

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais - PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE UMA ENGRENAGEM CÔNICA  
SINTERIZADA: SUBSTITUIÇÃO DE TECNOLOGIA

Maurício dos Santos

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais - PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE UMA ENGRENAGEM CÔNICA  
SINTERIZADA: SUBSTITUIÇÃO DE TECNOLOGIA

Maurício dos Santos  
Bacharel em Administração

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação  
Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lírio Schaeffer

Porto Alegre  
2017

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer  
LdTM/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Verney – ULBRA- Canoas-RS

Prof. Dr. Jorge Braz – FURG

Prof. Dr. Vinicius Martins – IFSul-RS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Lírio Schaeffer, por sua confiança e orientação sempre dedicada, prática e objetiva; pela confiança e grande ajuda em momentos de dificuldades; pelo trabalho sério e dinâmico, demonstrando sempre à persistência e estímulo a pesquisa de novas alternativas de produção tecnológica.

Aos colegas do LdTM pelo apoio sempre que necessário, em especial ao amigo Wilson Corrêa Rodrigues pelo apoio, dedicação e auxílio.

Ao amigo Dr. Eng. Arão de Mattos Dias pela confiança e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares, por todo apoio necessário em qualquer situação sempre e em especial minha namorada Elisangela por todo o apoio, compreensão e incentivos nos momentos difíceis.

A todos que, de alguma forma, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS .....	XII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Metalurgia do Pó.....	18
2.2 Engrenagem .....	23
2.3 Engrenagem Sinterizada.....	28
2.4 Pó Metálico Distaloy® .....	32
2.5 Preparação Metalográfica.....	35
2.6 Material para Ferramenta de Compactação.....	36
2.7 Relação de Custo e Benefício do Sinterizado.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 Considerações Gerais.....	40
3.2 Matéria Prima.....	41
3.3 Obtenção da Mistura.....	42
3.3.1 Pó de Fe-Mo-Ni-Cu (Distaloy).....	42
3.3.2 Grafite UF4.....	43
3.3.3 Estearato de Zinco.....	44
3.4 Peça de Estudo.....	45
3.5 Análise Dimensional.....	46
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	47
4.1 Preparação da Mistura.....	47
4.2 Compactação.....	47
4.2.1 Ferramental de Compactação.....	47
4.2.2 Cálculo do Dimensionamento da Cavidade de Enchimento.....	51
4.3 Procedimento de Sinterização.....	53

4.4 Montagem.....	54
4.5 Densidade no Dente da Engrenagem.....	55
4.6 Calibragem.....	56
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	57
5.1 Densidade da Engrenagem.....	58
5.2 Analise Metalografica .....	60
5.2 Análise Dimensional.....	61
5.4 Dureza.....	64
5.5 Custo de Produção da Engrenagem Sinterizada e Usinada.....	66
6. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	68
6.1 Peça de Estudo.....	68
6.2 Compactação.....	68
6.3 Montagem.....	68
6.4 Densidade.....	68
6.5 Análise Dimensional.....	69
6.6 Dureza.....	69
6.7 Custo.....	69
7 CONCLUSÕES.....	70
8 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
10 ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Engrenagem cônica desenvolvida neste trabalho.....	17
Figura 2: Representação esquemática do processo de metalurgia do pó.....	19
Figura 3: Desenho esquemático do moinho de bolas.....	20
Figura 4: Misturadores utilizados na MP.....	21
Figura 5: Representação da pressão aplicada sobre os pós.....	22
Figura 6: Sequência de compactação de duplo efeito.....	22
Figura 7: Esboços de Leonardo da Vinci sobre transmissão variável.....	24
Figura 8: Nomenclatura básica para engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	25
Figura 9: Engrenamento direto utilizando engrenagens cônicas.....	26
Figura 10: Engrenagens sinterizadas.....	27
Figura 11: Engrenagem helicoidal sinterizada com a superfície densificada pelo processo a frio – SSD.....	31
Figura 12: Engrenagem cônica sinterizada .....	32
Figura 13: Microestrutura do Distaloy sinterizado.....	36
Figura 14: Comparação das propriedades mecânicas de alguns aços.....	37
Figura 15: Critérios qualitativos de seleção do aço ferramenta.....	38
Figura 16: Competitividade da M/P frente à Usinagem em função do volume fabricado.....	39
Figura 17: Diagrama de bloco do trabalho desenvolvido.....	40
Figura 18: Pós de Distaloy AB, mostrando a morfologia irregular .....	42

Figura 19: Micrografia do estearato de zinco.....	45
Figura 20: Projeto da engrenagem cônica usinada.....	46
Figura 21: Engrenagem sendo medida no equipamento de medição tridimensional, marca TESA e modelo Micro-hite 3D.....	46
Figura 22: (peça 01) Engrenagem sinterizada; (peça 02) engrenagem usinada.....	48
Figura 23: Ferramental de compactação: Punção superior (01); Cavidade ou Matriz (02); Pino macho (03); Punção inferior (04).....	49
Figura 24: Punção superior.....	50
Figura 25: Mesa suporte do ferramental.....	51
Figura 26: Representação da altura de enchimento (He).....	52
Figura 27: Ciclo de sinterização.....	53
Figura 28: Detalhe da entrada das peças compactadas no forno de sinterização.....	54
Figura 29: Conjunto de engrenagens montadas na caixa de redução.....	54
Figura 30: <b>(A)</b> Peças prontas para montagem: (01) Eixo; (02) Engrenagem sinterizada. <b>(B)</b> Engrenagem montada no eixo.....	55
Figura 31: <b>(A)</b> Engrenagem cônica, <b>(B)</b> Secção da engrenagem <b>(C)</b> Dente da engrenagem.....	55
Figura 32: Engrenagem cônica sendo calibrada.....	56
Figura 33: Componentes do Punção Superior.....	57
Figura 34: Punção superior cotado.....	58
Figura 35: Variação de densidade na engrenagem cônica.....	60
Figura 36: Microestrutura do Distaloy AB sem ataque (200x).....	60
Figura 37: Microestrutura do Distaloy AB com ataque de Nital (200x).....	61



Figura 38: Desenho da engrenagem cônica sinterizada.....	62
Figura 39: Posição do penetrador na peça para medição de dureza.....	65
Figura 40: Posição do ensaio de dureza no dente.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos para engrenagem sinterizada na aplicação de bombas de engrenagem.....	28
Tabela 2: Pós metálicos Distaloy.....	34
Tabela 3: Os materiais utilizados para desenvolvimento do trabalho de pesquisa.....	41
Tabela 4: Propriedades do pó da liga Distaloy AB, anexo 1.....	43
Tabela 5: Distribuição granulométrica do pó de grafite utilizado neste trabalho.....	44
Tabela 6: Apresenta as propriedades típicas do pó de estearato de zinco.....	44
Tabela 7: Densidade do dente (Dpo) da engrenagem sinterizada em 06 amostras de duas engrenagens diferentes.....	59
Tabela 8: Densidade da engrenagem sinterizada (DS).....	59
Tabela 9: Dimensão do diâmetro interno ( $\varnothing 29,90\text{mm}$ ) da engrenagem compactada (peça à verde).....	62
Tabela 10: Dimensão do diâmetro interno ( $\varnothing 29,90\text{mm}$ ) da engrenagem sinterizada.....	63
Tabela 11: Dimensional do diâmetro interno ( $\varnothing 29,90\text{mm}$ ) da engrenagem após a etapa de calibragem.....	63
Tabela 12: Ensaio de dureza.....	64
Tabela 13: Ensaio de dureza no dente da engrenagem.....	65
Tabela 14: Custo de produção da engrenagem sinterizada e a usinada.....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	altura de circunferência de cabeça	[mm]
b	profundidade da circunferência de pé	[mm]
B	largura do denteado	[mm]
d	Densidade da peça à verde	[g/cm <sup>3</sup> ]
DE	Diâmetro Externo	[mm]
DI	Diâmetro Primitivo	[mm]
Dpo	Densidade do dente sinterizado	[g/cm <sup>3</sup> ]
Ds	Densidade da engrenagem sinterizada	[g/cm <sup>3</sup> ]
Ge	Grau de enchimento	[ - ]
H	altura	[mm]
h	altura da peça final	[mm]
He	altura de enchimento	[mm]
L	largura da cabeça do dente	[mm]
M	módulo da engrenagem	[ - ]
m	Massa	[g]
P	Passo diametral dos dentes	[ - ]
V	Volume	[cm <sup>3</sup> ]

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\rho$	densidade aparente do pó	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\emptyset$	Diâmetro	[mm]

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	antes de Cristo
AGMA	<i>American Gear Manufacturers Association</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute - EUA</i>
A2	Aço para Trabalho a Frio
D2	Aço para Trabalho a Frio
D3	Aço para Trabalho a Frio
D6	Aço para Trabalho a Frio
EUA	Estados Unidos da América
F2	Aço para Trabalho a Frio
HIP	Compactação isostática a quente
HRC	Dureza Rockwell C
HRB	Dureza Rockwell B
H11	Aço para Trabalho a quente
H12	Aço para Trabalho a quente
H13	Aço para Trabalho a quente
H21	Aço para Trabalho a quente
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica - UFRGS
L6	Aço para Trabalho a Frio
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	Metalurgia do pó
MPIF	<i>Metal Powder Industries Federation</i>
M1	Aço para Trabalho a quente
M2	Aço Rápido Ligado ao Molibdênio, Vanádio e Tungstênio
M3	Aço para Trabalho a quente
M4-Mpó	Aço Rápido de Alto Vanádio, Produzido por Metalurgia do Pó
O1	Aço para Trabalho a Frio
O2	Aço para Trabalho a Frio
O7	Aço para Trabalho a Frio
PMG	<i>Powder Metal Group</i>
PVC	Termoplástico (Policloreto de Polivinila)
PU	Poliuretano

SAE	<i>Society of Automotive Engineers – EUA</i>
SP	São Paulo
SSD	Densificação Superficial Seletiva ( <i>Selective Surface Densification</i> )
S1	Aço para Trabalho a Frio ou a Quente
S5	Aço para Trabalho a Frio
S7	Aço para Trabalho a Frio
RS	Rio grande do Sul
T5	Aço para Trabalho a quente
T8	Aço para Trabalho a quente
T1	Aço para Trabalho a quente
W1	Aço para Trabalho a Frio
W2	Aço para Trabalho a Frio

## RESUMO

Este trabalho propõe substituir o processo de usinagem que é empregado atualmente na fabricação de uma engrenagem cônica fabricada com material ABNT 8620, pelo processo de metalurgia do pó, gerando uma peça com economia de matéria prima, aumento de valor agregado e diminuição nos custos de produção. Esta peça tem como aplicação em um dispositivo utilizado na agroindústria destinado ao plantio, onde a engrenagem sofre esforços leves não necessitando ser tratada termicamente. A análise realizada neste trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um ferramental específico para a produção de uma engrenagem cônica sinterizada utilizando uma liga comercial da empresa Höganäs do Brasil denominada Distaloy AB, de composição Fe-Mo-Ni-Cu. As peças foram produzidas pelo processo de sinterização e analisadas em etapas diferentes do processo como: compactação, sinterização e calibragem. Na avaliação compara-se o diâmetro interno da engrenagem compactada, sinterizada e calibrada. Realizou-se um estudo dos valores de mercado entre os processos de usinagem e MP para um lote de produção de duas mil peças. As peças foram compactadas a 600MPa e sinterizadas a 1120°C, durante o tempo de 40min. Os resultados alcançados mostram a viabilidade de substituição do processo de usinagem pelo processo de metalurgia do pó para obtenção da peça de estudo, onde a economia de material e as propriedades mecânicas necessárias foram atingidas pelo componente sinterizado.

Palavras-Chave: Usinagem, Metalurgia do Pó, Sinterização, Engrenagem Cônica;

## ABSTRACT

This work proposes to replace the machining process that is currently employed in the manufacture of a conical gear manufactured with ABNT 8620 material, by the process of powder metallurgy, generating a part with economy of raw material, increase of value added and decrease in production costs. This part is applied in a device used in the agroindustry destined to the planting, where the gear undergoes slight efforts not needing to be treated thermally. The analysis carried out in this work has the objective of developing a specific tooling for the production of a sintered conical gear using a commercial alloy of the company Höganäs do Brasil denominated Distaloy AB, with Fe-Mo-Ni-Cu composition. The pieces were produced by the sintering process and analyzed in different stages of the process as: compression, sintering and calibration. In the evaluation the internal diameter of the compacted, sintered and calibrated gear is compared. A study of the market values between the machining processes and MP for a production lot of two thousand pieces was carried out. The pieces were compacted at 600MPa and sintered at 1120oC for 40min. The results show the feasibility of replacing the machining process by the powder metallurgy process to obtain the study piece, where the material savings and the necessary mechanical properties were reached by the sintered component.

Key words: Machining, Powder Metallurgy, Sintering, Bevel Gear

## 1 INTRODUÇÃO

A Metalurgia do Pó (MP) é uma técnica de fabricação de produtos metálicos (ferrosos e não ferrosos), obtidos através da conformação de pós-metálicos seguidos de tratamento térmico de sinterização, onde o material é submetido a temperaturas de aquecimento com atmosfera controlada, conferindo-se propriedades físicas e mecânicas.

O efeito de custo/benefício é atingido a nível material e dimensional. O primeiro, através da formulação da composição química e consequentes propriedades físico-mecânicas na medida exata da solicitação. O segundo é obtido sistematicamente pela compactação em ferramental específico garantindo geometrias e tolerâncias com alta repetitividade. O processo de MP exerce menor impacto ao meio ambiente (quando comparado aos processos convencionais), devido a melhor utilização da matéria-prima, menor consumo de energia e utilização seletiva dos elementos de liga.

A MP é um processo que tem como características marcantes a capacidade de gerar um produto com sua forma final ou uma peça muito próxima disto, e uma alta taxa de utilização de matéria prima, entre outras particularidades a redução do consumo de energias térmicas, químicas e mecânicas, usadas para dar fabricação de um componente. Outro dado importante neste enfoque é a natureza proveniente dos pós metálicos, onde 85% do pó produzido para MP é resultado de reciclagem de sucata por processos com atomização e eletrólise sendo os mais difundidos dos processos de obtenção do pó. Baseado nas vantagens da MP como um processo sustentável e os recentes estudos técnicos para fabricação de engrenagens como a redução ou eliminação total de etapas posteriores à compactação do pó, a MP tem conquistado espaço cativo em novos projetos. Não apenas pela redução de custo, mas por características específicas concedida pelo processo, como redução de ruído que são dissipados devido a menor densidade e redução de peso, podendo favorecer na diminuição do conjunto entre outras a possibilidade de fornecer uma maior funcionalidade ao corpo da engrenagem, com exemplo facilidade para montagem ou impressão do logotipo da empresa em uma face do produto sem acréscimo de valor. A



aplicação de engrenagens sinterizadas estão sendo testadas no automóvel *Smart Fortwo* pela empresa Höganäs [1].

Neste enfoque a MP se destaca na transformação de peças a partir de pós-metálicos, gerando economia, produção em grande escala, se comparada com outros processos. A MP tem sustentabilidade proveniente da capacidade de gerar um produto na forma final ou muito próximo da geometria final, e com uma utilização de 95% do material processado [1].

Neste estudo foi realizado o desenvolvimento de uma engrenagem cônica pelo processo de MP e comparado os custos entre o processo de usinagem, apresentando o projeto da ferramenta as estimativas de custos: produção para 2.000 unidades de cada processo de fabricação. A Figura 1 mostra a engrenagem cônica desenvolvida neste trabalho.



Figura 1: Engrenagem cônica desenvolvida neste trabalho.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é um processo de fabricação de peças metálicas e não metálicas. O uso da metalurgia do pó teve seu início no século passado com a produção industrial de metais de alto ponto de fusão, que não disponibilizavam de equipamentos de fundição apropriados. Mesmo após a disponibilização dos fornos de fusão, estes tiveram pouco impacto na produção feita por metalurgia do pó, por não atingirem a fina estrutura de grão e a ductilidade obtida com a sinterização [2].

Este processo vem se desenvolvendo em uma taxa crescente, sendo que atualmente já é considerado consolidado e maduro. A metalurgia do pó é hoje considerada como uma técnica avançada, econômica e ecológica.

O que difere este processo dos convencionais é a ausência de fase líquida ou presença apenas parcial da fase líquida durante o processo. É um processo que permite a produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, pode ser utilizada na obtenção de peças em grandes quantidades, além de ter o mesmo grau de dificuldade para peças simples ou complexas.

A tecnologia está presente na fabricação de várias peças metálicas ferrosas e não ferrosas, e sua grande maioria de aplicação está na indústria automotiva, mas também pode ser vista em cerâmica, materiais de fricção, contatos elétricos, filtros metálicos, materiais magnéticos e inúmeras outras aplicações [2].

Peças com formatos complexos são produzidas em alta escala mantendo a precisão, alta qualidade e oferecendo as características bem específicas exigidas pela aplicação e pelo cliente com um custo altamente competitivo e sem desperdício de material, consumo otimizado de energia e de forma ecologicamente sustentável [2].

Para a operação de compactação, existem hoje à disposição dos fabricantes de componentes por metalurgia do pó, diversos tipos de injetoras e prensas mecânicas, hidráulicas e híbridas com capacidades de algumas

poucas toneladas a centenas de toneladas para conformação de peças sinterizadas [2].

Entre os benefícios deste processo, pode-se destacar: a eliminação ou minimização da usinagem; eliminação ou minimização de refugo; desenvolvimento de ampla variedade de ligas, não possíveis por outros processos de manufatura; facilidade na produção de peças mais complexas; baixo nível de consumo de energia; menor impacto ambiental. Os processos básicos que envolvem a metalurgia do pó são: Obtenção dos Pós, Mistura, Compactação e Sinterização.

O processo se inicia com a separação do material, que é quantificado e misturado. Depois disso, os pós são submetidos a uma pressão pré-determinada, a temperatura ambiente por meio de matrizes, cujo formato geralmente corresponde ao produto final. Para a finalização do processo o material já compactado é exposto a um tratamento térmico, abaixo do ponto de fusão da liga metálica base utilizada e com temperatura e atmosfera controladas. Na Figura 2, podem ser visualizadas as etapas de um processo de fabricação por metalurgia do pó convencional.

