

2172351

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO MECÂNICO

PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UMA ENGRANAGEM HELICOIDAL
PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ.

Autor: ERNESTO BERL
Orientador:
Dr. ETTORE BRESCIANI FILHO

1984

Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar aqui meu agradecimento às seguintes pessoas:

- Ao Professor Ettore pela sua ajuda e grande paciência.
- Aos meus amigos da COFAP, em especial Dilson e Roberto, que muito contribuíram para realizar este trabalho.
- A Helga e Horst, meus pais, por tudo que fizeram por mim até hoje.

Ernesto Berl

ÍNDICE

SUMÁRIO

	PÁGINA
1. Introdução	1
2. Escolha de Material para a Fabricação de Engrenagem	2
3. Tolerâncias de Engrenagem Sinterizadas	5
4. O Projeto de uma Ferramenta de Compactação	7
4.1. Altura Teórica de Enchimento e a Possibilidade de Corrigí-la	9
4.2. Descrição de Ferramenta Utilizada e Padronizada neste Projeto e de seu Funcionamento	10
5. Aspectos Construtivos do Ferramental	15
5.1. Considerações Técnicas	15
5.1.1. Montagem na Matriz de Metal Duro	15
5.1.2. Fabricação e Fixação dos Punções	16
5.1.3. Deflexões	17
5.2. Materiais Utilizados nas Ferramentas	20
5.2.1. Materiais para Matrizes	20
5.2.2. Materiais para Machos	20
5.2.3. Materiais para Punções	21
5.2.4. Materiais para os Suportes Adaptadores	21
5.3. Detalhes referentes ao projeto de Sub Conjuntos da Ferramenta Padronizada	21
5.3.1. Sub Conjunto do Mancal Flutuante do Punção Superior ..	21
5.3.2. Roscas Utilizadas na Regulagem das Ferramentas	24
5.3.3. Dispositivo de Vedação da Entrada de pó nos Rolamentos na Matriz	24
5.4. Folgas entre Punções e Matriz	25
6. A Padronização do Projeto da Ferramenta de Compactação de uma Peça Sinterizada	27
7. Cálculos para o Projeto Padronizado do Ferramental de Compactação de Engrenagens Helicoidais	28
8. Projeto de uma Ferramenta para a Engrenagem Helicoidal da Página 50	37
9. Processos de Fabricação do Ferramental	41

10.	Controle de Qualidade	43
11.	Bibliografia	45

ANEXO I - Desenhos

ANEXO II - Programa

ANEXO III - Introdução à Metalurgia do Pó

SUMÁRIO

O presente projeto refere-se à produção de uma engrenagem helicoidal pelo método da metalurgia do pó. (M/P)

São confrontados os diversos métodos de fabricação de engrenagem e dá-se uma noção de como são as propriedades das mesmas sinterizadas.

Existe uma ênfase especial no projeto e fabricação de uma ferramenta de compactar peças no que se refere à padronização, cálculos automatizados, materiais usados e procedimento de uma ferramentaria. Tais assuntos constituem alta tecnologia e são pouquíssimas as obras que abordam o assunto.

Por fim, o leitor que não tiver maiores conhecimentos do assunto dispõe de uma leitura introdutória à metalurgia do pó, que está no apêndice.

1 - INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó é um método flexível para se fabricar engrenagens. Pode-se fabricar engrenagens dos mais variados tipos, dentre as quais se destacam as engrenagens helicoidais com resistências até 120 Kgf/mm².

As aplicações são encontradas pelas indústrias de eletrodomésticos, automóveis, máquinas de escritório, ferramentas de potência, transmissões e equipamento agrícola. A aplicação mostra vantagens evidentes no caso da engrenagem possuir de pressões, furos passantes, níveis ou projeções.

No entanto, existe uma limitação quanto ao ângulo de hélice, que não deve exceder a 35° (segundo bibliografias consultadas) pois caso contrário o atrito dos punções na parede da matriz de compactação aumenta demais, quebrando a própria ferramenta.

2 - ESCOLHA DE MATERIAL PARA A FABRICAÇÃO DE ENGRANAGEM

A escolha de uma liga M/P é baseada na magnitude e natureza da carga transmitida, na velocidade, vida estimada, e pelo meio circundante, tipo de lubrificação e pela precisão de montagem da engrenagem.

A maioria das engrenagens helicoidais de M/P tem um desempenho limitado quanto às resistências ao impacto ou à fadiga, compensado pelo limite de resistência à compressão e durabilidade superficial.

Quando se seleciona o material para engrenagem primeiro procura-se quais as ligas de metalurgia do pó que tem a resistência necessária.

