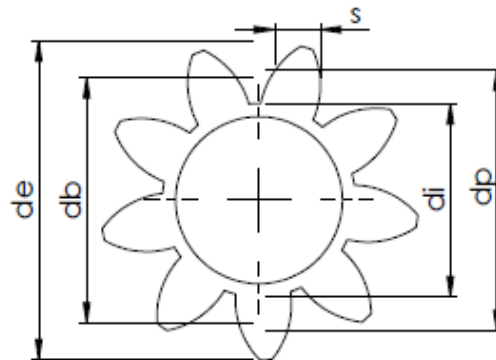


Figura 5- Geometria dos dentes da engrenagem (Fonte: Próprio autor).

Para o módulo (m) pode ser calculado pela equação 5, onde d_e é o diâmetro externo em mm e z o número de dentes da engrenagem.

$$m = \frac{d_e}{(z + 2)} \quad (5)$$

Para o passo da engrenagem (p) pode ser calculado pela equação 6, onde m é o módulo em mm.

$$p = m * \pi \quad (6)$$

O vão do dente da engrenagem (v) pode ser calculado pela equação 7, onde p é o passo da engrenagem em mm.

$$s = v = \frac{p}{2} \quad (7)$$

O adendo(a) pode ser calculado pela equação 8, onde m é o módulo em mm.

$$a = m \quad (8)$$

Já para o dedendo (b) pode ser calculado pela equação 9, onde m é o módulo em mm.

$$b = 1,166 * m \quad (9)$$

A altura do dente (h) pode ser calculada pela equação 10, onde m é o módulo em mm.

$$h = 2,1666 * m \quad (10)$$

Em seguida será realizado o cálculo da densidade da engrenagem, onde segundo CHIAVERINI (1992, p.174), “A densidade final da peça pode ser conhecida pela equação a seguir”. Para a densidade (D), pode ser calculado pela equação 11, onde M é a massa da peça em gramas e V o volume da peça em cm^3 .

$$D = \frac{M}{v} \quad (11)$$

Para o cálculo da correlação entre dureza (HB) e a resistência à tração (σ) foi utilizado a equação 13, onde HB é a dureza em Brinell e σ é a resistência a tração em MPa.

$$\sigma = \alpha * HB \quad (12)$$

O torque (N.m) pode ser calculado pela equação 12, onde P é a potência em W e n é a velocidade de rotação do motor em rpm.

$$T = \frac{P * 60}{2\pi * n} \quad (13)$$

O objetivo deste trabalho é avaliar através de um estudo de caso, a viabilidade de produção de uma engrenagem por metalurgia do pó, comparando-as engrenagens fabricadas pelo processo de forja e pelo processo de metalurgia do pó, calculando e analisando, os esforços que a engrenagem sofrerá ao fazer com que o motor sai do momento estático e entre em movimento rotacional, os pontos de maior desgaste da engrenagem motriz, as principais falhas, os processos de fabricação utilizados até obter-se o produto final, e o custo de fabricação. Se objetiva, também, obter uma produção de qualidade e sustentabilidade, já que a metalurgia do pó utiliza grande parte do material (95%).

METODOLOGIA

Para se atingir o objetivo geral deste trabalho, inicialmente foi realizado o levantamento bibliográfico a respeito do tema abordado e dos assuntos que estão ligados a ele, seja direta ou indiretamente, por meio de periódicos, sites de busca e livros.

Para atestar o estudo da viabilidade em produzir uma peça por metalurgia do pó, foi utilizada uma engrenagem do impulsor de partida, fabricada pelo processo de forjamento a frio, para estudo das dimensões da peça para a fabricação de uma engrenagem com as mesmas características, porém pelo processo da metalurgia do pó.

Foram realizados os cálculos para dimensionar a engrenagem a ser fabricada conforme Figura 6, referente à engrenagem forjada foram utilizados dados técnicos fornecidos pela tabela de fabricação da empresa ZEN e buscando viabilizar o estudo e aplicação da peça sinterizada, foi solicitado o auxílio de um profissional técnico da área de sinterização, onde por meio destes, foi possível estimar quais as informações seriam necessárias para obter dados referentes à engrenagem sinterizada.