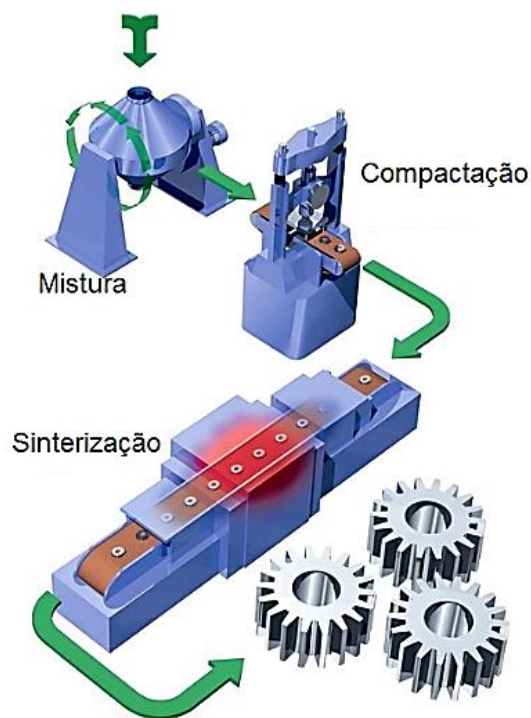


Figura 2 - Representação esquemática do processo de metalurgia do pó [3].

A obtenção dos pós é realizada por uma série de processos, em função das propriedades do material (resistência mecânica, ponto de fusão e composição química) e das características que a aplicação requer do mesmo. Entre as características mais importantes dos pós metálicos estão a forma, o tamanho e a distribuição granulométrica das partículas. Os vários métodos de obtenção de pós metálicos conduzem a diversas formas, tamanhos, distribuição e outras características dos mesmos, sendo imprescindível o domínio do processo de obtenção e caracterização da matéria-prima para se chegar a uma peça final que atenda os quesitos de engenharia [4].

O processo de obtenção dos pós, depende do conjunto de propriedades do material e das características desejadas, em função da aplicação pretendida. Entre os métodos mecânicos para obtenção de pós, o mais difundido e largamente utilizado é a moagem gerada em um equipamento chamado moinho de bolas, que consiste num tambor rotativo contendo esferas metálicas de material resistente ao desgaste. Quando o tambor gira, as esferas chocam-se umas contra as outras, desintegrando gradativamente o material que se encontra no interior do tambor. A Figura 3 ilustra um modelo do equipamento denominado moinho de bolas [5].

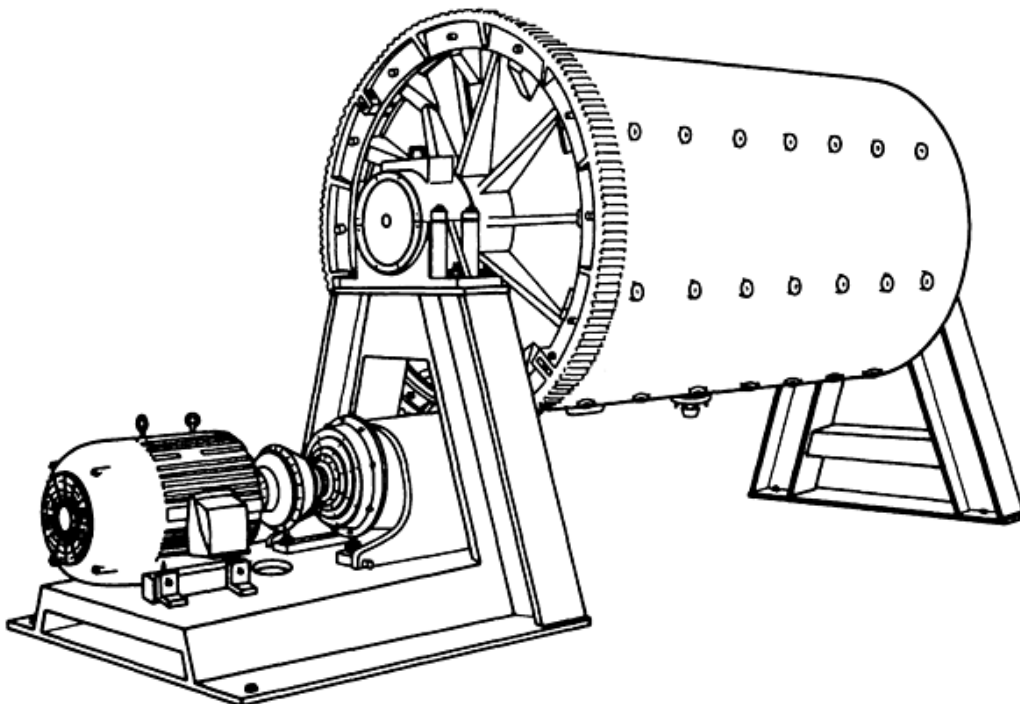


Figura 3: Desenho esquemático do moinho de bolas [6].

O objetivo da mistura é promover uma boa homogeneização dos materiais compostos na liga. Em sistemas de um só componente, como no caso da produção de peças com ferro puro, a etapa de mistura tem função de promover uma distribuição uniforme do lubrificante na liga desejada. Este elemento é utilizado para reduzir o atrito entre as partículas de pó e a parede da ferramenta de compactação, bem como, entre as próprias partículas, tem também como função a redução da força de extração da peça após a compactação, evitando danos ao compactado. Os lubrificantes mais difundidos comercialmente são, dentre outros, ácido esteárico, estearato metálico e estearato especial de zinco [7].

Para efetuar esta etapa, geralmente faz-se uso de equipamentos chamados misturadores, compostos por um compartimento, onde se insere os materiais, acoplado a um eixo que efetua rotação com o auxílio de um motor. Existe vários tipos de misturadores: Misturador duplo cone, misturador “V”, misturador cubo rotativo e misturador rotativo cilíndrico [7].

Na Figura 4 é mostrado como exemplo dois tipos de misturadores industriais utilizados para promover a homogeneização da liga dos pós metálicos e o lubrificante na fabricação de peças sinterizadas, o misturador de cone duplo (a) e o misturador em “V” (b) [8].

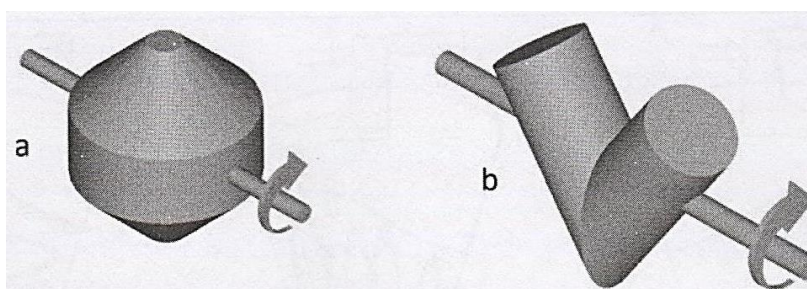


Figura 4: Misturadores utilizados na MP [8].

A etapa de compactação consiste na aplicação de uma pressão sobre a mistura dos pós e tem por objetivo a conformação do pó na forma final, ou praticamente final da forma projetada, Figura 5.

Com a pressão aplicada sobre os pós, as partículas entrarão no contato necessário, que dá a peça uma resistência mecânica necessária para o seu manuseio posterior [9].

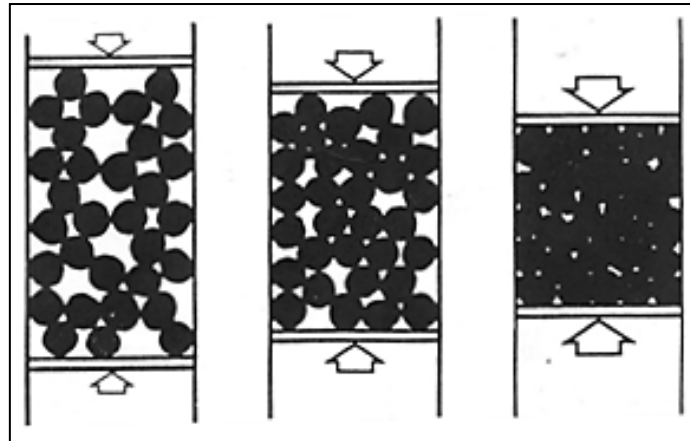


Figura 5 – Representação da pressão aplicada sobre os pós [9].

A compactação é feita com prensas mecânicas ou hidráulicas. Os processos de compactação mais utilizados são a compactação unidirecional de ação simples ou de ação dupla, a compactação isostática, laminação de pós, extrusão e forjamento de pré-formas sinterizadas. Podendo ser executados a quente ou a frio [9].

Dentre essas técnicas, a mais utilizada é a compactação em matriz de duplo efeito, que pode ser vista na Figura 6. Após a etapa de compactação, o produto é chamado de compactado verde[9].

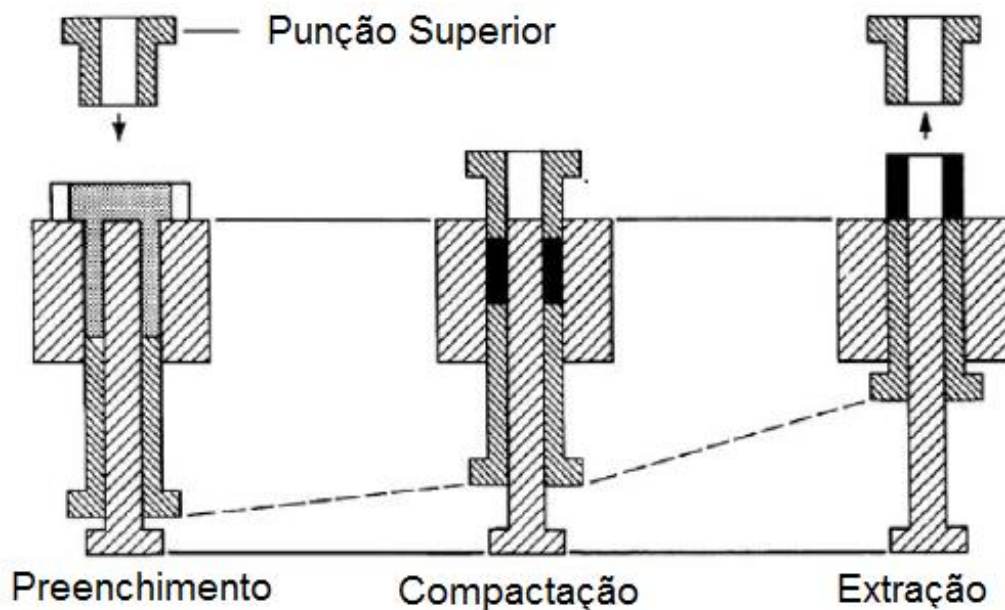


Figura 6: Sequência de compactação de duplo efeito [6].

A etapa de sinterização é a parte fundamental da metalurgia do pó, porque constitui a fase final de todo o processo, onde as partículas sofrerão a ligação entre si [2].

A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde em temperaturas elevadas, mas abaixo do ponto de fusão do principal constituinte da liga metálica utilizada, na ordem de  $2/3$  a  $3/4$  da temperatura de fusão da liga considerada. Esta etapa é feita sob o controle da temperatura, tempo e atmosfera, garantindo que o compactado já com as partículas interligadas, adquiram as características desejadas de dureza, densidade e resistência mecânica [2].

## 2.2 Engrenagem

As engrenagens têm uma história longa. A ancestral Carroça Chinesa apontando para o Sol, supostamente usada para navegar pelo deserto de Gobi nos tempos pré-Bíblicos, continha engrenagens. As primeiras engrenagens eram provavelmente em madeira e outros materiais fáceis de serem trabalhados, os seus dentes sendo meramente pedaços de madeira inseridos em um disco ou roda [10].

As primeiras descrições escritas sobre engrenagens foram feitas por Aristóteles, no século 4 a.C. Ctesibius, inventor grego, usou no século 3 a.C. as engrenagens cilíndricas de dentes retos e cônicas e Archimedes mencionou o parafuso sem-fim e a coroa em seus escritos. Vitruvius, que inventou a roda d'água vertical, usou um par de engrenagens de ângulo reto para transmitir potência do eixo de uma roda horizontal para uma roda de eixo vertical de um moinho de pedra. Os cadernos de Leonardo da Vinci contêm esboços de engrenagens cilíndricas de dentes retos, cônicas e parafuso sem-fim e coroa. É provável que nenhum destes inventores prestasse muita atenção para o problema de perfis de dentes cinematicamente corretos, o que permitiria uma relação de velocidades constantes (perfis conjugados). Embora a curva cicloidal já tivesse sido conhecida a mais de 200 anos, até 1674 ela ainda não fora empregada para perfis de dentes de engrenagens. No próximo século e meio, debateram-se os méritos da aplicação dos perfis cicloidais e envolventes.

Desde 1830 os perfis evolventes eram os preferidos para transmissões de potência das máquinas industriais. Já os perfis cicloidais eram preferidos para a fabricação dos relógios. A primeira engrenagem cilíndrica de dentes retos e cônica foram cortadas com a forma de fresas (*cutters*), a qual correspondia aos espaços entre os dentes. O mais antigo cortador giratório deste tipo era feito à mão por um mecânico francês chamado Jacques de Vaucanson, em 1782, tendo sido usado em uma máquina de moenda. Até aproximadamente os meados do século 19, ainda não havia aparecido às máquinas especiais para cortar engrenagens [10].

A Figura 7 mostra um dos esboços de Leonardo da Vinci sobre uma transmissão variável que tem como função mudar a relação da rotação.

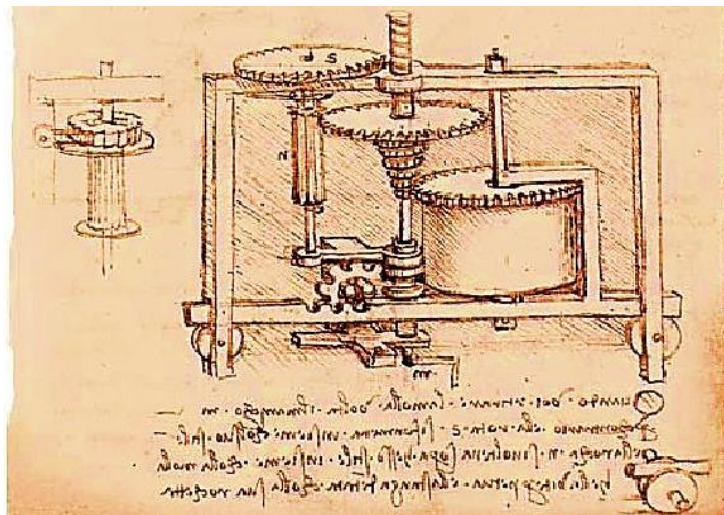


Figura 7: Esboços de Leonardo da Vinci sobre transmissão variável [11].

Em uma engrenagem são utilizadas designações específicas para seu dimensionamento. A Figura 8 mostra um par de dentes de uma engrenagem e as principais designações utilizadas em seu dimensionamento. As dimensões **a** e **d** são medidas a partir do diâmetro do círculo primitivo. Com o diâmetro desse círculo é calculada a razão de transmissão de torque e de velocidades. Para o diâmetro primitivo é usado o símbolo **di**, onde **i** é a letra correspondente ao pinhão (**p**) ou a coroa (**c**). A dimensão **L** é a largura da cabeça e a dimensão **b** é a largura do denteado. A altura efetiva é medida entre a circunferência de cabeça e a de base. O espaço entre os dentes tem aproximadamente a mesma dimensão da largura do dente. Com o desgaste devido ao uso, esse espaço, conhecido como “*backlash*”, pode aumentar [12].



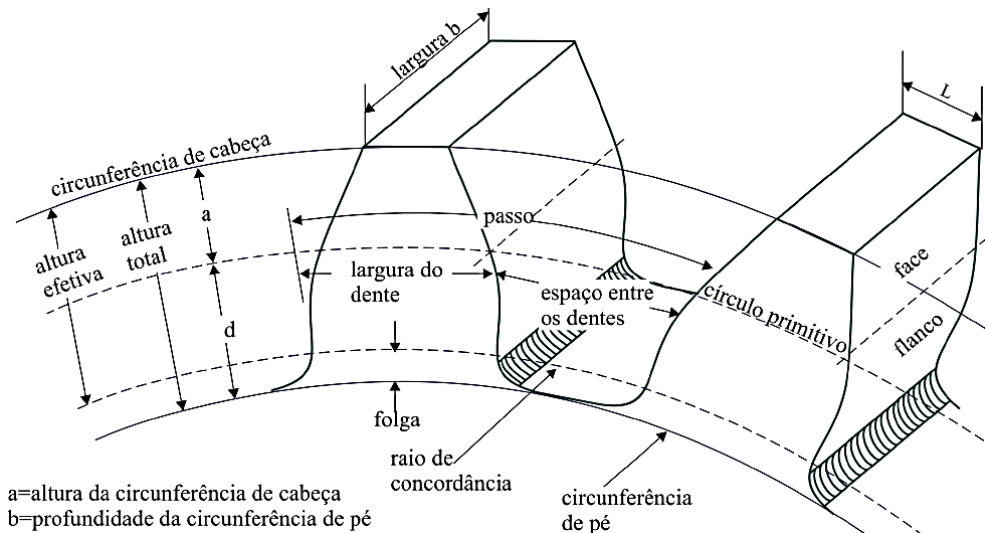


Figura 8: Nomenclatura básica para engrenagens cilíndricas de dentes retos [12].

Existem basicamente duas formas de analisar a geometria de engrenagens, chamadas de sistemas de engrenagens: o sistema americano ou inglês, e o sistema métrico. O primeiro usa como base a variável “*Diametral Pitch*”, cuja letra símbolo é P e que define o número de dentes por polegada do diâmetro primitivo. O sistema métrico baseia-se na variável Módulo, cuja letra símbolo é M, e que é definida como a razão entre o diâmetro primitivo em mm e o número de dentes da engrenagem. Fica evidente que uma das variáveis é o inverso da outra, corrigida para transformar o diâmetro na unidade correta [12].

Engrenagens são rodas com dentes padronizados internos ou externos, utilizados para transmitir movimento e força entre dois eixos. Sendo muitas vezes usadas quando se deseja variar o número de rotações e/ou sentido da rotação de um eixo para outro. A transmissão de movimento tem normalmente como finalidade de aproveitar o máximo de potência gerada em trabalho mecânico útil [12].

Dentre as maneiras mais comuns de movimentação de peças, o processo por meio de engrenamento é o que apresenta o melhor rendimento. O processo de engrenamento possibilita a transmissão do movimento entre eixos paralelos, cruzados ou a 90°, assim como a redução ou ampliação de rotações com uma perda de potência muito reduzida [13].