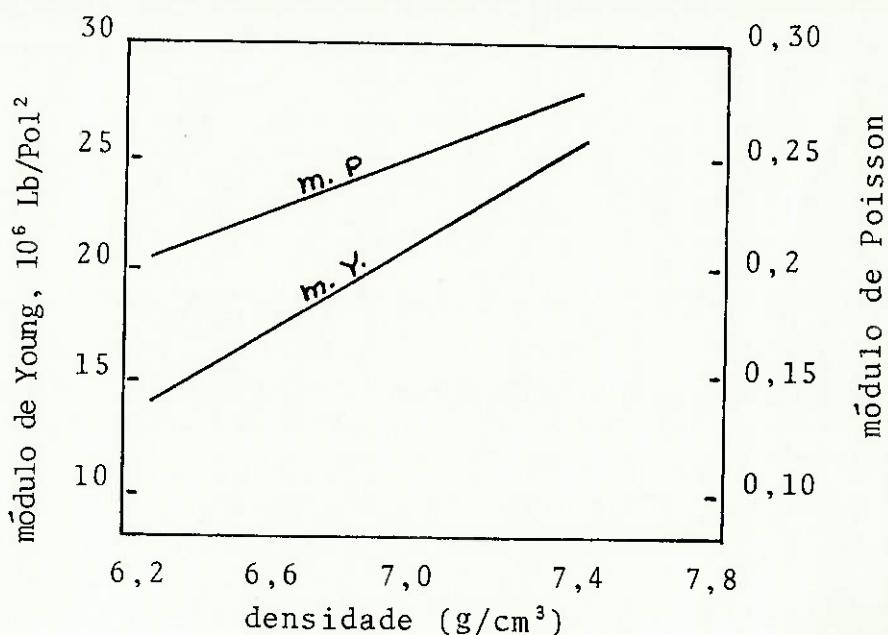
A resistência à tração de vários materiais sintetizados é listada na norma MPIF nº 35 (METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION). Cada fabricante de sinterizadas possui seus próprios dados de acordo com os equipamentos que possui, mas adotaremos aqui os valores (típicos) da norma citada.

Assumido que o material tenha resistência suficiente para aguentar os cárregamentos deformantes, deve-se calcular a durabilidade do dente da engrenagem. Uma boa aproximação é obtida pela norma AGMA para a durabilidade de dentes helicoidais (AGMA 21102, Fev. 1969).

Os valores da resistência à tração, do módulo de elasticidade e do índice de Poisson da maioria dos materiais ferrosos de M/P são abrangidos pela norma MP/F nº 35. Na ausência de dados, a tensão de contato permissível pode ser aproximada nos materiais ferrosos sinterizados, sustentando-se 7 N/mm² da resistência à tração.

Na ausência de dados sobre o índice de Poisson, os valores para os materiais ferrosos sinterizados são

proporcionais à densidade (ferro sem liga ou trat. term.) e podem ser vistos na fig. (1) abaixo.



Acrescentando, deve-se tomar cuidado com o problema de riscagem numa montagem de engrenagem (para melhor resistência e durabilidade). Mesmo com rolamento sobre en volvente, existem imprecisões que provocam escorregamento superficial do dente na engrenagem.

Assim, deve-se usar materiais de durezas compatíveis.

Deve-se considerar ainda a densidade da engrenagem helicoidal, que além de definir suas propriedades físicas, pode definir as propriedades únicas do metal poroso que são particularmente importantes quando:

- se deseja que o próprio cubo da engrenagem seja um mancal poroso auto lubrificante. Neste caso pode-se mexer os punções durante a compactação do pó de modo a deixar o cubo menos denso (mais poroso) e os dentes mais densos (maior resistência).

b) se deseja infiltrar os dentes com cobre fundido, para aumentar a resistência dos mesmos. Tal infiltração pode ser realizada no próprio forno de sinterização (o pó de cobre é depositado sobre a região de interesse da engrenagem (sobre os dentes) antes da entrada desta no forno.

Este método só pode ocorrer em peças com densidades baixas (5 até 6,0 g/cm³).

c) se deseja propriedade de camada nos dentes como carbonetização por exemplo. Neste caso a densidade deve ser alta (acima de 7,1 g/cm³) para evitar que o gás penetre na porosidade interligada e endureça a parte interna da peça.

3 - TOLERÂNCIAS DE ENGRANAGENS SINTERIZADAS

As tolerâncias para engrenagens de metalurgia do pó são determinadas pelo ferramental de compactação, pelo processo de compactação, técnicas de sinterização e pelas ligas. As tolerâncias são subdivididas em tolerâncias funcionais, que afetam diretamente o funcionamento da engrenagem, não funcionais, que são relativas aos elementos da engrenagem que se correlacionam genericamente com os detalhes de projeto das máquinas (proporções do cubo, rasgos de chaveta, furos passantes etc.). Estas últimas discutidas para a engrenagem escolhida para o trabalho.