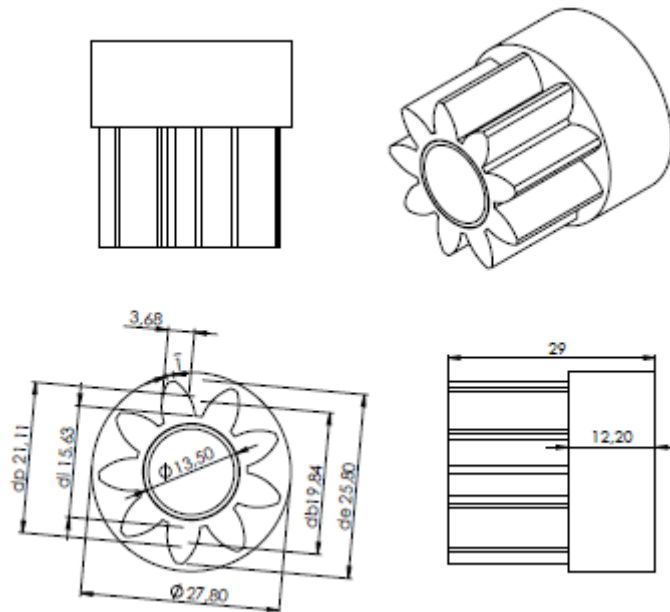


Figura 6- Geometria da engrenagem analisada (Fonte: Próprio autor).

Após os dados obtidos da engrenagem forjada, utilizamos os dados teóricos referentes à sinterização, composição química (apêndice A), e por meio da norma *DIN SINT D32*, foi agregado todos os dados necessários para realização de comparação entre os dois tipos de processos de fabricação. Já com o uso do software SolidWorks, foi feito um desenho da engrenagem que será analisada (Figura 7).

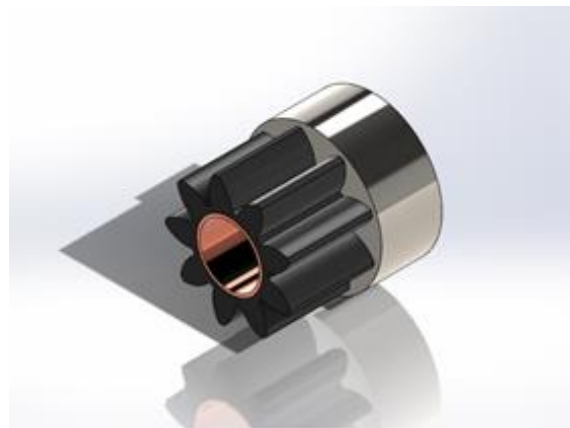


Figura 7- Engrenagem sinterizada analisada (Fonte: Próprio autor).

Em seguida, através de ensaios em laboratório foi encontrado a dureza da engrenagem forjada a frio (Figura 8). O mesmo ensaio foi realizado para engrenagem sinterizada (Figura 9). No ensaio foi utilizado um penetrador de diamante 120° , com o método HRC, utilizando uma carga de 150 kg.

Como proposto nos objetivos específicos, foi elaborado um projeto teste, no qual foi utilizado o conceito da tecnologia, o que possibilitou a visualização da engrenagem em um ambiente simulado na dimensão 3D (Figura 7), incluindo o teste de elementos finitos e teste

estático, permitindo assim a fabricação da engrenagem sinterizada, por estar dentro das normas técnicas da ISO 2738, ASTM B328 e MPIF 42. Pode-se considerar que esta é a principal vantagem de sua utilização, uma vez que traz por consequência a diminuição das perdas de materiais e falhas construtivas, diminuindo assim o custo geral de fabricação.

O quantitativo gerado através do programa se mostrou eficiente, facilitando o processo de simulação e testes, dado que é gerado automaticamente e a possibilidade de erros é extremamente pequena. A partir dos resultados, foi possível verificar a viabilidade da fabricação da engrenagem do bendix do motor de partida para área automotiva, em que muitos fabricantes, que têm a função de fabricar e controlar os projetos realizados, trabalham em conjunto e a maior dificuldade está na compatibilização e homogeneização dos materiais.

O uso da engrenagem sinterizada no bendix dos motores de partida, incontestavelmente veio para modificar a forma de se fabricar peças. Seus benefícios suprem as incertezas que o futuro do mercado automobilístico traz, mas para que essa metodologia seja implantada, visando uma gestão moderna e tecnológica, será necessário a quebra de alguns paradigmas.

Baseando-se em todos os estudos mencionados, foi realizado a análise se uma engrenagem que atualmente é forjada a frio pode ser substituída por uma sinterizada, atendendo as normas ISO 2738, ASTM B328 e MPIF 42.