O movimento de rotação entre as engrenagens ocorre quando as rodas estão engrenadas, ou seja, em contato por meio de seus dentes, permitindo que haja rotação. As rodas dentadas de um mesmo conjunto podem ter tamanhos diferentes, de forma que, quando isto acontece a engrenagem maior chama-se coroa, e a menor de pinhão [13].

As engrenagens cônicas são usadas principalmente para a transmissão entre eixos que se cruzam, principalmente perpendiculares. Os dentes podem apresentar a forma reta ou helicoidal. O termo “cônico” indica, que a face da engrenagem cônica tem a forma angulada. Normalmente, uma engrenagem cônica tem os dentes ao longo da face do cone. Entre suas aplicações está o uso da engrenagem cônica no diferencial do carro.

A Figura 9 mostra o engrenamento direto utilizando engrenagens cônicas, normalmente os eixos estão a  $90^\circ$ , porém outros ângulos podem ser aplicados.



Figura 9: Engrenamento direto utilizando engrenagens cônicas [13].

Os materiais comumente utilizados em engrenagens abrange uma grande variedade de ferros fundidos, materiais sinterizados, plásticos, e ligas

de metais não ferrosos. Mas os aços, devido à sua elevada resistência e um custo relativamente baixo, são os materiais mais amplamente utilizados para fabricação de engrenagens [14].

As maiorias das engrenagens são feitas de aços carbono e baixa liga. Em geral, os aços selecionados para as aplicações das engrenagens devem satisfazer duas exigências básicas, que nem sempre são compatíveis [14]:

- As que envolvem a fabricação e processamento
- O serviço a ser prestado (solicitação mecânica).

O requisito de fabricação e processamento inclui usinabilidade, forjabilidade, e a resposta a tratamentos térmicos. Já os requisitos de serviços estão relacionados com a capacidade da engrenagem a executar satisfatoriamente as condições de cargas para a qual foi concebida e, portanto, abranger todos os requisitos de propriedades mecânicas, incluindo resistência à fadiga e resposta ao tratamento térmico [14].

A Figura 10 mostra engrenagens retas fabricadas em aço sinterizado como exemplo dos diversos materiais utilizados na fabricação que são determinados de acordo com a aplicação e exigências mecânicas.



Figura 10: Engrenagens sinterizadas [15].

### 2.3 Engrenagem Sinterizada

A primeira aplicação de engrenagens sinterizadas foi para bombas de óleo em 1937/1938. As bombas de engrenagens constituem um tipo comum de aplicação. Dependendo dos níveis de esforços na aplicação, diferentes materiais e densidade são aplicados. Por exemplo, o ferro carbono ou materiais Fe-Cu-C, com densidades de 6,00 a 6,80 g/cm<sup>3</sup> são utilizadas em bombas de engrenagens para aplicações de baixa pressão, tais como lubrificação do motor e transmissões automáticas. Para aplicações de esforço mais elevados até 20 MPa, ligas de aço, na densidade mínima de 7,10 g/cm<sup>3</sup> são utilizadas. Aplicações de ligas sinterizadas utilizadas em bomba de engrenagem em vários níveis de esforços são apresentadas na Tabela 1 [16].

Tabela 1: Requisitos para engrenagem sinterizada na aplicação de bombas de engrenagem [16].

Aplicação	Material
Pressão de saída inferior a 0,69 MPa, serviço leve	MPIF FC-0208; sinterizado; 5,8 – 6,2 g/cm <sup>3</sup>
Pressão de saída inferior a 6,9 MPa, sujeito a alta vibração e serviço pesado.	MPIF FC-0208 ou FN-0106; sinterizado; 6,4 – 6,8 g/cm <sup>3</sup> , endurecido por tratamento térmico.
Pressão média 6,9 - 8,6 MPa, durante curtos intervalos de tempo.	MPIF FC-0208; 6,2 – 6,5 g/cm <sup>3</sup> ; sinterizado endurecido por tratamento térmico.
Uso geral até 10,3 MPa, serviço contínuo.	MPIF FN-0106; sinterizado; 6,8 -7,1 g/cm <sup>3</sup> ; tratado termicamente.
Uso geral até 17,2 MPa, serviço contínuo.	AISI do tipo 4630; 7,2 - 7,6 g/cm <sup>3</sup> ; tratado termicamente.

A Metalurgia do Pó é um processo flexível para a produção de engrenagens. A MP é capaz de produzir peças com tolerâncias apertadas e com tensão de ruptura de 1240 MPa e a custos competitivos em grande escala

de produção. Engrenagens de dentes retos, helicoidais e cônicas são produzidas por metalurgia do pó. O processo é especialmente atraente quando a engrenagem contém rebaixos, através de furos, níveis ou projeções [16].

Com o avanço considerável da metalurgia do pó ao longo dos anos, a qualidade e a aplicação de engrenagens sinterizadas aumentaram. O aumento na produção, compactação e sinterização resultou em novas técnicas, tais como a infiltração de pó, forjamento de pó, superfície de rolamento, e vários tratamentos de acabamento. Estes desenvolvimentos permitiram que as peças por MP, competem com sucesso com os metais forjados [16].

A seleção de um método de processo de fabricação depende de fatores tais como tolerância das engrenagens e propriedades dimensionais. Em termos de precisão dimensional, AGMA (*American Gear Manufacturers Association*) classes de qualidade 5 - 7 podem ser obtidos por meio de operações de MP convencional. Quando são necessários níveis de qualidade AGMA acima de 7, operações secundárias, como a calibragem, polimento e retifica normalmente são empregados. Execução de qualquer peça MP é influenciada principalmente pela densidade. Todos estes métodos são empregados para a fabricação de engrenagens, incluindo vários tratamentos de superfície, como carbonitreção, *Shot Peening*, por exemplo [17].

Fabricantes de pós metálicos vêm trabalhando na melhora da compressibilidade e estabilidade destes materiais, assim como no desenvolvimento de ferramentais e do processo. A Höganäs uma das grandes empresas fabricantes de pó metálico no mundo, possui um centro dedicado a preparação de protótipos. Também trabalha com empresas parceiras especializadas na fabricação de equipamentos especiais e engrenagens. Além disto, dedica-se à quebra de paradigmas, mostrando aos grandes fabricantes de caixas de transmissão o potencial da metalurgia do pó e suas vantagens. Com isto, montou em um veículo Smart uma caixa de transmissão com engrenagens sinterizadas. Em Julho de 2012 este veículo completou 100.000 km rodados sem que nenhuma falha ocorresse [8].

Outro trabalho vem sendo feito em carros de rally onde as engrenagens da 4ª marcha foram substituídas por engrenagens sinterizadas compactadas pelo processo Compactação Isostática a Quente (*Hot Isostatic Pressing*).

Através deste processo obtém-se um material com densificação acima de 99% e uma estrutura extremamente homogênea, o que permite obter materiais com desempenho superior ao material convencional. Novamente neste caso as engrenagens suportaram o trabalho severo a que foram submetidas, sem que nenhum problema fosse detectado [17].

Visando a produtividade e a redução de custos que a metalurgia do pó proporciona, a Höganäs agora está desenvolvendo um material para ser compactado em matriz rígida (compactação uniaxial) denominado Hipaloy, com características que permitem chegar a  $7,50 \text{ g/cm}^3$  de densidade, correspondente a 95 % da densificação do aço. A engrenagem passa, após sinterização, por um processo de rolagem conhecido como "Densificação Superficial" (*Surface Densification*), onde a superfície do dente é compactada até chegar a 100 % de densificação [17].

Aplicações em altas tensões, como caixas de câmbio automotivo têm sido um dos principais alvos de fabricantes de MP. E as provas estão se acumulando para mostrar que as peças de pó metálico com superfície densificada, pode ser uma alternativa para os fabricantes de veículos com qualidade [10].

Ligas de aço forjado têm sido empregados historicamente na fabricação em série de componentes de alto torque transmitido, como engrenagens, rodas dentadas de alta performance, de sentido único e pistas de rolamento para segurar longo prazo confiabilidade do sistema. Embora a tecnologia de MP ofereça componentes de custo mais baixo, limitações em estática, fadiga e propriedades de desgaste de aços sinterizados convencionais, têm impedido o uso de peças de pó metálico em situações de altas tensões [18].

O PMG Group desenvolveu DensiForm®, uma tecnologia patenteada SSD, que é um processo a frio por meio de extrusão (DensiForm®) ou de rolamento transversal (DensiForm® R). A maioria dos aplicativos proeminentes para SSD são componentes carregados por torque, tais como engrenagens e rodas dentadas. A Figura 11, mostra uma engrenagem sinterizada com a superfície densificada pelo processo a frio por meio de extrusão [18].



Figura 11: Engrenagem helicoidal sinterizada com a superfície densificada pelo processo a frio – SSD [19].

Para resolver as deficiências percebidas, vários processos têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades dos aços MP por densificação superficial seletiva (SSD). Entre essas iniciativas, o Grupo PMG DensiForm® desenvolveu um processo de densificação que gera componentes com uma camada superficial totalmente densa em áreas críticas de até um milímetro de profundidade na peça e com alta densidade e ainda assim com núcleo poroso. Esta combinação é a flexibilidade da metalurgia do pó, ao qual permite a produção de componentes de aço sinterizado que pode igualar o desempenho do aço forjado em aplicações altamente rigorosas [18].

A economia de custos que pode ser realizado através da capacidade do processo da metalurgia do pó, tem alimentado o rápido crescimento desta tecnologia na indústria automotiva. Isto porque, além dos pontos fortes da tradicional MP, como custo e tolerâncias dimensionais, as propriedades mecânicas de aços MP têm sido desenvolvidas para demandas específicas dessas aplicações. No entanto, a resistência e a dureza de componentes, convencionalmente MP, processados são limitadas pela porosidade residual que é tipicamente na ordem de 5-15% em volume. Existem muitas aplicações que poderiam ser introduzidas por aços MP, se melhorias substanciais forem feitas em duas áreas [18]:

- Resistência mecânica, especificamente fadiga e resistência ao impacto;
- Precisão dimensional.

Em muitas aplicações o carregamento gera tensões elevadas na superfície, de tal modo que a variação de densidade em uma peça sinterizada é necessária. Nesses casos, uma via de processamento altamente atrativa para o reforço de aços MP. Este processo gera uma camada superficial densificada com uma profundidade de 0,2-1,0 mm e um gradiente de densidade variando de porosidade quase zero na superfície [18]. A Figura 12, mostra uma engrenagem cônica produzida por *GKN Powder Metallurgy Division*.

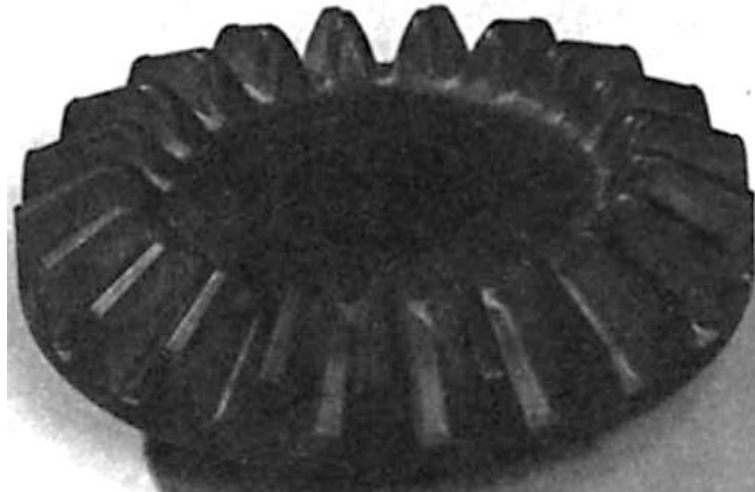


Figura 12: Engrenagem cônica sinterizada [19].

#### 2.4 Pó Metálico Distaloy®

O pó de aço de baixa liga Distaloy é hoje amplamente utilizado em aplicações que exigem alta resistência mecânica e resistência ao desgaste. Suas propriedades básicas e composição foram concebidas há meio século nos EUA. O Distaloy é uma pré-liga, isto é, os elementos de liga (cobre, níquel e molibdênio) foram ligados na forma de partículas com as partículas básicas de ferro, evitando assim a diminuição da compressibilidade. Ao equilibrar o conteúdo de níquel e cobre é possível minimizar a variação dimensional na sinterização. O carbono (grafite) foi adicionado de maneira convencional [20].



Na década de 1960, a demanda por peças de precisão de alta resistência surgiu na indústria automobilística europeia, inicialmente a Citroën, que foi pioneira para o aumento da utilização de peças MP em carros europeus. A Höganäs em meados dos anos 1960 desenvolveu um pó de ferro esponja com uma compressibilidade maior, e isso foi considerado como matéria-prima aprimorada, mais tarde chamada Distaloy SA. Este novo pó tinha melhorado a compressibilidade e reduzido os teores de oxigênio e de carbono, o que tornou possível a produção de peças de alta precisão e alta resistência mecânica [20].

O Distaloy foi imediatamente aceito e utilizado pela primeira vez na indústria automobilística francesa, em seguida, no resto da Europa e, posteriormente, também no Japão. Alguns anos mais tarde, quando a alta compressibilidade do pó atomizado se tornou disponível, a mesma técnica básica foi aplicada para produzir as ligas Distaloy AE. As propriedades metalúrgicas dos materiais baseados em Distaloy foram minuciosamente estudadas por metalúrgicos na Höganäs e em laboratórios de pesquisa na área da metalurgia do pó em todo o mundo, e novos resultados ainda estão sendo relatados com respeito a ambas as aplicações e propriedades fundamentais. Distaloy é hoje a matéria-prima mais utilizada em todo o mundo para a produção de componentes complexos, precisos e de alta resistência em peças sinterizadas [20].

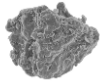

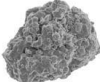

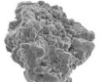
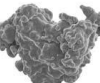
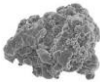
O Distaloy é um material otimizado para a fabricação de componentes de pó metálico tratados termicamente. Os pós Distaloy são ligados por difusão para compressibilidade e resistências máximas junto com boa consistência de propriedades nos componentes MP [21].

Principais benefícios do produto:

- Liga leve
- Alta resistência quando endurecida;
- Alta compressibilidade;
- Excelente usinabilidade;
- Boas propriedades dimensionais.

A Tabela 2, mostra a variedade de pós da família Distaloy e suas aplicações.

Tabela 2: Pós metálicos Distaloy [22].

Denominação	Características
<p>Distaloy SA</p> 	<p>É baseado no ferro esponja SC100.26, no qual são difundidos 1,75% de Ni, 1,5% de Cu e 0,5% de Mo. Distaloy SA é recomendado para densidades até 6,90 g/cm<sup>3</sup>. Distaloy SA tem alta resistência à verde. Este pó é apropriado para peças que exigem tratamento térmico.</p>
<p>Distaloy AB</p> 	<p>Mesma composição química do Distaloy SA, 1,75% Ni, 1,5% de Cu e 0,5% de Mo, mas é baseado no pó atomizado de alta pureza ASC100.29. O Distaloy AB pode ser compactado à densidade de 7,20 g/cm<sup>3</sup>. Após tratamento térmico a resistência pode aumentar para 1000MPa.</p>
<p>Distaloy AE</p> 	<p>Teor de Ni 4%. Os teores de Cu e Mo são de 1,5% e 0,5% respectivamente. Alto teor de Ni e boa compressibilidade possibilitam a produção de materiais sinterizados com resistência à tração de 750MPa. O Distaloy AE apresenta boa temperabilidade e estabilidade dimensional.</p>
<p>Distaloy AF</p> 	<p>É similar ao Distaloy AE, mas com maior quantidade de elementos de liga: 5% de Ni, 2% de Cu e 1% de Mo. Com a adição de grafite, resistência à tração de até 850MPa pode ser obtida com compactação e sinterização.</p>
<p>Distaloy DC</p> 	<p>É um pó de baixa liga especialmente desenvolvido para obter variação dimensional estável, independente da densidade e alta resistência após sinterização. Pela adição de grafite, resistência à tração até 700MPa pode ser obtida após compactação e sinterização.</p>
<p>Distaloy DH</p> 	<p>É um pó de baixa liga que exhibe uma temperabilidade extremamente boa. O cobre adicional aumenta a temperabilidade do Distaloy DH se comparando ao Astaloy Mo. Isto faz deste material apropriado a todos os processos de tratamentos térmicos.</p>
<p>Distaloy HP</p> 	<p>Contêm 4% de níquel, 2% de cobre e 1,41% de molibdênio. Resistência muito alta é obtida após sinterização com variação dimensional próxima de zero, com a adição de grafite.</p>

## 2.5 Preparação Metalográfica

Um dos requerimentos importantes do processo de metalurgia do pó é o controle da microestrutura. Isto é feito por uma técnica chamada metalografia, que consiste na preparação adequada do material que será analisado e o uso de microscópios óticos ou eletrônicos para observar a microestrutura. Em um novo desenvolvimento ou em melhorias de processo, a metalografia é uma ferramenta poderosa para investigar os detalhes do mecanismo de sinterização ou analisarmos falhas e desvios de especificação do material [23].

A preparação de componentes sinterizados difere de materiais convencionais, principalmente devido aos poros. Se as etapas corretas não forem seguidas, o resultado pode ser desastroso, levando o analista a erros de interpretação. Normalmente, as amostras são cortadas com discos de carbetto de silício ou diamantados, dependendo da dureza do material, sob refrigeração abundante e avanço lento para evitar o sobreaquecimento da amostra. Na sequência, ocorre o embutimento da mesma em material polimérico, em matriz cilíndrica aquecida, que garante uma face plana para análise. Depois desse processo, segue-se as etapas de lixamento (sequência de lixas, da mais grossa até a mais fina ou com discos de lixamento sintéticos) e polimento mais comumente utilizado alumina ou pasta de diamante [23].

No controle da matéria-prima, que no caso dos sinterizados são pós metálicos, a metalografia auxilia a inferir o tamanho e forma de partículas e os constituintes da microestrutura (fases, inclusões, porosidade interna da partícula etc.), além de permitir identificar os tipos de pós utilizados em uma determinada mistura (mistura elementar de pós, pó de ferro pré-ligado a outros elementos ou pó de ferro com elementos pré-difundidos na superfície deste). Permite também identificar se o pó foi atomizado, reduzido ou obtido por precipitação. O entendimento de todas estas variáveis permitirá a previsão do comportamento na compactação e na sinterização, por exemplo a compressibilidade e a variação dimensional esperada, como também das propriedades mecânicas aguardadas em uma determinada composição [23].