As tolerâncias funcionais para engrenagem são primeiramente controladas pelo ferramental de compactação, e a seguir pelo método de processo e pelo material da engrenagem. Como as engrenagens em M/P (metalurgia do pó) são compactadas em matrizes de metal duro, a forma e dimensão dos dentes permanecem relativamente estáveis e constantes durante o processo. As concentricidade do diâmetro externo da engrenagem e do círculo primitivo ao orifício do eixo, são controladas pelo ferramental. Se os machos ou punções estiverem excêntricos com relação a matriz, as peças serão excêntricas.

Uma vez que a peça foi compactada, as características do material e o processo de sinterização irão determinar as possíveis tolerâncias dimensionais do diâmetro externo, do diâmetro do orifício do eixo.

Como inúmeras variáveis se relacionam ao processo da M/P, torna-se impossível estabelecer as tolerâncias dimensionais disponíveis. No entanto as tolerâncias mínimas que se podem esperar para engrenagens ferrosas helicoidais de M/P sem operações secundárias estão listadas abaixo (Tabela I).

T A B E L A I:

Tolerância composta dente a dente	Classe 6 (AGMA)
Tolerância composta total	Classe 6 (AGMA)
Teste radial	$(0,05\text{mm}) + (0,05\text{mm}) \times (\text{diâmetro})$
Teste sobre pinos	$(0,1 \text{ mm}) + (0,05\text{mm}) \times (\text{diâmetro})$
Erro de folga	0,025 mm/mm
Perpendicularidade ao orifício do eixo	$(0,05\text{mm}) + (0,025\text{mm}) \times (\text{diâmetro})$
Paralelismo	$(0,025\text{mm}) \times (0,025\text{mm}) \times (\text{diâmetro})$
Diâmetro externo	$(0,1 \text{ mm}) \times (0,05\text{mm}) \times (\text{diâmetro})$
Tolerância no perfil	0,075 mm

As operações secundárias devem ser empregadas para melhorar as características dimensionais da peça após a sinterização.

Tais operações incluem a cunhagem e calibração em moldes fechados onde se atingem precisões IT9 a IT6 podendo fazer-se também retífica ou lapidação de superfície.

4 - O PROJETO DE UMA FERRAMENTA DE COMPACTAÇÃO

A etapa inicial da fabricação de uma peça na metalurgia do pó situa-se no laboratório. Com os dados fornecidos para a peça desenvolve-se um material (caso este não tenha sido desenvolvido anteriormente). Desenvolver um material significa achar uma mistura de componentes entre pós de ferro, pós formadores de liga e lubrificantes que de acordo com as matérias primas e equipamentos utilizados pela firma, atendam aos requisitos da peça.

As propriedades físicas do material sinterizado dependem principalmente da densidade. Os fatores principais que influenciam a densidade serão discutidos aqui. São eles:

- PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO: aumentando a pressão de compactação haverá um aumento da densidade numa razão inversamente exponencial.

- ALTURA DE ENCHIMENTO: em uma peça com área de compressão e pressão constante a densidade diminui com o aumento da altura de enchimento. Diminui também ao longo da linha de transmissão da carga na peça até as zonas onde o pó se desloca menos em relação a cavidade da matriz. Isto se deve ao fato de o atrito ser maior quando o pó está estático, o que impede a transmissão das forças de compressão. Este fato causa frequentemente o aparecimento de uma região onde a densidade é muito baixa na peça que é a zona neutra. Na zona neutra, onde os esforços de punções opostos estão em equilíbrio, o pó praticamente não se movimenta enfraquecendo a peça devido à baixa densidade que aí se localiza.

- FORMATO DO GRÃO E SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA: estes fatores influenciam a densidade que pode ser obtida a uma certa pressão. Um pó grosseiro e extremamente irregular aumenta consideravelmente a fricção e a carga de defor

mação resultando em uma grande porosidade. Por sua vez os pós finos resultam em poros finos mas a porosidade total pode ser ainda maior.

Geralmente usa-se pós com diferentes estruturas e tamanhos, o que geralmente conduz a melhores valores de resistência e densidade.

- LUBRIFICANTES: como parte da pressão requerida na compactação é absorvida pelo atrito durante a compactação, sugere-se utilização de lubrificantes para reduzir a fricção. Os lubrificantes mais comuns são os estearatos metálicos e os ácidos esteáricos. A diminuição do atrito conduz a um aumento de densidade, mas o excesso de lubrificante diminui obviamente a densidade da peça como também a resistência a verde da mesma. O atrito depende tanto da área lateral da peça como do volume de pó contido na matriz.