Os dados levantados através de pesquisas e entrevista com pessoas técnicas e experientes no campo de manufatura de peças forjadas foram representados em tabelas, comparando cada processo de fabricação e levantando dados com relação ao custo de fabricação da engrenagem sinterizada, onde através desses dados chegaremos à conclusão sobre a viabilidade de produção da engrenagem pela metalurgia do pó.

Por fim, com as informações referentes ao dimensionamento da engrenagem, o planejamento sistêmico do projeto e acesso a todas as informações da construção da engrenagem, irá ser comparado o custo de fabricação da peça forjada e da peça sinterizada e, em seguida, será analisado as vantagens e desvantagens de se produzir uma peça por metalurgia do pó.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as dimensões (Tabela 1) da engrenagem atual, foram realizados os cálculos para obter o restante das características da engrenagem a ser fabricada, conforme são apresentados a seguir.

Tabela 1- Dimensões da engrenagem

Parâmetro	Valor
Diâmetro externo (de)	25,8 mm
Número de dentes da engrenagem (z)	9
Ângulo de pressão (θ)	20°
Comprimento total da engrenagem (l)	29 mm

Fonte: Catálogo de peças Zen

Tabela 2- Cálculos para dimensionamento da engrenagem

Parâmetro	Equação	Dados	Resultado
di = Diâmetro interno	$di = dp - 2 * 1,166$	$di = 21,109 - 2 * 2,345$	di = 15,640 mm
dp = Diâmetro primitivo	$dp = m * z$	$dp = 2,345 * 9$	dp = 21,109 mm
db = Diâmetro de base	$db = dp * \cos 20$	$db = 21,109 * \cos 20$	db = 19,834 mm
m = Módulo	$m = de / (z + 2)$	$m = 25,8 / (9 + 2)$	m = 2,345 mm
p = Passo da engrenagem	$p = m * \pi$	$p = 2,345 * \pi$	p = 7,368 mm
s = Vão do dente	$s = p / 2$	$s = 7,368 / 2$	s = 3,684 mm
a = Adendo	$a = m$	$a = 2,345$	a = 2,345 mm
b = Dedendo	$b = 1,166 * m$	$b = 1,166 * 2,345$	b = 2,735 mm
h = Altura do dente	$h = 2,166 * m$	$h = 2,166 * 2,345$	h = 5,08 mm
D = densidade da peça	$D = m / v$	$D = 60,65 / 8$	D = 7,58 g/cm ³

Fonte: Próprio autor

O valor da dureza medido para engrenagem forjada foi de 57,7 e para a peça sinterizada foi de 25,4 HRC. Valor de dureza extremamente alto da engrenagem forjada ao comparar com a sinterizada. Estes dados forneceram assim, a informação que a engrenagem sofrerá grandes esforços, e para que a peça sinterizada alcance valores similares, será necessário um tratamento térmico.

Com o valor da dureza da peça original e utilizando a Tabela 3, foram realizados a comparação do valor em HRC (Rockwell C) e transformado em HB (Brinell), para posteriormente ser utilizado na equação 12, onde é encontrado a resistência a tração do material.

Tabela 3- Valores comparativos de dureza

Dureza Rockwell "C"	Dureza Brinell	Dureza Vickers	Dureza Rockwell "A"	Dureza Rockwell "B"	Dureza Rockwell "D"	Dureza Shore
HRC	HB	HV	HRA	HRB	HRD	HS
64	722	800	83,4	---	73,8	88
63	705	772	82,8	---	73,0	87
62	688	746	82,3	---	72,2	85
61	670	720	81,8	---	71,5	83
60	654	697	81,2	---	70,7	81
59	634	674	80,7	---	69,9	80
58	615	653	80,1	---	69,2	78
57	595	633	79,6	---	68,5	76
56	577	613	79,0	---	67,7	75
55	560	595	78,5	---	66,9	74
54	543	577	78,0	---	66,1	72
53	525	560	77,4	---	65,4	71
52	512	544	76,8	---	64,6	69
51	496	528	76,3	---	63,8	68

Fonte: Site metalurgia vera.

Com a equação 12 é possível calcular o a resistência a tração que deve ser de 2023 MPa.





$$\sigma = \alpha * HB \quad (12)$$

$$\sigma = 3,4 * 595$$

$\sigma = 2023 \text{ MPa}$

Utilizando tabela do fabricante do motor de partida (Bosch) (Tabela 4) a qual a engrenagem pertence, encontrou-se a potência e a velocidade do motor, e posteriormente, foi utilizado para calcular o torque máximo (equação 13) que a engrenagem executará para vencer as forças mecânicas do motor a combustão, e fazê-lo entrar em funcionamento.