Em um componente sinterizado a metalografia possibilita avaliar o grau de sinterização e arredondamento de poros, presença de elementos livres,

segregações, impureza, porcentagem de poros e fases presentes na microestrutura; etc [23]. A Figura 13 mostra:

Área 1: É um exemplo de sistema de Fe-C onde a perlita é distinguida [24].

Área 2: É um exemplo do sistema Fe-Ni-C onde os elementos Ni e C estabilizam a fase de austenita [24].

Área 3: É um exemplo de Fe-Mo-C onde a taxa de difusão relativamente boa de Mo as partículas originais de ferro formam bainita juntamente com C [24].

Área 4: É um exemplo do sistema Fe-Cu-C onde Cu (que difunde um pouco mais lento do que Mo) e C forma martensita devido à maior endurecimento do Cu e C que suprimem a formação de ferrita, perlita e bainita. Assim sendo a martensita é formada durante o resfriamento [24]

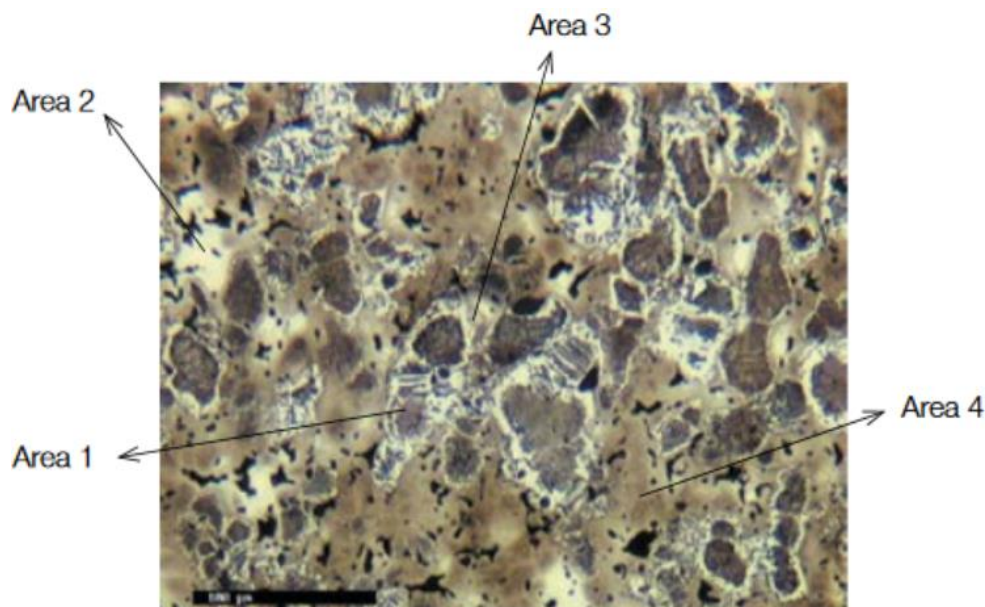


Figura 13: Microestrutura do Distaloy sinterizado [24].

## 2.6 Material para Ferramenta de Compactação

A escolha do material para ferramenta é de extrema importância e está ligada diretamente com a qualidade e exigência do ferramental e do processo [25].

Os aços utilizados na fabricação de ferramentas devem ser resistentes às altas pressões empregadas durante o processo de produção, bem como

pela necessidade de suportar as tensões de flexão e as cargas de compressão, exigindo que a resistência no núcleo de aço seja alta enquanto se mantém uma dureza superficial adequada que permite [25]:

- Suportar efeitos de erosão dos materiais nas zonas do molde ou matriz em que o fluxo é restrito ou obstruído;

- Resistir ao desgaste, especialmente em grandes produções;

- Manter na superfície um alto grau de polimento, que facilite a extração do produto e lhe proporcione um bom acabamento;

- A seleção do melhor aço para uma determinada finalidade deve levar em conta um equilíbrio entre tenacidade, resistência ao desgaste e tensão limite de compressão (associada à dureza),

A Figura 14 mostra a comparação entre as propriedades mecânicas de alguns aços em uma tabela de 0 a 10 [25].

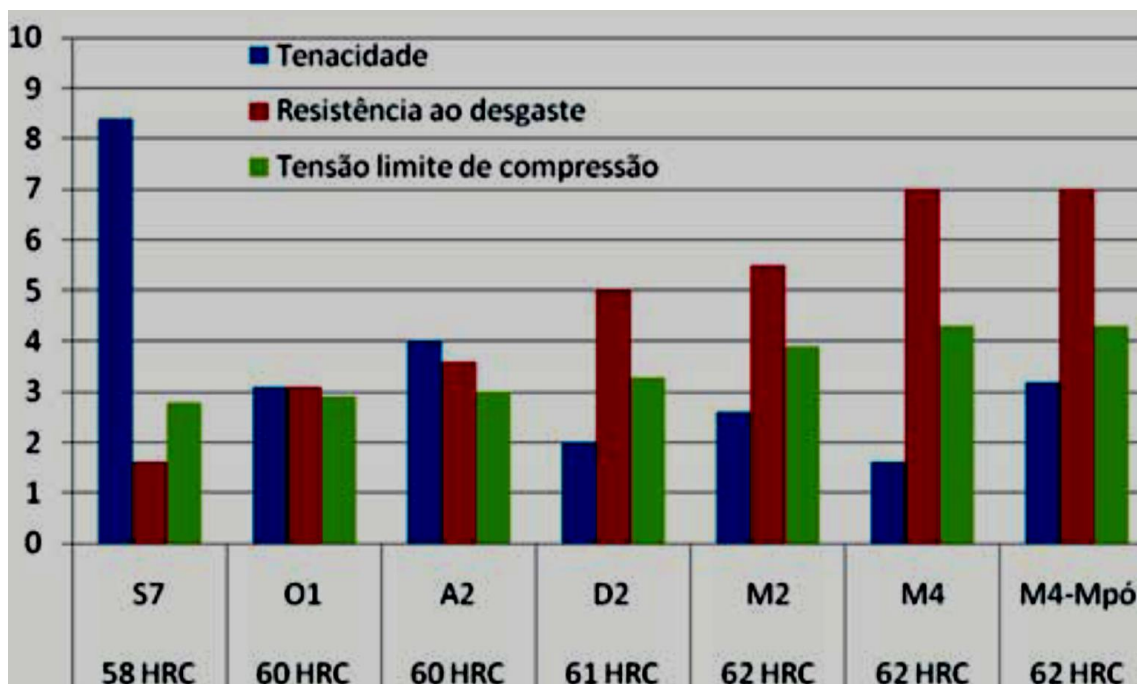


Figura 14: Comparação das propriedades mecânicas de alguns aços [25].

Além dos critérios apresentados, existem outros fatores, como a temperatura de trabalho e o grau de deformação durante a têmpera, quando

aplicável. A Figura 15 especifica de forma resumida, indicações gerais para a escolha de aços ferramenta [26].

**Decrescem: Resistência ao Choque e Usinabilidade.**

**Crescem: Profundidade de Têmpera, Custo, Indeformabilidade na Têmpera, Resistência ao Amolecimento pelo Calor**

Resistência à Abrasão Cresce	Resistência ao Impacto Decresce	Trabalho à Frio		Trabalho à Quente Baixa Deformação de Têmpera	
		Deformação Normal de Têmpera	Baixa Deformação de Têmpera		
		Alta Resistência à Abrasão	F2, W1, W2 (1,1 a 1,3% C)	D2, D3, D6	M3, T5, T8
		Média Resistência à Abrasão	W1, W2 (1,0 a 1,1% C)	A2, O7	M1, M2, T1
		Baixa Resistência à Abrasão	W1, W2 (0,8 a 1,0% C)	O1, O2, L6	H21
		Boa Resistência ao Impacto	S1	S5	H11, H12, H13

Figura 15: Critérios qualitativos de seleção do aço ferramenta [26].

Apesar de existirem mais de 100 tipos de aços-ferramenta normalizados internacionalmente, para as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria trabalha com uma gama relativamente reduzida de opções. São preferidos aqueles que possuem suas propriedades e desempenhos consagrados ao longo do tempo, como, por exemplo, os aços H13, D2 e M2. De qualquer forma, a escolha de um aço requer uma análise detalhada de toda a gama de fatores incluindo ainda parâmetros como volume de produção, vida útil da ferramenta e custos associados [26].

## 2.7 Relação de Custo e Benefício do Sinterizado

Em geral, todo componente de metal pode ser fabricado por qualquer uma das várias tecnologias de fabricação. No caso de uma engrenagem simples, existem vários processos de fabricação que podem ser utilizados, como por exemplo, a peça pode ser fabricada usinada a partir de um *bloco de aço inacabado (blank)*, forjada e em alguns casos estampada e ou fundida, ou

no caso de MP compactada em ferramentas específicas e sinterizadas [27]. Na Figura 16 é mostrado um gráfico de custo entre peças usinadas e sinterizadas.

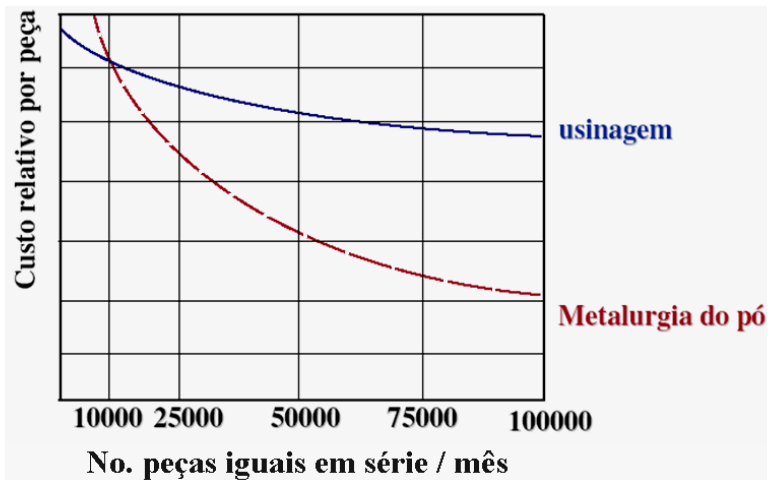


Figura 16: Competitividade da M/P frente à Usinagem em função do volume fabricado [28].

O processo de usinagem é o competidor mais forte em relação ao processo da metalurgia do pó, produzindo peças com resistência mecânica elevada e precisão dimensional. A MP assegura sua competitividade reduzindo custos através do aproveitamento da matéria-prima inicial, e redução de etapas de fabricação. Esta diferença no custo da peça é proporcional aos volumes produzidos [28].

A MP como método de fabricação de componentes automotivos, atingiu alto grau de desenvolvimento tecnológico nos últimos 10 anos. Tornou-se um dos processos mais competitivos para produção de peças com formas complexas, massa de até 1kg, e volumes preferencialmente acima de 10.000 peças/mês. Não são incomuns casos onde a MP se viabilizou em volumes inferiores ao acima, face principalmente a peças perfeitas para a fabricação via MP, e/ou acordos sobre lotes mínimos de fornecimento. Do ponto de vista de tolerâncias dimensionais, a MP é superior aos processos de forjamento ou fundição, e pode atingir os mesmos patamares de resistência mecânica de componentes forjados e/ou usinados. Peças em plástico são competidoras do ponto de vista de tolerâncias, porém não suportam aplicações com carregamento elevado ou cíclico [28].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações Gerais

Neste trabalho foi analisada uma engrenagem a ser produzida pelo processo de MP em comparação a uma engrenagem usinada. O objetivo é verificar a viabilidade da troca de processos, usinagem para MP, analisando também os custos envolvidos na fabricação do ferramental para um lote de produção. As etapas principais para a manufatura de uma engrenagem cônica por metalurgia do pó desenvolvida neste trabalho são apresentadas no diagrama de bloco da figura 17.

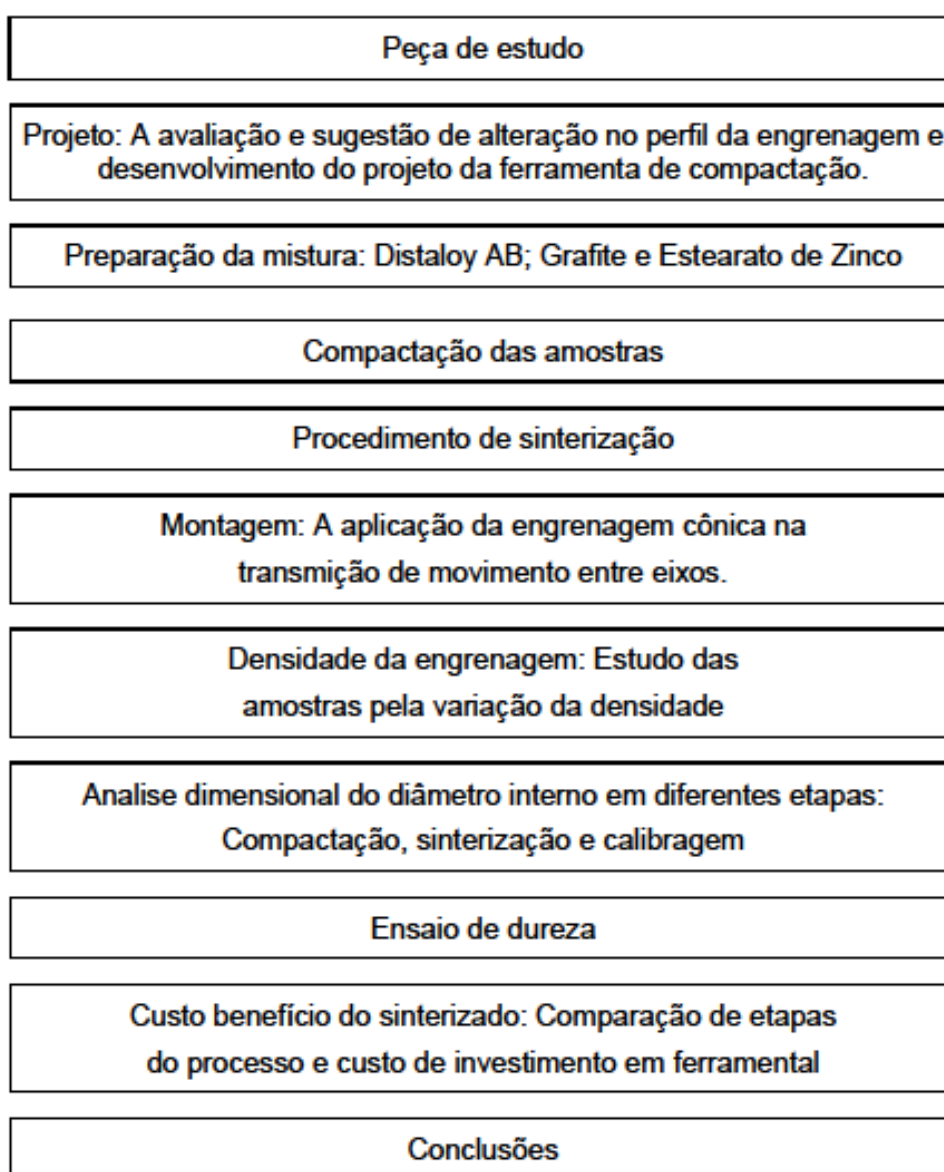


Figura 17: Diagrama de bloco do trabalho desenvolvido.



### 3.2 Matéria Prima

A matéria prima utilizada para preparação da mistura foi produzida pela empresa Höganäs do Brasil. O pó denominado Distaloy AB foi obtido por difusão. Os materiais selecionados para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Os materiais utilizados para desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

Matéria Prima	Composição	Fornecedor
Distaloy AB	Fe-0,50%Mo-1,75%Ni-1,50%Cu	Höganäs do Brasil – SP
Grafite UF4	96,5%C – 3,5% cinzas – 0,07%S - 0,09% de umidade	Höganäs do Brasil - SP
Estearato de zinco	[Zn(C <sub>18</sub> H <sub>35</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ]	JB Química – RS.

A fim de eliminar o problema da segregação nas misturas dos pós, a Höganäs desenvolveu dois processos especiais para a produção da liga de pós metálicos. Uma grande variedade de misturas de pó padrão e sobre medida são produzidos de acordo com estes processos e são oferecidos sob os nomes comerciais Distaloy® e Starmix®.

O processo Distaloy® pode ser descrito da seguinte forma: Os elementos de liga utilizados no processo Distaloy® são principalmente cobre, níquel e Molibdênio (mas não grafite!) sobre a forma de pós. O processo começa com a pesagem de um lote de produção de 30 toneladas de pó de ferro e os pós de liga em proporções exatamente controladas. Este lote é misturado num misturador de duplo cone.

A mistura em pó assim produzida é tratada termicamente num forno contínuo sobre uma atmosfera redutora a uma temperatura um pouco abaixo do ponto de fusão do elemento de liga de menor ponto de fusão. Durante este de tratamento térmico, as partículas finas dos elementos de liga são ligados de forma segura às superfícies das partículas do pó de ferro.

### 3.3 Obtenção da Mistura

#### 3.3.1 Pó de Fe-Mo-Ni-Cu (Distaloy AB)

O Distaloy AB, trata-se de um pó comercial de procedência da Höganäs do Brasil, de elevada pureza, sendo manufaturado pelo processo de difusão. Preferencialmente, utilizado para componentes sinterizados de média a alta densidade. Por compactação, seguida de sinterização, é possível produzir componentes de densidade até  $7,16 \text{ g/cm}^3$ . Devido ao formato irregular das partículas, a resistência à verde é alta, o que permite a compactação de peças com geometria complexa. A figura 18 mostra as partículas de cobre, níquel e molibdênio ligadas por difusão no processo Distaloy®, à superfície de uma partícula de pó de ferro.