- PARADA DE PRESSÃO: é o tempo em que a pressão total permanece aplicada sobre o pó compactado. Estas pequenas paradas aumentam consideravelmente a densidade. Isso ocorre pois em prensas muito rápidas as partículas não conseguem se acomodar e parte das mesmas se deformam elasticamente resultando um crescimento durante a extração que normalmente provoca trincas.

- SINTERIZAÇÃO: a influência da sinterização no crescimento das peças está resumida no ítem de tolerâncias no apêndice.

- FATOR DE ENCHIMENTO: o fator de enchimento é a razão entre a altura na qual o pó enche a matriz e a altura do compacto medida após sua extração da matriz.

No final, o fator de enchimento é o valor pelo qual o volume da peça deve ser multiplicado para obter-se a quantidade correta de pó necessária. Para a compactação,

a variação do volume de enchimento é considerada somente na direção vertical, isto é, altura de enchimento. Em outras palavras, este fator serve para determinar as alturas de enchimento:

$$\text{altura de enchimento} = \text{altura da peça} \times \text{fator de enchimento}$$

Uma vez que em pequenos corpos de prova o material tenha adquirido a composição, a resistência (a verde) necessárias para o seu manuseio antes da sinterização, e propriedades físicas após sinterização próximas ou acima das exigências da peça, o trabalho de desenvolvimento ainda não estará completo (as normas para os testes de resistência antes e após a sinterização de corpos de prova são ISO 3995 - 1977 e ISO 2740 - 1973).

O laboratório deverá fornecer ao setor de projetos de ferramental os dados referentes à densidade inicial do pó ao entrar na cavidade da matriz (densidade aparente) e a densidade final após a compactação (antes da sinterização). Para manter um controle sobre o processo o laboratório deverá registrar o tempo de mistura utilizado, os materiais misturados e suas granulometrias, as propriedades de escoamento do pó, as propriedades de resistência a verde e a atmosfera utilizada no forno.

4.1. Altura Teórica de Enchimento e a Possibilidade de Corrigí-la

Na seção acima, foi dito que a altura teórica de enchimento resultava da multiplicação da altura do compacto pelo fator de enchimento. Em uma mesma seção da peça, o fator de enchimento é calculado a partir da densidade final necessária e da densidade aparente do pó a ser compactado.

Com os compactos tendo seções de várias alturas ocorre frequentemente durante a compactação que algum pó (devido às suas propriedades de escoamento) venha a escoar de uma seção de enchimento para outra. Isto resulta não só na variação da densidade do compacto como também em uma com

pactação excessiva em uma das secções do compacto levando à quebra do punção inferior.

Para adquirir uma boa distribuição de densidade, isto é, densidade uniforme nas duas secções do compacto, as duas alturas de enchimento devem ser corrigidas. Mesmo com experiência suficiente na técnica de prensagem é difícil prever o grau de correção do espaço de enchimento, já que as dimensões do compacto, a pressão de compactação e as propriedades de escoamento do pó sempre impõem condições diferentes.

Assim, o ajuste final do espaço de enchimento só pode ser feito após o valor de densidade dos primeiros compactos a serem conhecidos.

Conforme acima descrito, deve ser possível ajustar as alturas de enchimento da ferramenta projetada de modo independente obtendo assim um compacto totalmente uniforme.

4.2. Descrição de Ferramenta Utilizada e Padronizada Neste Projeto e De Seu Funcionamento

Se o leitor consultar no apêndice deste trabalho o ítem referente a compactação verá uma descrição dos diversos processos de compactação de uma peça sinterizada.

Normalmente, o processo de compactação utilizado está associado às características da prensa escolhida para compactar. Existem prensas com mais ou com menos recursos, o que implica na capacidade de fabricar peças de complexidade maior ou menor.

A prensa escolhida neste trabalho é uma prensa alemã fabricada pela firma DORST. Esta prensa é de dupla ação e possui capacidade de 180 ton.. A prensa está parcialmente desenhada nas folhas 51 (Topo) e 49 sendo que

neste último desenho estão indicadas as dimensões disponíveis onde se encaixa a ferramenta. Ainda referente à última figura citada, vemos os encaixes em forma de "t" inferior a superior (27 e 28) responsáveis pela movimentação da placa de base e do punção superior (PS) respectivamente, além dos manetes (52) para prender a mesa de suporte dos punções (fixa) na carcaça da prensa (folha 51item 18).

O método de compressão utilizado é o método de retração ou seja, a extração da peça é executada pela descida da mesa da matriz (7) que está conectada por meio de colunas à placa de base (26). Este método é o mais adequado para a produção de peças que requerem múltiplos punções pois permite o ajuste correto de alturas de enchimento.

Olhando o desenho de conjunto vemos três posições básicas do processo de compressão da engrenagem helicoidal. São elas a posição de enchimento (ou alimentação), a posição de compactação e a posição de extração.