Tabela 4- Dados Técnicos do motor de partida Bosch

 Veículo Vehículo	 Motor	 Data de aplicação Fecha de aplicación	 Motor de partida Motor de arranque	Tipo/Tensão/Potência Tipo/Tensión/Potencia
Celta	Celta 1.0 MPFI	08.2000 → 12.2002	F 000 ALO 330	DW(R) 12V 0,8 KW
	Celta 1.0 VHC	10.2002 → 03.2006	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
	Celta 1.0 VHC Flexpower	06.2005 → 12.2008	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
	Celta 1.4 MPFI	04.2006 → 12.2008	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
Chevette	Chevette 1.0	02.1992 → 12.1993	9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW
	Chevette 1.4	06.1974 → 08.1987	9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW
	Chevette 1.6	08.1982 → 09.1988	9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW
	Chevette 1.6 S	08.1987 → 12.1994 10.1988 → 10.1994	9 000 082 033* 9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW EF (R) 12V 0,8KW
Chevette Hatch	Chevette Hatch 1.4	01.1980 → 08.1982 06.1974 → 08.1987	9 000 082 033* 9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW EF (R) 12V 0,8KW
	Chevette Hatch 1.6	08.1982 → 09.1988	9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW
	Chevy 500	Chevy 500 1.6	08.1982 → 09.1988	9 000 082 033*
	Chevy 500 1.6 S	08.1987 → 02.1992	9 000 082 033*	EF (R) 12V 0,8KW
Classic	Classic 1.0VHC	01.2003 → 12.2005	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
Corsa [Fase I]	Corsa 1.0 EFI	04.1994 → 12.1996	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
	Corsa 1.0 MPFI	03.1996 → 12.2005	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
	Corsa 1.0 MPFI 16V	04.1999 → 10.2002	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
	Corsa 1.4 EFI	06.1994 → 12.1996	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW
	Corsa 1.6 MPFI	01.1996 → 12.2002	F 000 ALO 304	DM (R) 12V 0,9 KW

Fonte: Catalogo de peças Bosch

$$P = 0,9 \text{ kW}$$

$$n = 50 \text{ a } 100 \text{ rpm}$$

$$P = \frac{2\pi}{60} * n * T \tag{13}$$

$$T = \frac{P * 60}{2\pi * n}$$

$$T = \frac{900 * 60}{2\pi * 75}$$

$$T = 114,6 \text{ N.m}$$

Após os cálculos, utilizou-se o software SolidWorks em um estudo de caso através do método elementos finitos (MEF), tanto para a engrenagem forjada a frio como para a sinterizada, lembrando que cada estudo foi realizado com suas especificações adequadas para cada processo de fabricação, e todas as análises estáticas estão atestadas no apêndice B e C. Os resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras 10 e 11.

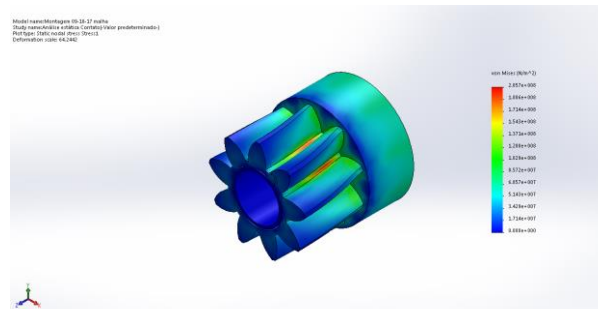


Figura 10- Análise engrenagem forjada (Fonte: Próprio auto)

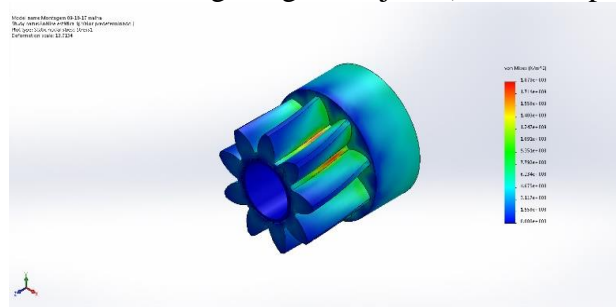


Figura 11- Análise engrenagem sinterizada (Fonte: Próprio autor)

As Figuras 10 e 11 apresentam uma análise estática linear, que calcula deslocamentos, deformações, tensões e forças de reação sob o efeito de cargas aplicadas. Neste estudo de caso, foi realizado um estudo do efeito de uma carga externa de natureza torque aplicado na face cilíndrica de ambas as engrenagens.