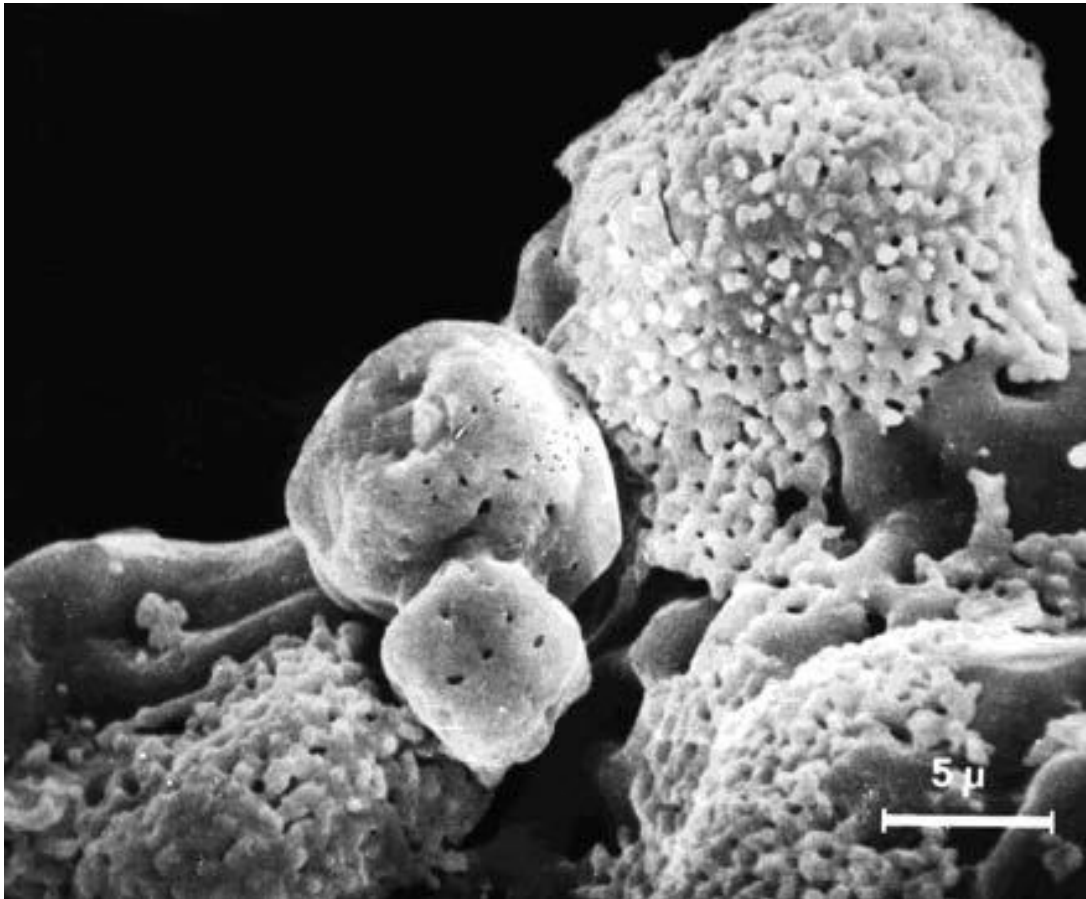


Figura 18: Pós de Distaloy AB, mostrando a morfologia irregular [29].

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades típicas do pó Distaloy AB, conforme certificado de qualidade, anexo 1.

Tabela 4: Propriedades do pó da liga Distaloy AB, anexo 1.

Propriedades Físicas	Mínimo	Máximo
Densidade aparente	2,99 g/cm <sup>3</sup>	3,05 g/cm <sup>3</sup>
Escoabilidade		24 s/50g
Compressibilidade à 600 Mpa com 0,8% de estearato de zinco	7,16 g/cm <sup>3</sup>	-

Composição Química	Mínimo (%)	Máximo (%)
Ferro	96,25	-
Molibdênio	0,50	-
Níquel	1,75	-
Cobre	1,50	-

Granulometria	
+Malha 70 (0,212mm)	0,000 %
+Malha 80 (0,180mm) Malha 70 (0,212mm)	0,600 %
+Malha 100 (0,150mm) Malha 80 (0,180mm)	5,200 %
+Malha 140(0,106mm) Malha100 (0,150mm)	14,900 %
+Malha 200 (0,075mm) Malha 140 (0,106mm)	20,100 %
+Malha 325 (0,045mm) Malha 200 (0,075mm)	30,200 %
+Malha 325 (0,045 mm)	29,000 %

### 3.3.2 Grafite UF4

O grafite usado, denominado UF4, foi fornecido pela empresa Höganäs do Brasil - SP, de granulometria conforme tabela 5, e composição química mostrado no certificado de qualidade, anexo 2.

Tabela 5: Distribuição granulométrica do pó de grafite utilizado neste trabalho.

Tamanho de partícula	>100 µm	<2,6 µm	<6,1 µm	<11,5 µm	<17,4 µm
Percentuais (%)	0,005	10,0	50,0	90,0	99,99

### 3.3.3 Estearato de Zinco

Trata-se de um lubrificante sólido à base de ácido esteárico contendo zinco de procedência da JB Química. Além da Metalurgia do Pó, este material é comumente aplicado em tintas e vernizes, borrachas, compostos de PVC, polietileno e polipropileno e como lubrificante no processo de trefilação. Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades típicas deste material.

Tabela 6: Apresenta as propriedades típicas do pó de estearato de zinco.

<b>Propriedades físico-químicas</b>	
Estado físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Sólido branco
Densidade	1,09 g/cm <sup>3</sup> a 25 °C
Solubilidade	Insolúvel em água
Ponto de fulgor	276 °C

O pó de estearato de zinco serviu como lubrificante em quantidade de 0,70% para reduzir o atrito entre as partículas do pó metálico e as paredes do conjunto da ferramenta de compactação. Entre as vantagens do estearato de zinco pode-se citar o baixo custo, bom desempenho em termos de lubrificação

e boa compressibilidade. A Figura 19 mostra a micrografia em MEV do estearato de zinco.

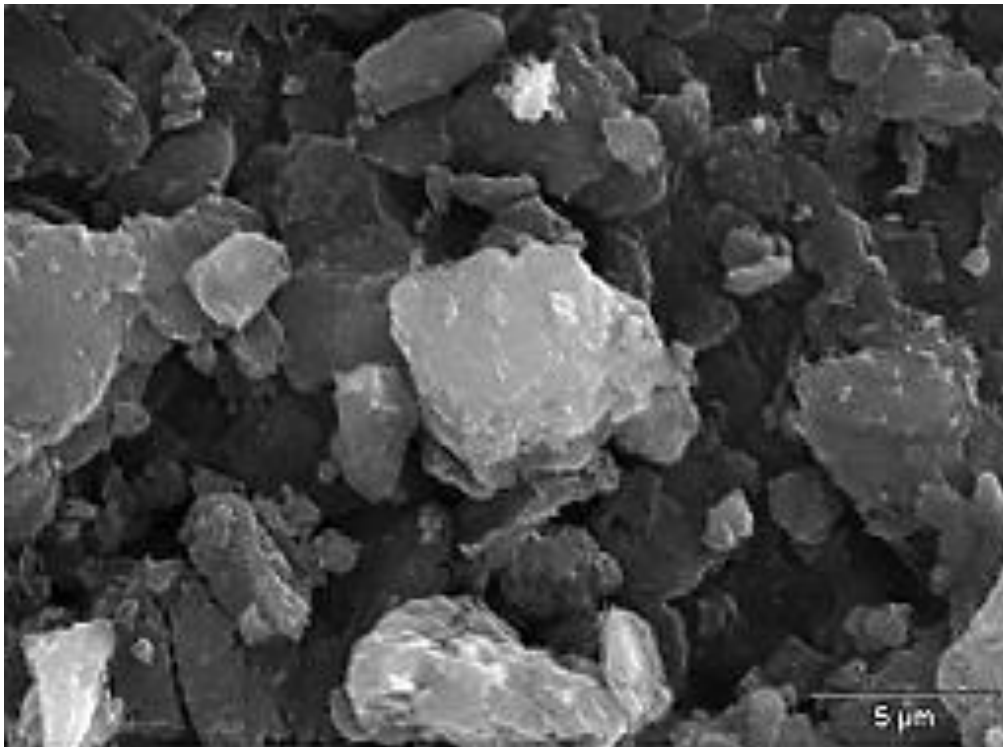


Figura 19: Micrografia do estearato de zinco (500X).

### 3.4 Peça de Estudo

A peça é uma engrenagem cônica com a aplicação em um dispositivo para agroindústria em equipamentos de plantio, entre suas funções está a principal aplicação de transmitir movimentos entre eixos concorrentes (eixos que se cruzam). No caso deste estudo o ângulo de interseção é de  $90^\circ$ , sendo o ângulo mais comum para essa aplicação. A engrenagem cônica é encontrada em diversos segmentos da indústria como transporte rodoviário, componentes automotivos, sistemas de armazenamento de líquidos, e em uma ampla variedade de equipamentos. A peça em estudo é mostrada na Figura 20. Normalmente é utilizada para mudança de direção da força e da rotação em velocidades baixas. Na mesma Figura 20 observa-se o desenho da engrenagem cônica inicialmente desenvolvida para produção pelo processo de usinagem com suas especificações dimensionais.

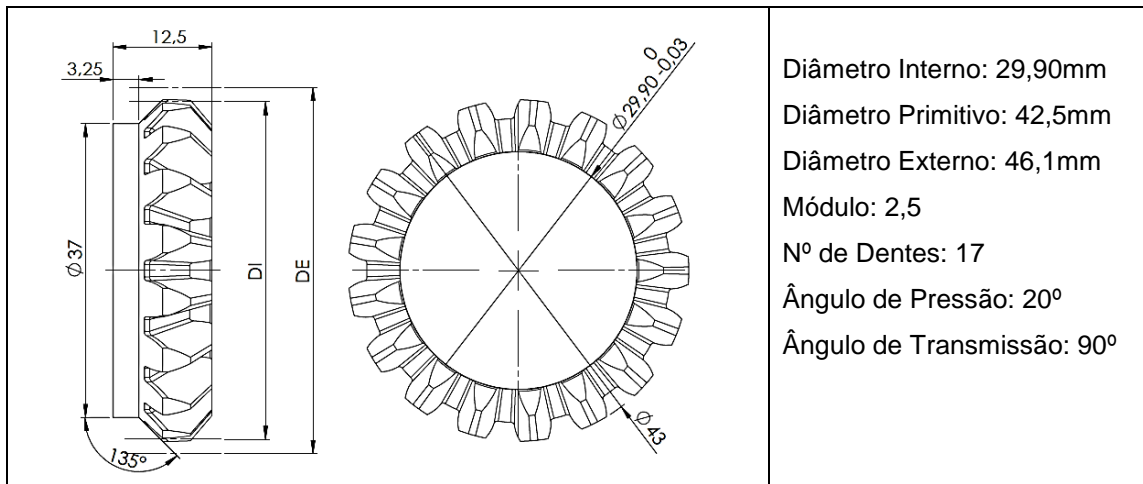


Figura 20: Projeto da engrenagem cônica usinada.

### 3.5 Análise Dimensional

A peça de estudo exige para seu adequado funcionamento uma precisão dimensional no seu diâmetro interno de 29,90 mm (+0; -0,03). Em geral, a precisão dimensional de peças sinterizadas é determinada utilizando-se as mesmas técnicas de medição dos processos convencionais [8]. No caso da peça deste estudo foi utilizado o equipamento tridimensional de marca TESA e modelo Micro-hite 3D na comparação do diâmetro interno das engrenagens cônicas sinterizadas em diferentes etapas do processo da metalurgia do pó: Compactado (verde), sinterizada e após a calibragem. A Figura 21 mostra as engrenagens sendo medidas no equipamento tridimensional de medição.



Figura 21: Engrenagem sendo medida no equipamento de medição tridimensional, marca TESA e modelo Micro-hite 3D.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 Preparação da Mistura

A mistura dos materiais foi preparada com a seguinte proporção: Distaloy AB + 0,50%C + 0,70% Estearato de Zinco. O pó de grafite foi adicionado com a finalidade de manter o carbono final na composição de 0,5 % em massa. Para a obtenção da mistura foi utilizado um equipamento em “Y”. Neste equipamento para obter-se ação efetiva da mistura e permitir que todo o material seja misturado em cada revolução, limitou-se a carga correspondente a 50% do volume do recipiente. Foi adicionado aos pós, estearato de zinco (0,7% em peso) como lubrificante, sendo homogeneizados durante 30 minutos em um misturador do tipo “Y” a 22 rpm.

### 4.2 Compactação

Neste trabalho foi utilizado a compactação uniaxial, uma prensa hidráulica com matriz flutuante e o ferramental regido para compactação da engrenagem cônica.

#### 4.2.1 Ferramental de Compactação

O desenvolvimento de um projeto para fabricação de uma peça em MP tem seu início, a partir da análise do desenho técnico ou de uma amostra. Em alguns casos, há a necessidade de determinadas alterações no projeto da peça para sua viabilização de produção pela MP. Essa situação busca atender as necessidades do componente final e as características peculiares do processo de MP. É importante avaliar aspectos como geometria e chanfros do produto, prever os movimentos necessários durante o ciclo de compactação, extração e calcular o grau de enchimento. A escolha da prensa para que atenda todo o ciclo da ferramenta é de suma importância, no caso da peça de estudo utilizou-se de uma prensa hidráulica de simples ação com a flutuação da cavidade (matriz), sendo necessária a criação de movimento extra no punção superior.

A Figura 22 mostra o desenho da engrenagem (01) a ser produzida, onde alterou-se a geometria com a eliminação do ângulo de 45°, garantindo

assim a sua viabilidade de produção por MP. A engrenagem (02) mostra o desenho para ser fabricada pelo processo de usinagem com o ângulo de 45° no final dos dentes. O ângulo de 45° no final dos dentes da engrenagem dificulta a etapa de compactação, sendo assim necessário a sua eliminação.

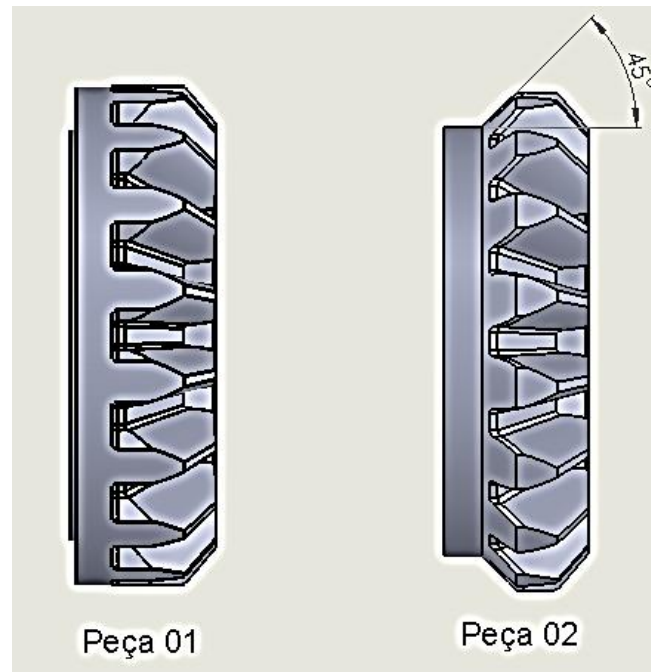


Figura 22: (peça 01) Engrenagem sinterizada; (peça 02) engrenagem usinada.

Para a produção da ferramenta de compactação, empregam-se aços ferramentas, chamados indeformáveis, tratados termicamente (temperados e revenidos), de modo a apresentarem dureza da ordem de 58 HRC para os punções e de 64 HRC para a matriz e pino macho. Os elementos da ferramenta foram tratados termicamente à temperatura de 940 °C, resfriamento em óleo e duplo revenimento a 280 °C. A matriz foi projetada com suficiente resistência mecânica para suportar repetidas e elevadas cargas na compactação.

Os componentes da ferramenta de compactação foram construídos em aço AISI D6, como mostrado na Figura 23, item 02 e item 03. Foi aplicado um ângulo de saída de 1° na cavidade da matriz, iniciando no ponto logo acima de onde se forma a peça. Este ângulo tem como objetivo facilitar a extração da peça.



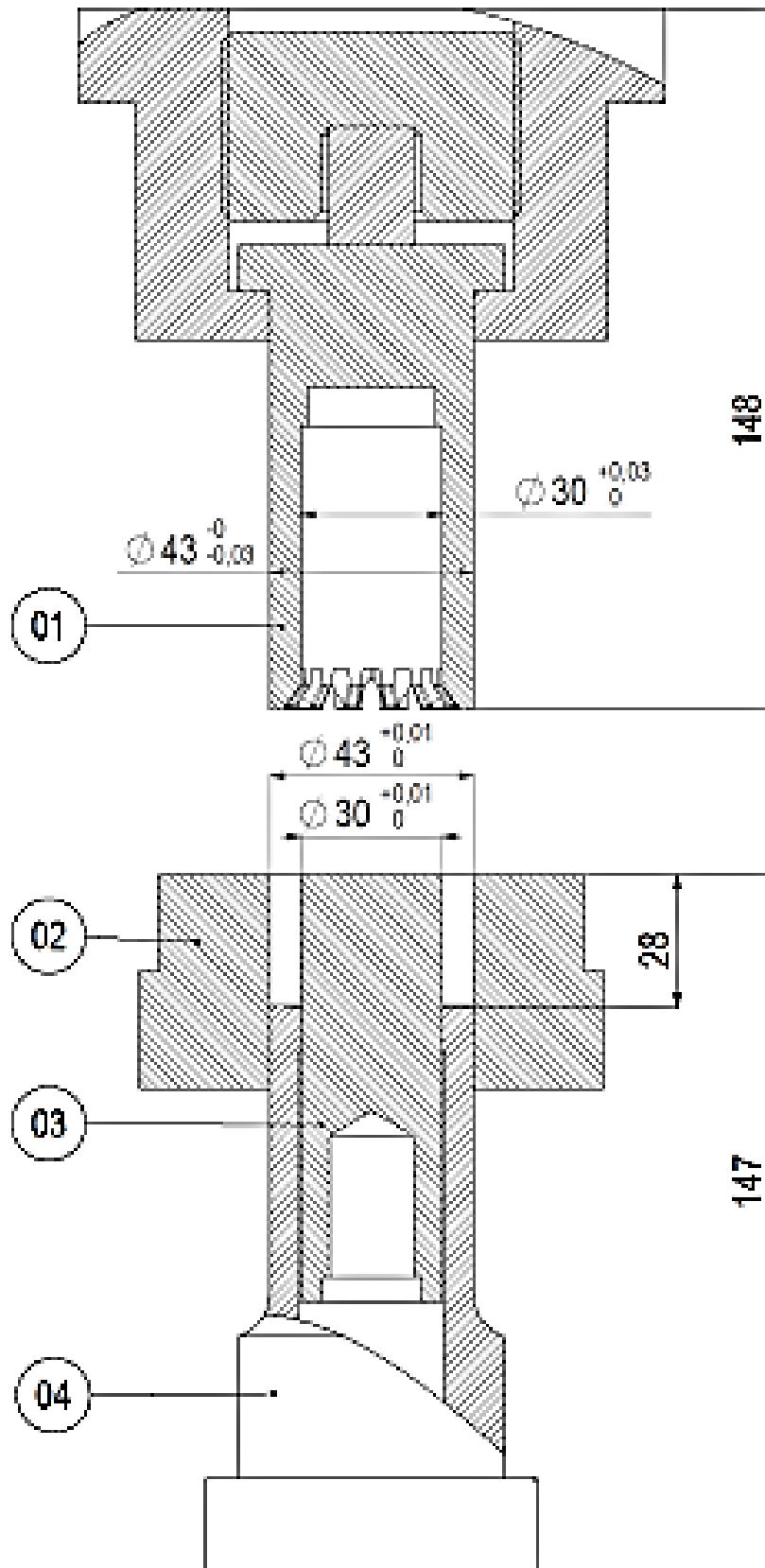


Figura 23: Ferramental de compactação: Punção superior (01); Cavidade ou Matriz (02); Pino macho (03); Punção inferior (04).