Podemos notar que os dois punções inferiores estão ambos apoiados sobre a placa de suporte dos punções (18) na posição de extração sendo que o punção interno (37) está fixado na placa e o externo (35) apoia-se sobre gavetas (39) na posição de compressão e fica suspenso da posição de enchimento. A placa de base fixa tanto o macho como também a placa da matriz, que a ela está conectada por meio de colunas (25). As colunas estão guiadas por meio de buchas na placa de suporte dos punções. A placa de base está encaixada no "t" inferior da prensa que por sua vez está parafusado por meio de porca e contra porca (vide peças 53, folha 49) no martelo inferior da prensa. Desta maneira, a placa de base transmite movimentos à matriz e ao macho desde a posição de enchimento até a posição de extração da peça (o macho está sempre no mesmo nível da matriz).

Durante um ciclo de fabricação de uma peça, a prensa inicialmente está na posição de enchimento. A sapa-

ta de alimentação (52) se desloca e permanece sobre a cavidade da matriz enchendo-a de pó. Neste instante, o martelo inferior da prensa está na sua posição mais elevada, erguendo a placa de base que por sua vez suporta a mesa da matriz e o punção inferior externo erguidos.

Esta posição é totalmente regulável pois as alturas de enchimento devem ser adaptadas a cada tipo de pó. O ajuste do enchimento sobre o punção inferior externo é feito por meio de um anel ou porca finamente regulável (41) que fica perfeitamente ajustado na posição de enchimento entre as porcas reguláveis (23 e 25). Ao girar este anel transmite-se movimento para as colunas (17) que erguem o punção inferior externo. O ajuste para o enchimento de pó que fica sobre o punção inferior interno é feito por ajuste das porcas (23 e 25) que possuem encaixes especiais para chaves de regulagem.

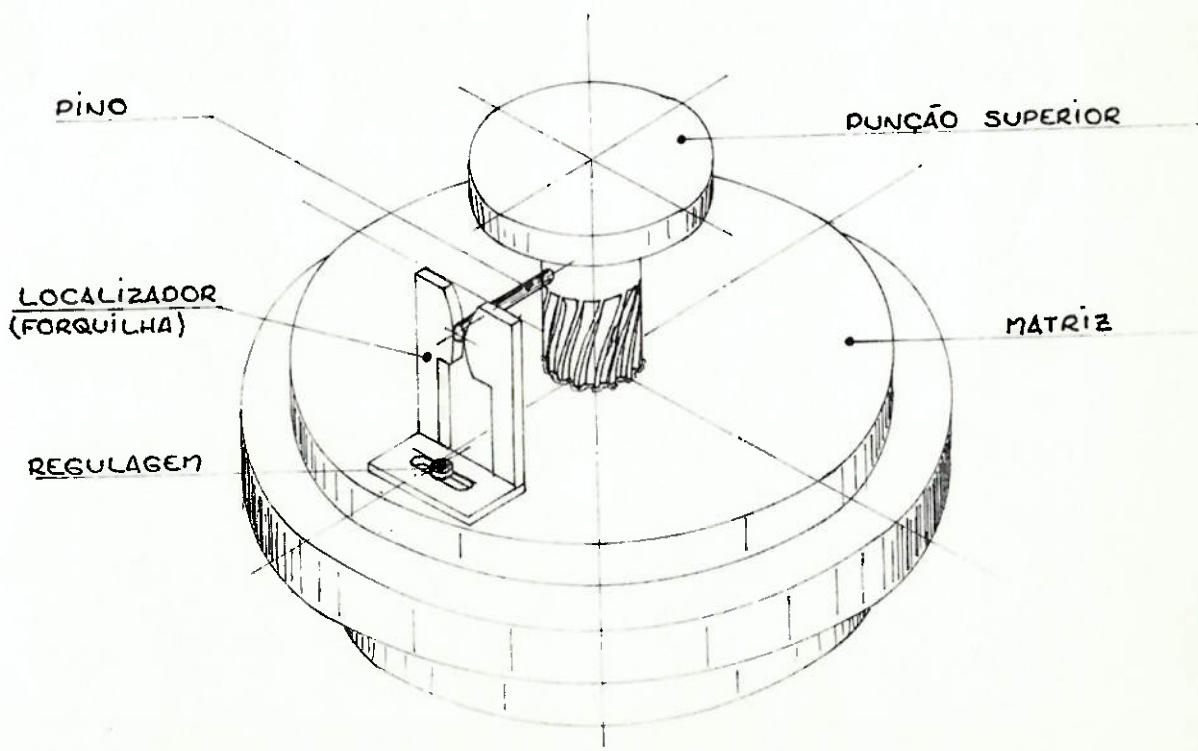
Os parafusos de ponta atuante garantem a imobilidade destas porcas uma vez que estejam reguladas.