Todas as cargas foram aplicadas lentamente e gradativamente até atingirem suas totais magnitudes (114,6 Nm). Após atingirem a magnitude total, as cargas permanecem constantes (não variando com o tempo). Esta pressuposição nos permite ignorar forças de inércia e amortecimento causadas por acelerações e velocidades de valor desprezível. Cargas que variam com o tempo, que induzem grandes forças de inércia e/ou amortecimento podem exigir a análise dinâmica. Cargas dinâmicas se alteram com o tempo e, em muitos casos, induzem forças inerciais e de amortecimento de intensidade considerável que não podem ser desprezadas.

A relação entre cargas e as respostas induzidas são lineares. Por exemplo, se duplicar as cargas, as respostas do modelo (deslocamentos, deformações e tensões) também serão duplicadas. A condição de linearidade é atendida se:

- Todos os materiais do modelo estão de acordo com a Lei de Hooke, que afirma que a tensão é diretamente proporcional à deformação.
- Os deslocamentos induzidos são pequenos o bastante para ignorar a alteração de rigidez causada pelo carregamento, as condições de limite não variam durante a aplicação das cargas.
- As cargas precisam ser constantes em magnitude, direção e distribuição. Elas não devem sofrer alteração enquanto o modelo está sendo deformado.

Com as informações referentes ao dimensionamento e esforços da engrenagem, o planejamento sistêmico do projeto e acesso a todas as informações da construção da engrenagem, comparamos em seguida o custo de fabricação dos processos.

Os dados foram levantados através de pesquisas e entrevista com pessoas técnicas com experiência no campo de manufatura de peças forjadas, obteve-se uma estimativa conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5- Custo de fabricação da engrenagem forjada

Processo	Quantidade de material (Kg)	Valor total (R\$)	Quantidade de material utilizado por peça (g)	Valor unitário por peça (R\$)	Tempo de fabricação (Dias)
Forjamento	1000	3000	120	0,36	7
Usinagem	-	-	-	7,00	13
Total	-	-	-	7,36	20

Fonte: Próprio autor

Na tabela 5 é apresentada a quantidade de material gasto para fabricação de engrenagens, onde 1000 Kg são utilizados para fazer um lote de 50.000 peças com um custo de R\$ 0,36 cada engrenagem forjada, levando 7 dias para o processo ser concluído. E para a usinagem/fresamento das faces do dente, tem-se um custo de R\$ 7,00 com um tempo de 13 dias de execução do processo para um lote de 50.000 peças.

Por fim, o custo total por peça é de R\$ 7,36 com a estimativa de 20 dias para finalização do lote. Já o custo para fabricação da engrenagem sinterizada é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6- Custo de fabricação da engrenagem sinterizada

Processo	Quantidade de material (Kg)	Valor total (R\$)	Quantidade de material utilizado por peça (g)	Valor unitário por peça (R\$)	Tempo de fabricação (Dias)
Sinterização	1000	10000	160	5,00	15
Total	-	-	-	5,00	15

Fonte: Próprio autor

Ela apresenta 1000 Kg de pó de aço (Astaloy Mo) para fabricação de 500.000 peças com um custo de R\$ 5,00 por engrenagem, levando 15 dias para que o processo seja concluído.

Portanto, o custo final de fabricação da engrenagem sinterizada é de R\$ 5,00 com a estimativa de 500.000 peças produzidas em 15 dias.

O segmento da metalurgia do pó consiste em uma nova visão, que faz com que o ciclo de vida da engrenagem sinterizada avance de forma sólida e realística, minimizando tempo, riscos e custos desnecessários.

A princípio, buscou-se com a realização do trabalho, encontrar uma solução eficaz para alguns dos principais problemas encontrados no desperdício de matéria prima.

Por fim, foi representado as principais vantagens e desvantagens na fabricação da engrenagem por metalurgia do pó, onde tais características são representadas na tabela 7.

Tabela 7- Vantagens e desvantagens de uma engrenagem sinterizada

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Reduz ao mínimo as perdas de matéria prima; • Facilita o controle exato da composição química desejada; • Possibilita bom acabamento superficial; 	<ul style="list-style-type: none"> • Obriga a execução de grandes lotes de produção, devido ao custo elevado do ferramental; • Limita a forma geométrica da peça (tem que ser extraída de uma matriz); • Limita o tamanho da peça, já que a potência requerida na compactação é proporcional a área da seção transversal. Peças grandes exigem máquinas de elevada potência para sua compactação.