O aço aplicado na construção dos componentes da ferramenta de compactação, atendendo as necessidade para o projeto, garantindo precisão, qualidade de acabamento e polimento, tenacidade, resistência ao desgaste além de ter um custo agregado relativamente baixo.

O punção superior foi desenvolvido com um movimento de flutuação para melhorar a compactação. No projeto acrescentou-se uma mola gerando a acomodação do pó de ferro durante a compactação mantendo a uniformidade da densidade da peça o que será mostrado em maiores detalhes em “5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS”. É mostrado na Figura 24 o desenho do punção superior.

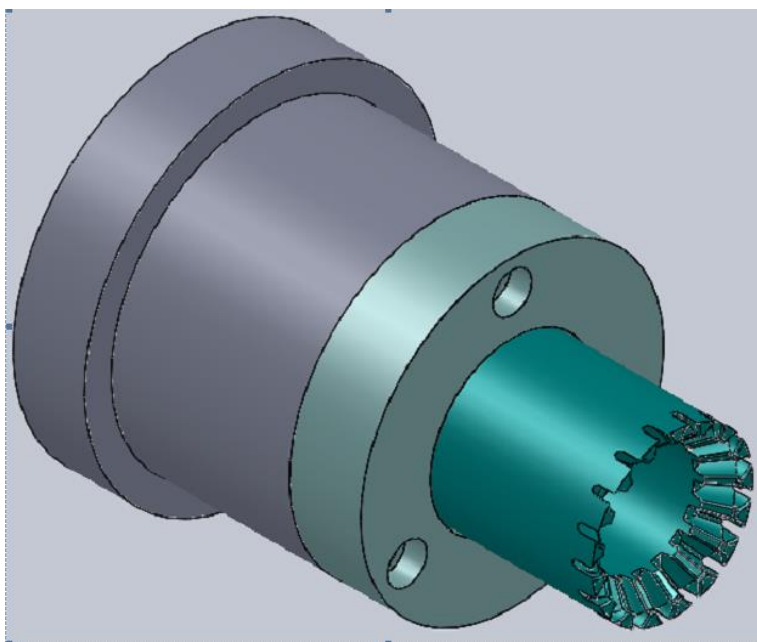


Figura 24: Punção superior.

As amostras da engrenagem foram compactadas com densidade de  $6.70 \text{ g/cm}^3$ . O sistema de compactação consiste em um punção superior e uma matriz que se movimentam, e de um punção inferior que permanece estacionário, e é regulado para o preenchimento de material na cavidade. A matriz é mantida na posição inicial durante a fase de enchimento do ciclo de compactação. A Figura 25 mostra a mesa do ferramental utilizada nos ensaios de compactação das engrenagens cônicas, onde: **(01)** suporte de fixação do punção superior; **(02)** punção superior; **(03)** engrenagem compactada; **(04)**

mesa de fixação da cavidade; **(05)** punção inferior e **(06)** suporte de fixação do punção inferior.

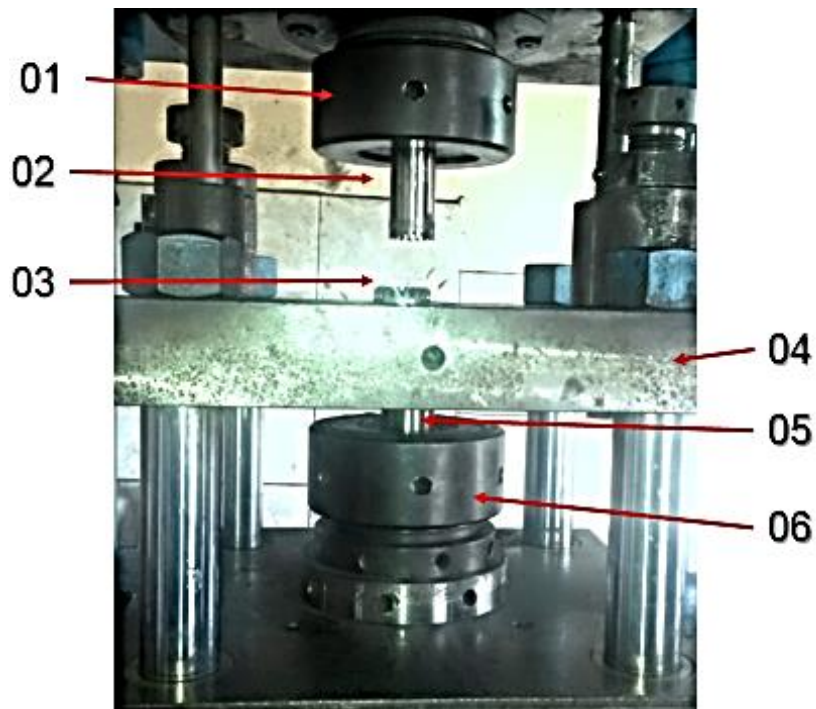


Figura 25: Mesa suporte do ferramental.

#### 4.2.2 Cálculo do Dimensionamento da Cavidade de Enchimento

Nesta etapa do processo se faz necessário alguns dados como: massa da peça final, dimensões da peça e densidade aparente do pó metálico, a partir destas informações são determinadas as medidas para confecção dos punções, cavidade e pino macho. É importante observar a variação dimensional do material compactado após a sinterização, para isto são compactadas amostras do pó metálico com uma geometria simples reproduzindo as condições de sinterização.

O cálculo de enchimento da cavidade tem como objetivo garantir os parâmetros estabelecidos de massa e densidade, conferido a peça características necessárias para que o sinterizado atenda as solicitações mecânicas da sua aplicação.

Para determinação da altura de enchimento da cavidade foi utilizado a forma de cálculo mencionando no livro, A Metalurgia Do Pó: Alternativa

Econômica Com Menor Impacto Ambiental. 1ª Edição São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009, pag180.

Onde:

d: densidade da peça à verde; [ g/cm<sup>3</sup>]

ρ: densidade aparente do pó; [ g/cm<sup>3</sup>]

h: altura da peça final; [mm]

Ge: Grau de enchimento; [ - ]

He: altura de enchimento; [mm]

$$Ge = \frac{d}{\rho}; [ - ] \quad \text{Eq. (01)}$$

$$He = h \cdot Ge; [mm] \quad \text{Eq. (02)}$$

A figura 26 mostra a montagem de alguns componentes da ferramenta e a representação do espaço de enchimento necessário para compactação da peça.

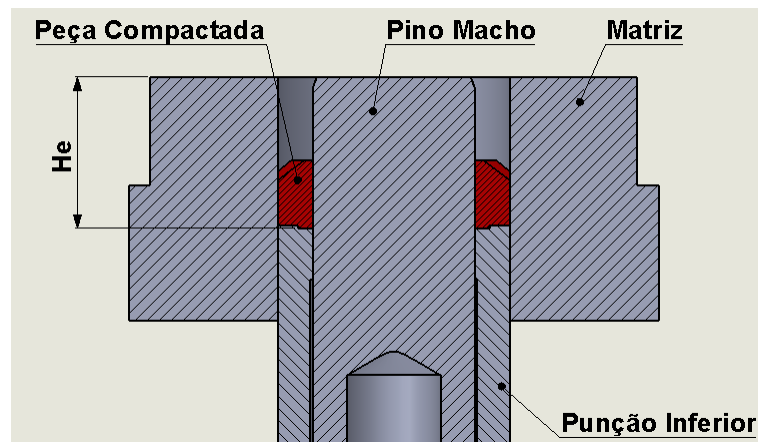


Figura 26: Representação da altura de enchimento (He).

O cálculo do grau de enchimento (Ge) foi feito a partir dos dados de projeto como massa do componente sinterizado, ou seja, 42g e altura da peça com 12,50mm, para uma densidade à verde,  $d = 6,70 \text{ g/cm}^3$ , e levando-se em consideração a densidade aparente do pó metálico de  $\rho = 2,99 \text{ g/cm}^3$ , tem-se:

$$Ge = \frac{d}{\rho} = \frac{6,70}{2,99} = 2,24 [ - ]$$

$$He = h \cdot Ge = 12,5 \text{ mm} \cdot 2,24 = 28 \text{ mm}$$

O resultado do cálculo mostra que são necessários 28mm de enchimento para a compactação da peça sinterizada, este resultado pode sofrer pequenas alterações ao longo do processo de regulagem da máquina (*setup*), devido a variação na densidade aparente da liga metálica.

#### 4.3 Procedimento de Sinterização

Para tratamento térmico foi utilizado um forno de sinterização, marca Girardi, com controle eletrônico, precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , na temperatura de trabalho. A Figura 27 mostra as fases do ciclo térmico do processo de sinterização, constituindo de:

1. Aquecimento até  $625^\circ\text{C}$ , com uma taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ . Na temperatura de  $625^\circ\text{C}$ , mantém-se constante durante 20 minutos, ocorrendo a queima do lubrificante [12];
2. Aquecimento até o patamar de sinterização com uma taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ . Fixou-se a temperatura de sinterização de  $1120^\circ\text{C}$ , durante o tempo de 40 min [12]; com a atmosfera de controlada ...
3. Resfriamento lento dentro do forno [12].

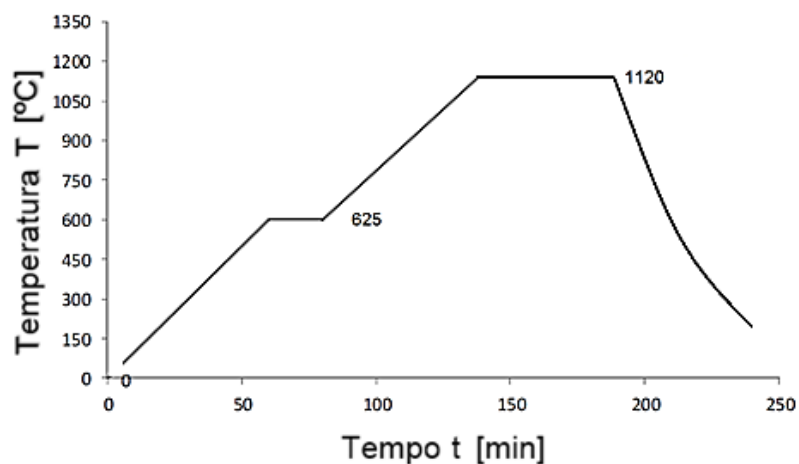


Figura 27: Ciclo de sinterização

A Figura 28 mostra os detalhes de entrada do forno para sinterização no momento em que as peças compactadas (peças à verde) estão posicionadas na esteira do forno.

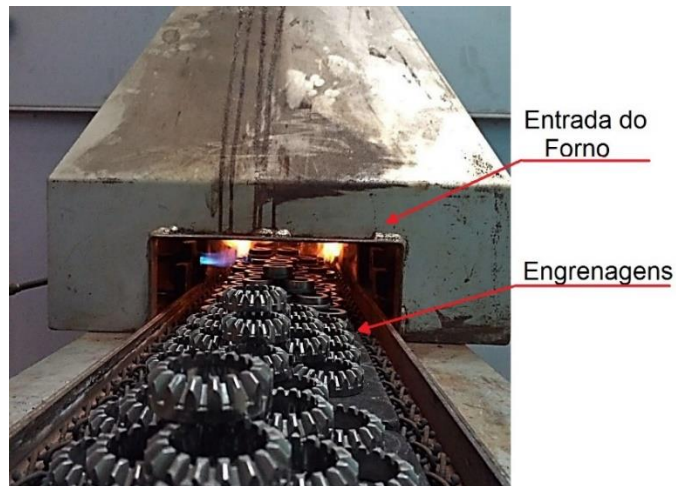


Figura 28: Detalhe da entrada das peças compactadas no forno de sinterização

#### 4.4 Montagem

A aplicação da engrenagem cônica consiste em transferir movimentos entre eixos, neste caso o ângulo de aplicação é de  $90^\circ$ . A Figura 29 mostra a montagem do conjunto de engrenagens cônicas sinterizadas.



Figura 29: Conjunto de engrenagens montadas na caixa de redução [30].

. Duas engrenagens cônicas foram montadas no eixo com interferência de 0,03 mm no seu diâmetro e aplicado um adesivo anaeróbico na área de contato entre o eixo e a engrenagem. O adesivo anaeróbico utilizado neste experimento foi o Permabond HL 138, multiuso de baixa viscosidade e alto torque para uma melhor aderência entre as peças (adesivo fornecido pela

empresa PERMABOND). A Figura 30 mostra as peças antes da montagem (01), e o eixo e a engrenagem sinterizada (02) montada e colada.

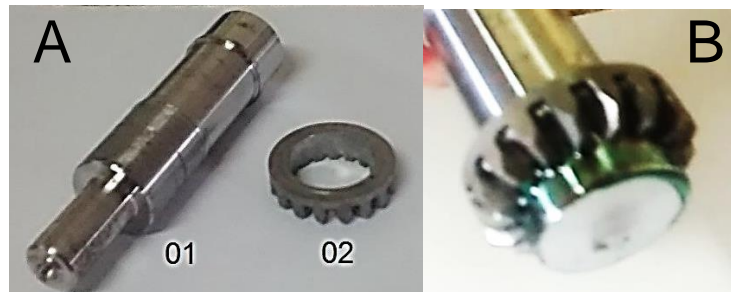


Figura 30: **(A)** Peças prontas para montagem: (01) Eixo; (02) Engrenagem sinterizada. **(B)** Engrenagem montada no eixo.

#### 4.5 Densidade no Dente da Engrenagem

Foi analisada a densidade do dente em 06 (seis) diferentes amostras retiradas de duas engrenagens, após o processo de sinterização, como mostrado na figura 31. As amostras serviram para analisar o comportamento da variação de densidade nos dentes da engrenagem. As medições foram realizadas utilizando-se, o Princípio de Arquimedes.

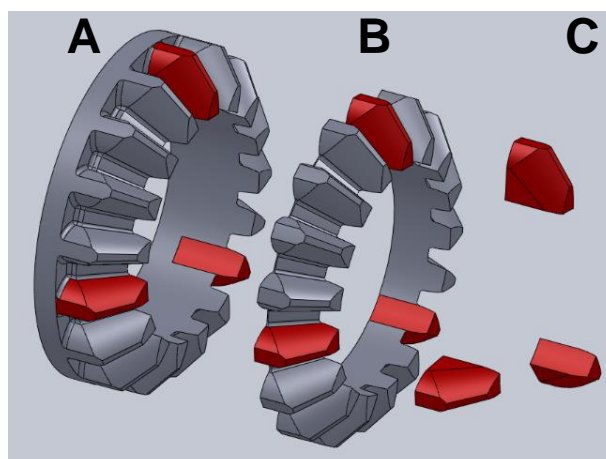


Figura 31: **(A)** Engrenagem cônica, **(B)** Secção da engrenagem **(C)** Dente da engrenagem.

## 4.6 Calibragem

Uma etapa complementar ao processo de metalurgia do pó é a calibragem, que consiste em conformar a peça em uma matriz fechada após a sinterização, no caso deste estudo optou-se em utilizar uma matriz com a dimensão de  $\text{Ø}42,865\text{mm}$  de diâmetro interno. A Figura 32 mostra a engrenagem cônica sendo calibrada. A calibragem tem como uma de suas características, a de ajustar o dimensional.

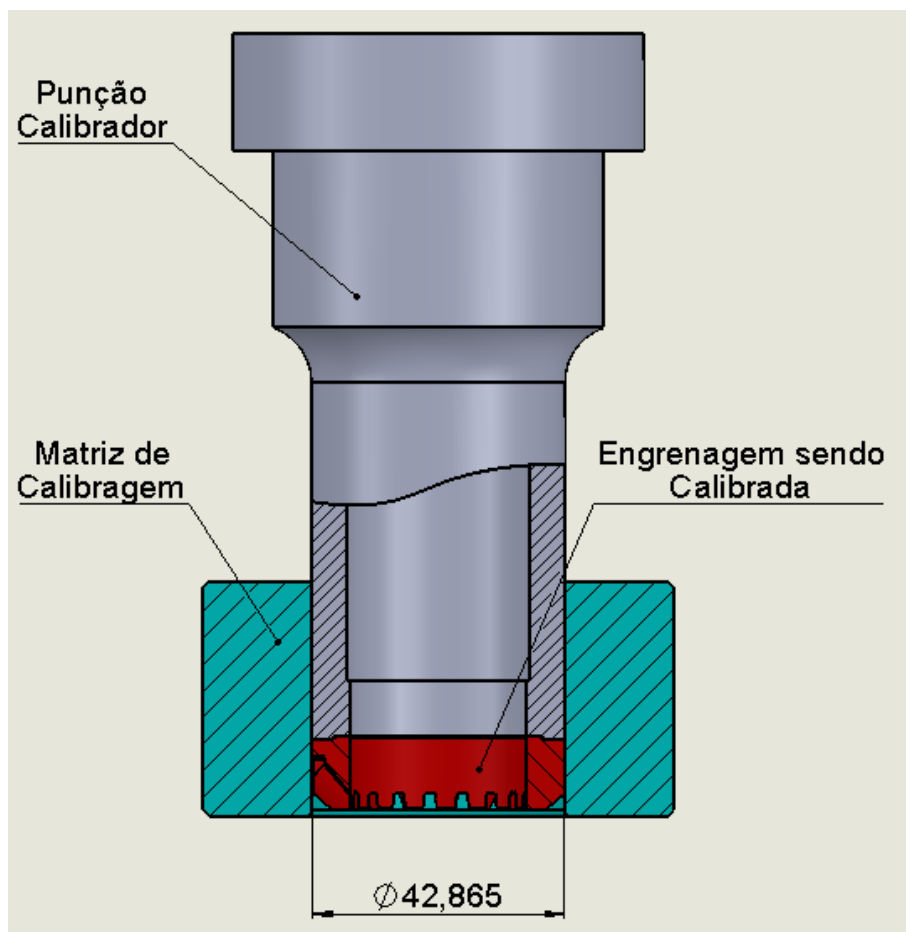


Figura 32: Engrenagem cônica sendo calibrada

Na construção da ferramenta de calibragem optou-se na utilização de aço AISI O1 com dureza na matriz de 62 HRC e no punção calibrador a dureza de 58 HRC, a determinação do diâmetro interno da matriz foi baseado em um ensaio com um diâmetro menor de  $\text{Ø}42,75\text{mm}$ , após esta tentativa chegou-se a medida de  $\text{Ø}42,865\text{mm}$ .



## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste estudo os resultados serão apresentados individualmente, para mostrar o comportamento da engrenagem cônica sinterizada em cada fase do processo, facilitando assim a análise das diferentes etapas em que a engrenagem foi produzida.

No projeto do punção superior houve a necessidade de criar um movimento extra devido às limitações da prensa de compactação e também pela geometria peculiar da engrenagem cônica, adicionou-se uma mola ao projeto inicial criando uma pequena flutuação no punção superior de 5mm facilitando a compactação. A Figura 33 mostra os componentes do punção superior. O punção superior é composto por uma base (1), mola de Plastiprene®, tampa guia (3) e o punção (4). A base e a tampa guia foram fabricadas em aço SAE 4340, tratadas termicamente com dureza final de 54 HRC.

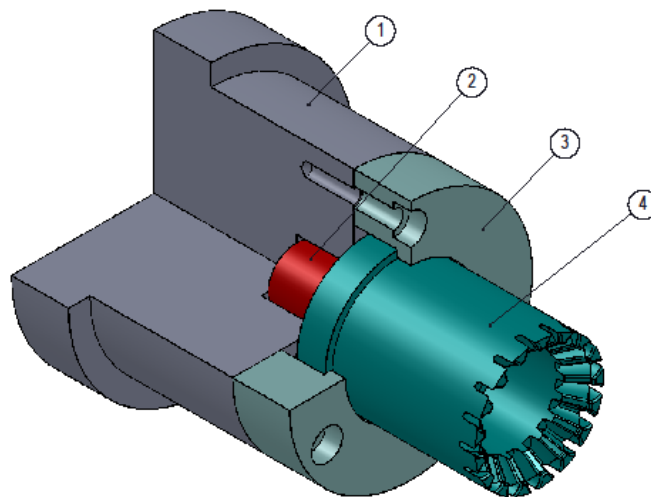


Figura 33: Componentes do Punção Superior.

Na Figura 34 são mostrados as dimensões do projeto incluindo o deslocamento aplicado pela mola no punção superior de 5mm neste projeto.

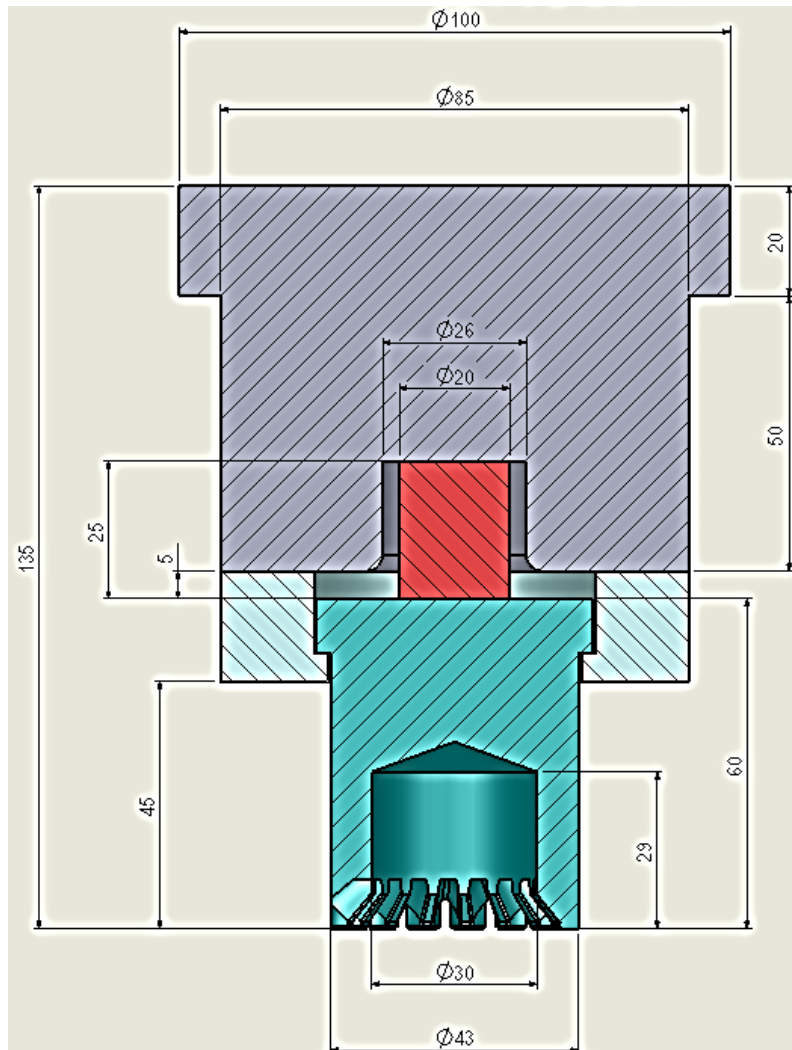


Figura 34: Punção superior cotado.

Para determinar o deslocamento da mola foi considerada como base a altura do dente e a altura de enchimento tendo como referência para o primeiro teste, após início dos testes de compactação ocorreu a necessidade de alteração na altura da mola até a altura final de 5mm. A função da mola é apenas de manter o punção superior flutuando e permitir que o pó tenha uma acomodação entre os dentes do punção superior antes da compactação final.

### 5.1 Densidade da Engrenagem

De acordo com as etapas do processo após a sinterização das amostras foi observado a variação da densidade nos dentes da engrenagem conforme procedimento descrito no item “Densidade no Dente”. O resultado da densidade encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7: Densidade do dente (Dpo) da engrenagem sinterizada em 06 amostras de duas engrenagens diferentes.

Amostra	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	Dpo (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,110	0,170	6,53
2	1,048	0,160	6,55
3	1,287	0,198	6,50
4	1,000	0,153	6,53
5	1,164	0,178	6,54
6	1,075	0,165	6,51

A Tabela 8 mostra a análise da densidade de seis engrenagens cônicas após a sinterização.

Tabela 8: Densidade da engrenagem sinterizada (DS).

Amostra	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	DS (g/cm <sup>3</sup> )
1	42,092	6,190	6,80
2	42,024	6,171	6,81
3	41,928	6,175	6,79
4	42,024	6,180	6,80
5	42,119	6,185	6,81
6	42,106	6,174	6,82

A diferença entre os valores nas tabelas 7 e 8 é causada pela geometria peculiar da engrenagem cônica, como mostrado na Figura 35 a região (B) em vermelho é a área onde à uma maior densidade na peça devido ao grande volume de pó deslocado no momento da compactação e em contra partida a região (A) em amarelo mostra a área com menor densidade o que foi

amenizado com a aplicação de um punção superior com um sistema de flutuação.

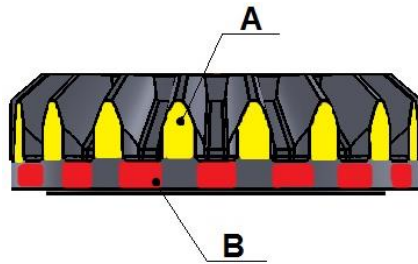


Figura 35: Variação de densidade na engrenagem cônica.

## 5.2 Análise Metalográfica

A metalografia como comentado anteriormente é uma ferramenta importantíssima no controle da microestrutura dos materiais sinterizados no processo de metalurgia do pó, que consiste na preparação adequada do material que será analisado com o uso de microscópios óticos ou eletrônicos, para observar a os detalhes do mecanismo de sinterização ou analisar falhas e desvios de especificação do material. Como mostra a Figura 36 a presença de fase líquida o que aumenta a taxa de sinterização, isso resulta em uma esferoidização dos poros. Na mesma Figura 36 é revelado a presença de poros 1; e 2 a matriz metálica.

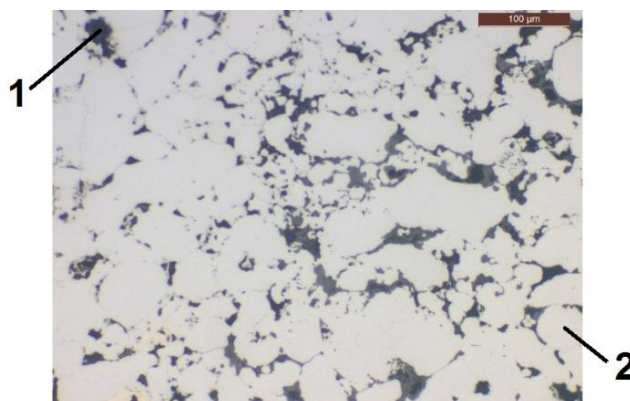


Figura 36: Microestrutura do Distaloy AB sem ataque (200x).

A Figura 37 mostra a metalografia do Distaloy® AB misturado com 0,5% de C, onde é possível observar alguns pontos pretos denominados de poros.

Nas áreas cinzentas observa-se a perlita. As regiões marrom é a martensita rico em cobre e níquel, e as áreas brancas são Austenita.

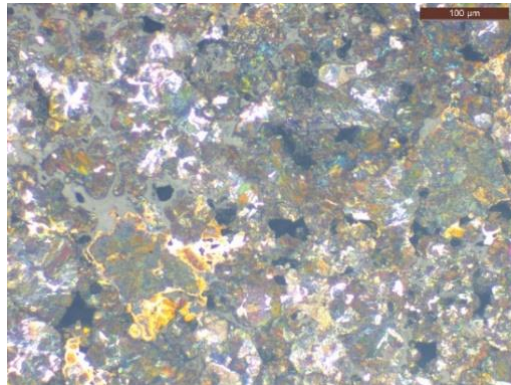


Figura 37: Microestrutura do Distaloy AB com ataque de Nital (200x).

### 5.3 Análise Dimensional

A medição da parte interna da engrenagem tem como objetivo comprovar as folgas entre os componentes: eixo e engrenagem cônica. Essa medição tem grande importância, para que no momento da montagem as especificações estejam de acordo com a norma do sistema de tolerâncias e ajustes, permitindo assim o perfeito funcionamento do conjunto. Utilizou-se de um equipamento tridimensional, marca TESA e modelo Micro-hite 3D, com precisão de  $\pm 0,002$  mm.

Foi realizada a medição do diâmetro interno em 24 amostras divididas em 3 grupos:

- Engrenagem compactada: 8 peças;
- Engrenagem sinterizada: 8 peças;
- Engrenagem calibrada: 8 peças.

A importância do ajuste na montagem entre os componentes (eixo e engrenagem) garante o desempenho de suas funções, assim a precisão no diâmetro interno da engrenagem não deve ultrapassar o limite de tolerância estabelecido no projeto, ou seja, 29,90 (+0; - 0,03), mostrado na Figura 38.

Para avaliar o dimensional da engrenagem cônica sinterizada as Tabelas (11,12 e 13), mostram o comportamento nas diferentes etapas de produção: Compactada; Sinterizada e Calibrada.

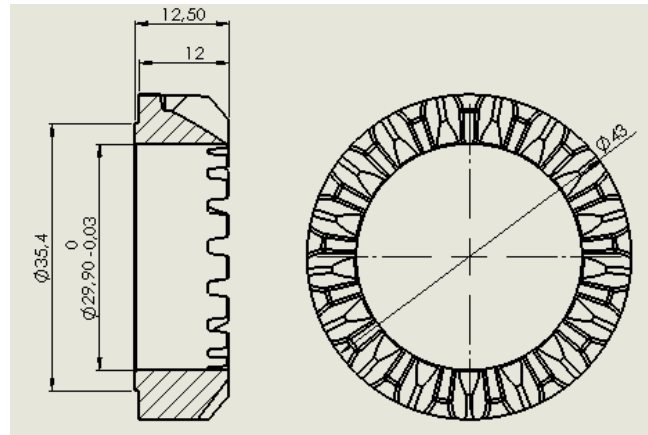


Figura 38: Desenho da engrenagem cônica sinterizada.

O diâmetro interno da engrenagem foi o alvo da análise do comportamento da variação nos processos de compactação, sinterização e calibragem. A Tabela 9 mostra a dimensão do diâmetro interno da peça em milímetros após a compactação (peça à verde).

Tabela 9: Dimensão do diâmetro interno ( $\text{Ø}29,90\text{mm}$ ) da engrenagem compactada (peça à verde).

Nº de Amostra	$\text{Ø}$ Interno (mm)
1	29,998
2	30,006
3	30,080
4	30,073
5	30,081
6	30,079
7	30,080
8	30,002

A sinterização é a etapa após a compactação do componente, esta fase foi executada seguindo os parâmetros descritos no item 4.3 “Procedimento de Sinterização”. Após a sinterização foi executada uma nova coleta de dados

com a medição do diâmetro interno, como mostrado na Tabela 10, utilizando-se do equipamento de medição tridimensional, marca TESA e modelo Micro-hite 3D.

Tabela 10: Dimensão do diâmetro interno ( $\varnothing 29,90\text{mm}$ ) da engrenagem sinterizada.

Amostra	$\varnothing$ Interno (mm)
1	29,873
2	30,007
3	29,984
4	30,007
5	29,999
6	29,882
7	29,986
8	29,990

A Tabela 10 mostra o valor de  $\varnothing 29,873\text{mm}$  como a menor medida e o  $\varnothing 30,007\text{mm}$  como a maior medida encontradas nas amostras, esta variação de  $0,134\text{mm}$  tem como o principal motivo o equipamento utilizado para coleta de dados que despreza a ovalização da engrenagem na etapa de sinterização.

Tabela 11: Dimensional do diâmetro interno ( $\varnothing 29,90\text{mm}$ ) da engrenagem após a etapa de calibragem.

Amostra	$\varnothing$ Interno (mm)
1	29,870
2	29,883
3	29,900
4	29,870
5	29,878
6	29,874
7	29,893
8	29,875

## 5.4 Dureza

A dureza de uma estrutura composta de pós metálicos no estado pós-sinterização é avaliada em função da sua densidade, composição química e microestrutura. Em função de seus poros residuais existentes em componentes sinterizados, o valor da dureza medida é referido como dureza aparente. Para peças sinterizadas os teste de dureza utilizados são Brinell, Rockell Superficial e Vickers. Neste estudo foi utilizado um durômetro de marca Digimess e as amostras foram submetidas ao ensaio de dureza aparente HRB, em oito peças e seis medições diretamente nos dentes da engrenagem com três ensaios em cada amostra como mostrado nas Tabelas 12 e 13. A Figura 39 mostra uma das posições utilizadas para aplicar o penetrador de esfera no ensaio de dureza executado na engrenagem cônica. Na Tabela 12 são apresentados os resultados desta medição.

Na Tabela 12 mostra o ensaio de dureza aparente em 8 amostras sendo executado na posição oposta aos dentes como mostrado na Figura 39.

Tabela 12: Ensaio de dureza.

Ensaio de Dureza (HRB)				
Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
1	70	73	71	71,3
2	74	73	68	71,6
3	72	74	74	73,3
4	72	73	69	72,3
5	70	74	73	72,3
6	75	76	74	75,0
7	73	73	75	73,6
8	69	72	71	70.6



A Tabela 12 mostra uma variação média entre as amostras na dureza de 72,5 HRB com um desvio padrão de 1, 41 HRB, esta variante é ocasionado pela presença dos poros.

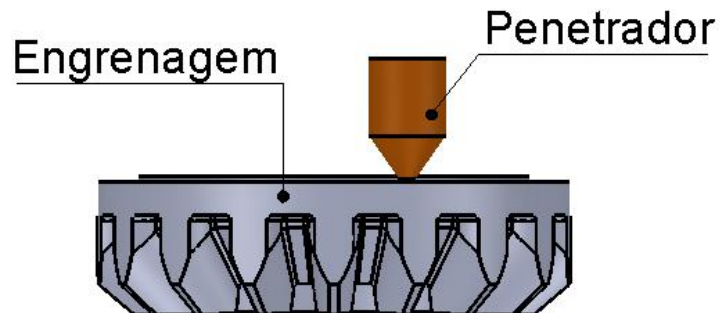


Figura 39: Posição do penetrador na peça para medição de dureza.

A tabela 13 mostra os resultados dos ensaios obtidos na posição como mostrado na Figura 34.

Tabela 13: Ensaio de dureza no dente da engrenagem.

Ensaio de Dureza no Dente (HRB)				
Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
1	58	59	58	58,3
2	60	59	58	59,0
3	60	59	58	59,0
4	60	59	58	59,0
5	60	59	58	59,0
6	60	59	58	59,0
7	62	63	62	62,3
8	57	59	58	58,0

A Figura 40 mostra a posição da ponteira do durômetro no ensaio de dureza aparente sendo executado no dente da engrenagem cônica.

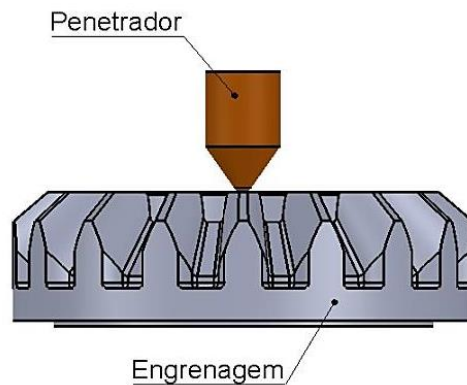


Figura 40: Posição do ensaio de dureza no dente.