Todo o movimento de subida da placa de base no enchimento é feito hidráulicamente por pistões e a pressão é fornecida por reservatórios elásticos de óleo (segundo manual da prensa).

Após o enchimento, a sapata de alimentação retorna à parte posterior da mesa matriz e o punção superior penetra na cavidade da matriz. Ao mesmo tempo a mesa matriz flutua descendo, mas, em menor escala. A pressão exercida sobre o pó força o punção inferior externo para baixo e este já não mais sustentado pelo anel 24 (que desce junto com a matriz e a placa de base) acomoda-se por meio de suportes (11 e 12) sobre as gavetas. Neste instante temos a posição de compactação com os punções inferiores, a matriz e o punção superior formado o compacto em todas as suas dimensões e aplicando a pressão máxima sobre o pó.

Para chegar nesta posição, a matriz, que na verdade é uma engrenagem helicoidal interna, é obrigada a girar, guiada pelo punção inferior externo que não gira mas que tem o formato de uma engrenagem helicoidal externa.

O rolamento que permite esta rotação é auto-compensador de rolos (34). Já o punção superior penetra girando na matriz, pois também tem o formato de engrenagem helicoidal externa. O mancal onde se apoia o punção superior é um mancal axial hidro-flutuante, cuja descrição será dada posteriormente neste trabalho (Projeto do mancal). Para que o punção superior penetre na matriz com seus dentes se encaixando perfeitamente nos vãos dos dentes da engrenagem interna desta, existe um dispositivo regulável de localização que evita possíveis desencontros. O dispositivo está esquematizado abaixo.



O pino que está fixo no punção superior é obrigado a passar no gargalo da forquilha justamente quando está prestes a penetrar na matriz. A forquilha é regulável por meio de oblongos e parafusos que a prendem na matriz.

Após a penetração na matriz, o punção tem liberdade para girar livremente.

Uma vez que o punção superior terminou de compactar a peça ele sobe aliviando a pressão sobre o compacto. Neste instante, a matriz começa a se mover para baixo impulsionada pela placa de base. Os parafusos que estão fixados sob a mesa da matriz começam a atuar sobre as articulações das gavetas, abrindo-as. Quando as gavetas liberarem o anel de suporte do punção inferior externo, este cai e nivela com o topo do punção interno juntamente com a matriz.

A ferramenta estará então na posição de extração onde o alimentador, que virá novamente encher a matriz, empurra com sua parte frontal a peça para fora da matriz.

5 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO FERRAMENTAL

5.1. Considerações Técnicas.

5.1.1. A Montagem da Matriz de Metal Duro.

O método mais comum de construção de matrizes é aquele em que se coloca um inserto de matriz por interferência dentro de um anel adaptador. O anel de encaixe a quente suporta o inserto em pressões de compactação de até 80 Kgf/mm². Em muitos casos o anel de aperto pode ser projetado para aguentar a maior parte desta carga. O inserto da matriz é feito de um material altamente resistente ao desgaste, sendo que a carga de impacto será absorvida pelo anel de encaixe a quente.

Metal duro é uma escolha óbvia, e apesar de sua fragilidade, a interferência com o anel praticamente elimina os esforços de tração que possam surgir, restando assim a sua vantagem que é a grande resistência ao desgaste.

Uma fórmula empírica é utilizada para o cálculo do diâmetro externo do inserto e a seguinte:

$$D = d \sqrt{\frac{T + V \times P}{T - V \times P}} *$$

Onde: D é o diâmetro externo do inserto
 d é o diâmetro externo da peça
 V é o módulo de poisson do material
 T é a resistência compressão alternada do material.

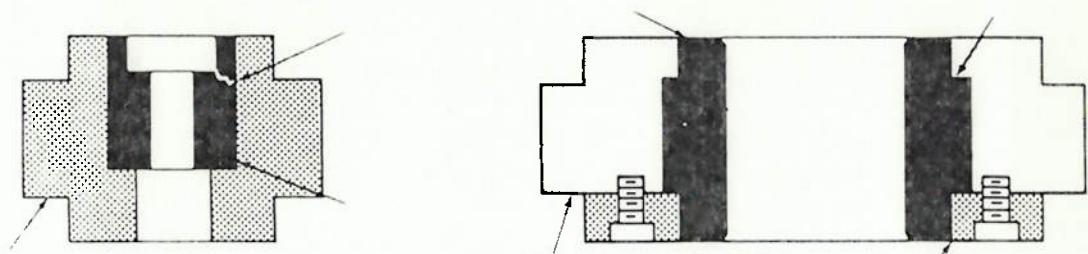
A interferência adotada é de 0,002 D para a superfície entre o anel e o inserto da matriz.