Fonte: Site Ebah

CONCLUSÃO

A implantação da engrenagem sinterizada não se limita apenas a inserção de uma nova tecnologia. Sua eficiência plena depende também de uma visão sistêmica dos processos envolvidos no projeto. Não obstante, são inegáveis os benefícios que as peças sinterizadas trazem, podendo se destacar o baixo custo, abrangendo todo ciclo de vida da peça fabricada, combatendo o desperdício de matéria prima e organizando os processos de manufatura de engrenagens para que o sucesso seja alcançado.

A tecnologia da metalurgia do pó vem conquistando seu espaço na manufatura de peças, apresentando-se uma grande aliada nesse ambiente complexo onde informações devem ser coerentes, sigilosas e realísticas.

Como é apresentado na Figura 11 a engrenagem sinterizada não se aproxima muito dos valores da resistência a tensão da engrenagem forjada a frio (Figura 10). No levantamento relacionado, à principal adversidade encontrada na execução do projeto foi que a dureza da peça forjada tem um valor extremamente alto em relação a sinterizada, o que não é possível alcançar com o processo normal de sinterização. Portanto, para trabalhos futuros sugerimos que se faça um tratamento térmico de nitretação nos dentes da engrenagem, para aumentar a dureza superficial, e conseqüentemente aproxime-se dos valores de dureza da engrenagem forjada.

Outra adversidade foi com o ferramental para compactação dos pós, pois não seria possível a compactação devido a complexibilidade e dimensões da engrenagem. Visto que, o projeto teve de ser modificado, ou seja, para melhoria a engrenagem deverá ser redimensionada para que seja fabricada, e com isto reduzirá significativamente os erros decorrentes à prensagem.

Em relação aos custos de fabricação, a engrenagem sinterizada tem extrema vantagem em relação a engrenagem forjada, como é apresentado nas tabelas 5 e 6, respectivamente o processo de fabricação da engrenagem forjada leva cerca de 20 dias para se concluir um lote de 50.000 peças, com um custo total de R\$ 7,36 cada. Já para a fabricação da engrenagem sinterizada, tem-se um valor extremamente baixo, sendo uma estimativa de 15 dias para fabricação de 500.000 peças, com valor total de R\$ 5,00 cada.

Com base nos dados levantados, concluímos que a fabricação da engrenagem pelo método sinterizado é fortemente recomendável. Pois ela possui pequeno custo de fabricação, alta velocidade de fabricação de grandes lotes, e utilizando tratamento térmico adequado eleva o valor de dureza do



dente da peça, tornando-a completamente viável.

REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó**: Técnica e produtos. 3. Ed.- São Paulo, 1992.

EBAH - **Trabalhos acadêmicos (metalurgia do pó)**. Disponível em: <
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAaTUAG/sinterizacao-metalurgia-po>>. Acesso em 04/11/2017.

IERVOLINO, Fenando et al. **A Metalurgia do Pó**: Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental. Revisão Técnica: Grupo setorial de metalurgia do pó – 1. Ed. – São Paulo, Metallum Eventos Técnicos, 2009.

MAPRIS – **Catálogos BOSCH**. Disponível em:
<<http://www.mapris.com.br/catalogos/bosch/catalogo%20Bosch%202005%20bendix.pdf>>.
Acesso em: 12/10/2017.

METALURGICA VERA - **Tabela de Conversão de Durezas**. Disponível em: <
<http://metalurgicavera.com.br/produtos/TABELA-DE-CONVERSAO-DE-DUREZAS.php>>. Acesso em: 12/10/2017.

NORMA MPIF FLC-4908– **Materials Standards**

SILVA, A.G.P.; ALVES JUNIOR, C.; **A sinterização rápida**: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. Cerâmica, vol.44, 225-232, 1998.

TECEM – **Relação entre Dureza e Resistência a Tração para Materiais Metálicos**. Disponível em:
<<http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2013/03/MU27-relacao-entre-dureza-e-resistencia-a-tracao-para-materiais-metalicos-tecem.pdf>>. Acesso em: 12/10/2017.

ZEN S. A. - **Catálogo Online**: Pesquisa por linha de produto. Disponível em <
https://www.zensa.com.br/catalogo-online/?portalzen/cat_aplicacao.jsp>. Acesso em: 12/10/2017.

Publicado em 17/12/2019