A Tabela 13 mostra uma variação média entre as amostras na dureza de 59,2 HRB com um desvio padrão de 0,50 HRB, esta variante é ocasionado pela presença dos poros.

A diferença entre os valores de dureza nas tabelas 12 e 13 está relacionada a variação de densidade observado nas tabelas 9 e 10 e explicado anteriormente.

### 5.5 Custo de Produção da Engrenagem Sinterizada e Usinada.

A Tabela 14 mostra a relação entre a produção de um lote de 2.000 peças/mês fabricadas por usinagem convencional e comparando-a com o processo de metalurgia do pó. Uma das dificuldades na alteração de processo de usinagem para MP está no investimento inicial do ferramental para desenvolvimento de um novo produto. A Tabela 14 mostra o valor do ferramental para compactação da peça para o estudo deste trabalho.

Tabela 14: Custo de produção da engrenagem sinterizada e a usinada.

Processo	Produto	Quantidade/ mês	Valor Unitário (R\$)	Valor total por lote (R\$)
Usinagem	Engrenagem	2000	37,50	75.000,00
MP	Engrenagem	2000	3,20	6.400,00
	Ferramental	-	15.000,00	15.000,00

Como mostra a Tabela 14 o custo de uma peça sinterizada comparando-a com a engrenagem usinada evidencia a redução do valor unitário entre os processos, mesmo sendo contabilizando o custo do ferramental.

Entre os valores apresentados na Tabela 14 referentes a MP estão contabilizados custos de projeto do ferramental e desenvolvimento do mesmo, compactação das peças e sinterização. O valor unitário da engrenagem usinada apresentado está incluso custos com a usinagem e matéria prima. O projeto é viabilizado tendo referência os custos finais por peça entre os dois processos.

## 6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

### 6.1 Peça de Estudo

A engrenagem cônica tem a aplicação em dispositivos para agroindústria, tendo como função de transmitir movimentos entre os eixos concorrentes. No caso deste estudo o ângulo de intersecção utilizado foi o de 90°, sendo o ângulo mais comum para essa aplicação. A peça em estudo, mostrada na Figura 20, é utilizada para mudança de direção da força, e da rotação em velocidades baixas, sendo para seu adequado funcionamento a precisão dimensional no diâmetro interno de 29,90mm (+0; -0,03). A Figura 22 mostra o desenho da engrenagem onde foi alterada a geometria pela eliminação do ângulo de 45°, garantido a viabilidade de produção pela metalurgia do pó.

### 6.2 Compactação

Conforme a Figura 33 foi necessária à aplicação no punção superior de uma mola para deslocamento de pó durante a compactação mantendo constante a densidade dos dentes e das engrenagens como mostrado nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

### 6.3 Montagem

Conforme a Figura 30, a montagem do conjunto de engrenagens cônicas sinterizadas, no eixo ocorreu com a interferência de 0,03mm no seu diâmetro interno e aplicado um adesivo anaeróbico na área de contato entre o eixo e a engrenagem. O adesivo anaeróbico utilizado foi o Permabond HL 138, multiuso de baixa viscosidade e alto torque. A montagem utilizando o adesivo anaeróbico atendeu a exigência de montagem com interferência conforme a norma ABNT NBR 6158/1995, sistema de tolerâncias e ajustes.

### 6.4 Densidade

De acordo com as etapas de processo após a sinterização analisou-se à variação da densidade nos dentes da engrenagem. Pela análise em seis

diferentes amostras retiradas de duas engrenagens, a variação da densidade manteve-se constante em função da utilização no punção superior de uma mola em material PU. Pela Tabela 1, “requisitos para engrenagem sinterizada na aplicação de bombas de engrenagem”, as Tabelas 7 e 8 corresponderam às exigências necessárias para aplicação da mesma.

## 6.5 Análise Dimensional

Na avaliação do comportamento dimensional da engrenagem cônica sinterizada, as Tabelas (9, 10 e 11), mostram o dimensional em diferentes etapas: compactada, sinterizada e calibrada. Sendo o diâmetro interno da engrenagem o alvo de análise, o diâmetro projetado na ferramenta de calibragem foi de 30mm. A Tabela 10 mostra a dimensão interna da peça em milímetros após a compactação. Após a sinterização, foi executado uma nova coleta de dados com a medição do diâmetro interno mostrado na Tabela 11. Para garantir a tolerância no diâmetro interno de (+0; - 0.03mm), foi necessário conformar a peça em uma matriz fechada (calibragem), no caso deste estudo optou-se em utilizar uma matriz (calibrador) garantindo as especificações de ajuste H7, conforme a norma ABNT NBR 6158/1995, sistema de tolerâncias e ajustes.

## 6.7 Dureza

Foram submetidas ao ensaio de dureza HRB, 08 peças e três ensaios de dureza em cada amostra, como mostra as Tabelas 12 e 13. Os resultados encontrados para o material estudado e sua aplicação atenderam as exigências da Tabela 1 e as especificações do fabricante da matéria prima.

## 6.8 Custo

A diferença no custo para produção das peças entre os processos de usinagem e metalurgia do pó viabiliza o investimento do ferramental necessário para a produção de uma engrenagem sinterizada. A amortização no investimento do ferramental ocorre no primeiro lote produzido por MP (engrenagem cônica sinterizada), como mostra a Tabela 14.

## 7 CONCLUSÕES

Na primeira etapa do desenvolvimento, analisou-se a extração da peça após a compactação, tendo como base os movimentos disponíveis da prensa, assim concluiu-se que para este projeto os dentes da engrenagem devem estar voltados para cima. Optou-se em aplicar no punção superior o duplo movimento, acrescentando neste sistema uma maior uniformidade do pó dentro da cavidade (matriz), proporcionando maior homogeneização na densidade à verde e na redução de trincas. O efeito do duplo movimento dos punções foi observado pela análise da dureza e densidade.

Na segunda etapa do desenvolvimento do projeto, constatou-se a geometria desfavorável à compactação do componente, tendo à ênfase a adaptação da engrenagem de usinada para MP. Concluiu-se, da necessidade de mudança na geometria da peça eliminando o chanfro de 45°. Todas as alterações não comprometeram a funcionalidade da engrenagem.

A densidade do dente da engrenagem de 6,53 g/cm<sup>3</sup>, observada na tabela 7, não comprometeu o funcionamento do componente devido aos baixos níveis de esforços na sua aplicação, parâmetro observado na tabela 1.

Após a sinterização a variação no diâmetro interno da engrenagem de 0,134mm dificultou o ajuste de montagem por interferência, tendo como necessidade o processo complementar de calibragem, obtendo assim a variação na tolerância de (+0; -0,03mm).

Após comparação dos processos, metalurgia do pó e usinagem, a massa final da engrenagem sinterizada ficou maior a usinada, devido às necessárias mudanças de geometria para sua produção.

## 8 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

-Desenvolvimento da liga Fe-1,75Ni-1,5Cu-0,5Mo-0,5C a partir de pós elementares comparando-a com a liga Distaloy AB na produção de engrenagens sinterizadas;

-Desenvolvimento de ligas de base cobre para produção de engrenagens sinterizadas de baixa rotação;

-Estudo para produção de engrenagens helicoidais sinterizadas: Ferramental de compactação;

-Desenvolvimento de testes de torque para engrenagens sinterizadas;

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]<https://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepointdocuments/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/HighLoadCarryingPMGears.pdf>. acesso 15 de maio de 2015.
- [2]Chiaverini, V.; **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos**. 4. Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.
- [3]<http://www.roxxor.com.br/nossos-servicos>, acesso 18 de outubro de 2016.
- [4] Bittencourt.D.S.; **Características de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleo de máquinas elétricas rotativas**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPG3M, Porto Alegre 2012. Dissertação de Mestrado.
- [5]<http://cursos.unisanta.br/mecanica/polari/sinterizacao.html>, acesso 7 de outubro de 2015.
- [6]**Powder Metal Technologies and Applications**, Handbook. Vol. 7. ASM International. 2000, p. 2631-2640.
- [7]Pauletti, P., **Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Indução Trifásico com Núcleo Produzido via Metalurgia do Pó**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPG3M, Porto Alegre 2012. Dissertação de Mestrado.
- [8]Grupo Setorial de Metalurgia do Pó; **A Metalurgia Do Pó: Alternativa Econômica Com Menor Impacto Ambiental**. 1ª Edição São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. 320 P.
- [9] Ferreira, A. C., **Desenvolvimento de Núcleos para Transformadores Monofásicos de Baixa Potência pela Metalurgia do Pó**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPG3M, Porto Alegre 2011. Dissertação de Mestrado.
- [10]<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/1999/pdf/aaeaia.pdf>  
Acesso 22 de agosto de 2014.
- [11]<http://artenarede.com.br/blog/index.php/tag/leonardo-da-vinci/> Acesso em: 24 de maio de 2015.
- [12]Júnior, A. A. D. S.; **Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos**, Apostila para os Cursos: Sistemas Mecânicos Elementos de Máquinas, Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas, Fevereiro de 2003.



[13]Franceschi, A., Antonello, M. G.; **Elementos de Máquinas**, Colégio Técnico Industrial, Santa Maria – RS 2014

[14]Martinez, J. A. B.; **Comparação da Resistência ao Desgaste por Fadiga de Contato de Engrenagens Fabricadas em Aço AISI 4140 e Ferro Fundido Nodular Austemperado**, UTFPR - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais PPGEM, Curitiba 2011. Dissertação de Mestrado

[15][http://www.brassinter.com.br/pecas\\_sinterizadas.htm](http://www.brassinter.com.br/pecas_sinterizadas.htm) Acesso em 04 de maio de 2017.

[16]**Powder Metal Technologies and Applications**, Handbook. Vol. 7. ASM International. 2000, p. 2631-2640.

[17][http://digital.bnppmedia.com/display\\_article.php?id=1181347](http://digital.bnppmedia.com/display_article.php?id=1181347) acesso 11 de junho de 2015.

[18]Sigl, L. S., Rau, G., Dennert, C., **When the going gets tough PM gears can cope**, Metal Powder Report, Austria, Nov 2007.

[19]Whittaker, D.; **Powder metallurgy for gear production: current status and potential future trends**, Technical Reports, Materials & Design Vol. 12 No. 2 Abril 1991

[20]Lindskog, P.; **The history of Distaloy**, Powder Metallurgy, Dez 2013. <http://dx.doi.org/10.1179/1743290113Y.0000000077>

[21]<https://www.hoganas.com/pt-BR/business-areas/sintered-components/products/low-alloyed-steel-powders/distaloy-aq/>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017

[22][http://www.hipih.com/cgishl/DC\\_Show\\_File.exe?fileId=2257&btnId=0&isWebSiteItem=1&save=0](http://www.hipih.com/cgishl/DC_Show_File.exe?fileId=2257&btnId=0&isWebSiteItem=1&save=0). Acesso em: 16 de novembro de 2016.

[23]<http://revistaih.com.br/metalografia-aplicada-a-sinterizados-parte-i/>. Acesso em: 22 de março de 2017.

[24] **Metallography**, Höganäs Handbook for Sintered componentes. 2015, p. 10-97.

[25] Bueno, A.; Schaeffer, L.; **Materiais e tratamentos superficiais aplicados à ferramentas para metalurgia do pó**. Anais da 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó. Porto Alegre, RS. 2010. Brasil.

[26] [www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6399-selecao-de-acos-para-ferramentas-e-matrizes](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6399-selecao-de-acos-para-ferramentas-e-matrizes). Acesso 03 de julho de 2012.


[27] <http://www.mpif.org/IntroPM/PDFs/PM-Intrinsically-Sustainable.pdf> acesso 15 de agosto de 2015.

[28] Pallini, M. A. T., Carvalho, M. A. T.; **Cost reduction in the Automotive Industry through Sintering**, 2006-01-2585, Society of Automotive Engineers, 2006.

[29] **Material and Powder Properties**, Höganäs Handbook for Sintered componentes. 2013, p. 30-97.

[30] <https://grabcad.com/library/redutor-de-engrenagens-conicas-e-helicoidais-1>. Acesso 29.04.2017.

ANEXO A – Certificado de análise de pó de ferro DISTALOY AB

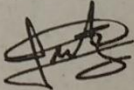
<b>Höganäs</b> 		<b>CERTIFICADO DE ANALISE</b>		Pág.: 1(1)
Nome do Item <b>Distaloy AB</b>		Nr lote 2038968	DI impressão 2015-11-19	
Código Produto 027537		Nr pedido 0010293542	Entrega 1768929	Expedição 3293591
		Cliente BRUTT IND METALURGICA LTDA RUA MAURICIO SIROTSKI DISTRITO INDUSTRIAL CACHOEIRINHA RIO GRANDE DO SUL		92411
Quantidade 1,00	Kg	Nossa Referência	Data produção 2015-06-04	Qtd produzida Kg

	Resultados dos Testes Unid	Especificação MIN      MAX	
<b>PROPRIEDADES QUÍMICAS</b>			
Níquel	1.74 %	1.60	1.90 %
Cu	1.47 %	1.40	1.60 %
Molibdenio	0.50 %	0.47	0.53 %
C	0.00 %		0.01 %
Oxigênio Total	0.10 %		0.12 %
Fe é Base			
<b>PROPRIEDADES FISICAS</b>			
Densidade Aparente	3.08 g/cm3	2.97	3.12 g/cm3
Escoamento	26 sec/50g		30 sec/50g
Compressibilidade (600MPa)	7.19 g/cm3	7.10	
<b>GRANULOMETRIA</b>			
(Microns)			
+212	0.0 %		0.0 %
180-212	1.3 %		2.0 %
150-180	4.6 %		bal %
150-212	5.9 %		12.0 %
106-150	18.2 %		bal %
75-106	21.2 %		bal %
45-75	28.3 %		bal %
-45	26.4 %	10.0	30.0 %

Aprovado por

  
 Quality Control Manager

BR1 Inspection certificate  
EN 10 204 3.1

COMMS-480AH-A4

2015-11-19 11:13:29

Fonte: Höganäs do Brasil

ANEXO B – Certificado de análise grafite UF4



CERTIFICADO DE ANALISE

Pág.: 1(1)

Nr lote 1391909 Dt impressão 2013-02-22  
 Nr pedido 0010161053 Entrega 1416715 Expedição 3150457

Nome do item  
 GRAFITE UF4  
 Código Produto  
 079756  
 GRAFITE UF4  
 GRAFITE UF4

Cliente  
 ARON METAL LTDA  
 R A  
 PQ.AGRO INDL IGARA

21191

Quantidade 30,000 Kg  
 Nossa Referência

CANOAS  
 Data produção 2012-07-30  
 Qtd produzida Kg

	Resultados dos Testes Unid	Especificação	
		MIN	MAX
<b>PROPRIEDADES QUÍMICAS</b>			
Umidade	0.09 %		0.20 %
Cinzas	3.5 %		4.0 %
C	96.5 %	96.0	
S	0.07 %		0.20 %
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>			
10% Abaixo (Sympatec)	2.5 Micron		3.0 Micron
50% Abaixo (Sympatec)	6.0 Micron	5.5	7.0 Micron
90% Abaixo (Sympatec)	11.8 Micron		13.0 Micron

Aprovado por

Quality Control Manager

13:56:11

Inspection certificate  
 EN 10 204 3.1

Fonte: Höganäs do Brasil

## ANEXO C – Orçamento Usinagem Engrenagem Cônica



**FREZAOL-ENGRENAGENS**

## ORÇAMENTO

Nº 148-16

DATA: 3 março, 2016

FORNECEDOR: **ENGRENAGENS**  
 RUA: **ENGRENAGENS**  
 FONE: (51) 3268-**ENGRENAGENS**  
 CEL: (51) 8421-**ENGRENAGENS**  
 CEP: **ENGRENAGENS**  
 PORTO ALEGRE-RS

CLIENTE: **MAURICIO**  
 AV:  
 FONE:  
 CEL:  
 CEP:

PAGAMENTO	FORMA/PAGA	TERMOS	ENTREGA	A/C	VALIDADE/ORÇA
DOC	28DIAS	EMAIL	15DIAS UTEIS	MAURICIO	05DIAS

QUANTIDADE	DESCRIÇÃO	PREÇO UNITÁRIO	TOTAL
200	ENGRENAGEM CÔNICA Z17-M2,5- AP20º SAE1045 "SEM TRATAMENTO TÉRMICO" "DENTES RETOS" CASO APROVADO : 25% DO VALOR PARA INICIO DA FABRICAÇÃO	R\$ 48,00	\$ 9.600,00

<b>VALOR TOTAL:SERÁ O VALOR DA NF E DE COBRANÇA</b>	SUBTOTAL	\$ 9.600,00
	PORCENTAGEM DE TRIBUTAÇÃO	8,60%
	IMPOSTO SOBRE SERVIÇO	825,60
	ENVIO E MANIPULAÇÃO	
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 10.425,60</b>

PRAZO PARA ENTREGA: CONTA APARTIR RECEBIMENTO DO MATERIAL E A CONFIRMAÇÃO DO CLIENTE.  
 Se você tiver qualquer dúvida sobre este ORÇAMENTO, entre em contato com Nome, Telefone, Endereço eletrônico.

"OBRIGADO POR SUA CONFIANÇA"



ANEXO E – Orçamento Engrenagem Cônica Sinterizada

**PROPOSTA COMERCIAL**

**Processo de Sinterização**

Sr. Mauricio Santos

Segue proposta comercial:

Descrição do Produto Peças em Ferro/Aço	Volume Peça /mês	Preço Unitário com Impostos S/IFI R\$	Ferramental S/Imposto R\$
	2.000	3,20	15.000,00

CTT= Sem Tratamento térmico.

Observações comerciais da peça:

- Preços com impostos SIMPLES NACIONAL.
- Condição de Pagamento: 28 dias da emissão da NF
- Frete Por conta do cliente
- Preço está relacionado ao volume/mês de peças.
- Prazo de entrega de amostras: 30 a 50 dias após a solicitação do cliente.
- Prazo de entrega do primeiro lote de produção: 20 dias após a homologação das amostras.

Observações comerciais do Ferramental:

- Preço do Ferramental sem impostos, condição de pagamento.

No pedido 50% + 30 e 60 dias. Prazo de confecção do ferramental: 25 a 40 dias

Desde já agradeço a sua gentileza e coloco-me a sua inteira disposição caso houver qualquer dúvida.

Atenciosamente,

Data: 21/03/2016.

████████████████████

Diretor 51-8491/██████

www.██████████.com.br