A fixação do metal duro no anel deve levar em conta o fato de a maior força sobre o inserto ocorrer quan

* Do Livro The Manufacture Engineering Handbook, vol. 2 - cap.17 (metalurgia do pó).

do a peça já compactada é extraída da matriz (pois o atrito é maior) e evitar a transmissão de esforços de tração ao longo do inserto enquanto ocorrer a extração.

Nas duas figuras abaixo, do lado esquerdo vemos uma matriz mal insertada pois o miolo tende a sair por cima durante a extração. Já na figura da direita o inserto é colocado por baixo e os pequenos rebaixos nos bordos da matriz evitam a transmissão da força ao longo da mesma.



5.1.2. Fabricação e fixação dos punções:

Outro aspecto do desenho do ferramental é a escolha da melhor configuração da base dos punções e dos aros de aperto das mesmas.

Deve-se deixar um chanfro de alívio de 5° até o diâmetro interno da flange.

Isto é importante na prevenção de quebras da base dos punções desde que se tem notado um certo abaulamento a que estão sujeitas as placas de suporte destes punções.

Um segundo detalhe são as folgas tanto verticais como horizontais para minimizar os erros de montagem e ajuste. É óbvio que no presente projeto existe o problema de rotação do punção inferior externo (devendo ser firmemente apertado para evitar rotação). Mas tanto o punção superior como o inferior interno podem ser deixados a en-

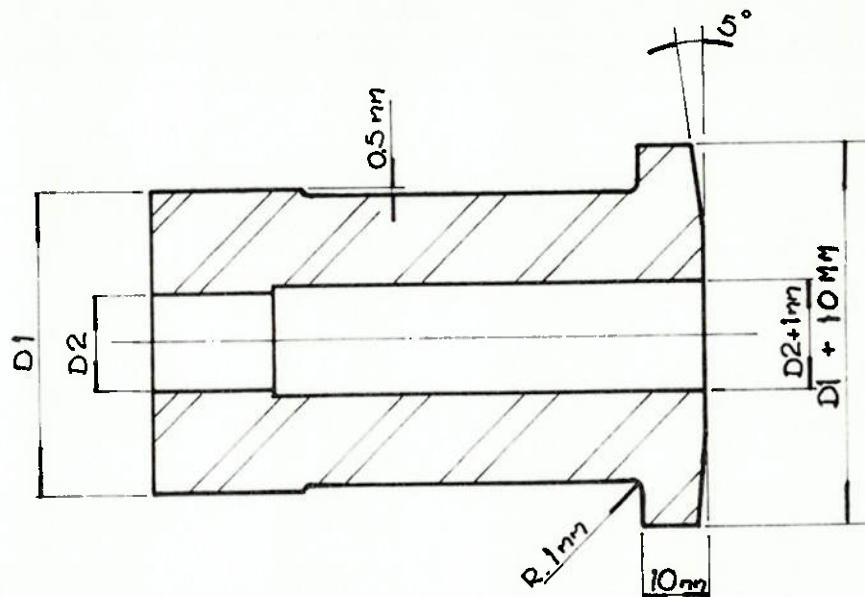
contrar seus próprios centros (uma folga de 0.05mm em toda a volta da base do punção), o que permitirá um funcionamento mais suave e aumento de durabilidade.

Como o punção inferior externo está sujeito a tração devido ao atrito da peça na sua parede interna durante a extração da peça deve-se estimar a força para se calcular o número de parafusos de fixação do aro de aperto.

Normalmente esta força é calculada medindo-se a área no diâmetro interno do punção e multiplicando por 3Kgf/mm².

Os cantos dos punções devem ter raios generosos para evitar concentrações de tensão.

Abaixo temos um croquis de fabricação de um punção.

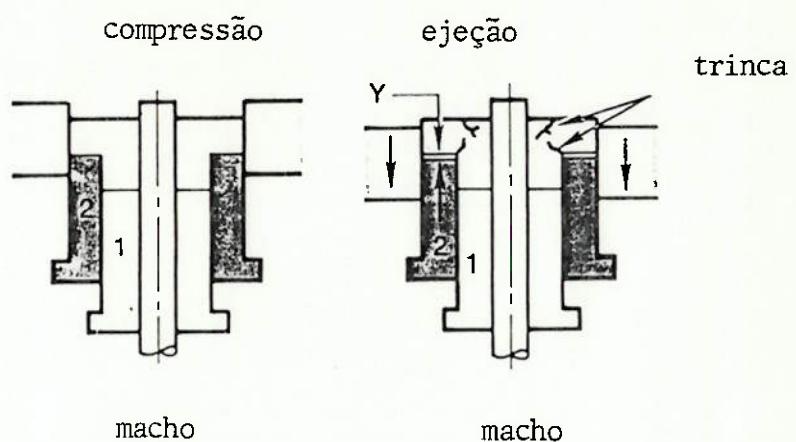


5.1.3. Deflexões:

Além de escolher os materiais corretos para as

segurar a resistência ao desgaste, as dimensões da matriz para se obter as dimensões corretas após a sinterização e se chegar ao ponto correto de interferência da ferramenta para assegurar um funcionamento livre, é ainda necessário que as deflexões entre os dois níveis das peças sejam iguais para evitar trincas (por efeito diametral) na peça compactada.

Para ilustrar o efeito disto, considere uma peça de dois níveis após a compactação, durante a extração.



Durante a compressão o punção 1 mais o seu suporte defletem uma quantidade Y a mais do que o punção 2 e seus elementos correspondentes.

Assim que ocorre a extração pela matriz, um esforço de flexão é colocado sobre a flange em balanço a partir do atrito com a parede da matriz. Ocorrerá uma trinca no ponto indicado.

Normalmente, o diferencial máximo admissível entre as deflexões dos punções é de 0,1 mm.

Para se modificar a deflexão total de um punção, pode-se atuar sobre a espessura da sua placa de suporte, ou sobre o seu comprimento ou sobre a sua área (alargamento na parte não atuante do punção).

A fórmula para o cálculo de compressão de um punção está baseada no fato de seu comprimento se alterar segundo a lei de Hooke desde que a tensão não exceda o limite elástico do material.

$$Y = \frac{F \cdot L}{A \cdot E}$$

F = força

L = comprimento do punção

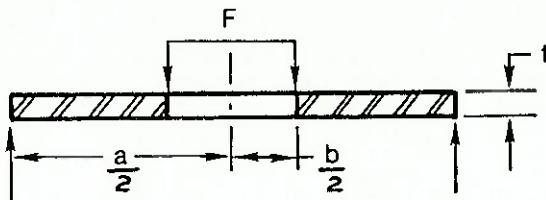
A = área do punção

E = módulo de elasticidade

Y = deflexão total do punção

Esta fórmula é também utilizada para se calcular áreas de alargamento do punção somando as deflexões nos diversos níveis deste.

As fórmulas para o cálculo de placas foram retiradas do livro Roark-fórmulas For Stress and Strain cap. 10 e modificadas segundo testes práticos. O modelo de placa usado é:



A deflexão na placa é: (onde m é o recíproco do módulo de Poisson)

$$Y = \frac{3F(m^2 - 1)}{4 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot m^2 \cdot t^3} \cdot \left\{ \frac{(a^2 - b)^2 (3m + 1)}{(m+1)} + \frac{4a^2 b^2 (m + 1)}{(m-1) (a^2 b^2)} \ln \frac{a}{b} \right\}$$

Para o cálculo da tensão σ (que deve ser menor que a tensão admissível) temos:

$$\sigma = \frac{3F}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot t^2} \cdot \left\{ \frac{2 a^2 (m + 1)}{a^2 - b^2} \ln \frac{(a)}{b} + (m - 1) \right\}$$

5.2. Materiais utilizados nas ferramentas:

As características de resistência ao desgaste e alta resistência ao impacto são difíceis de se achar em um mesmo material.

Geralmente o material da ferramenta possui uma ou outra qualidade, mas não ambas.

Os pós metálicos são por sua natureza abrasivos.

E mais ainda, pressões altas (que comumente excedem 50kgf/mm²) são necessárias para a adesão a frio das partículas de pó. Por esta razão, normalmente a escolha de um material é sempre um compromisso.

5.2.1. Materiais para matrizes:

Como já vimos, é grande a utilização de metal duro na confecção de matrizes. Todas as classes de metal duro apresentam praticamente a mesma resistência ao desgaste nas operações de compactação. Já os aços variam bastante em termos de resistência ao desgaste e podem ser usados onde limitações de projeto reduzam o suporte necessário para o uso de metal duro.

Neste caso usa-se aços VILLARES VD2 e VWM2, sendo que o primeiro é menos resistente ao desgaste e mais resistente ao impacto que o segundo.

5.2.2. Materiais para machos:

Usa-se os aços VD2 e VWM2 pois são de baixo custo e vários destes podem ser trocados e utilizados durante a vida útil da ferramenta.

Nitretando-se estes aços pode-se aumentar a resistência ao desgaste em até 10 vezes.

5.2.3. Materiais para Punções:

O fator de resistência ao impacto é mais importante que a resistência ao desgaste para os materiais dos punções.

No entanto, dado que o pó solto penetra nas folgas da ferramenta, a resistência ao desgaste não pode ser totalmente ignorada.

Utilizam-se os materiais VD2, VWM2 e VPCW também da VILLARES.

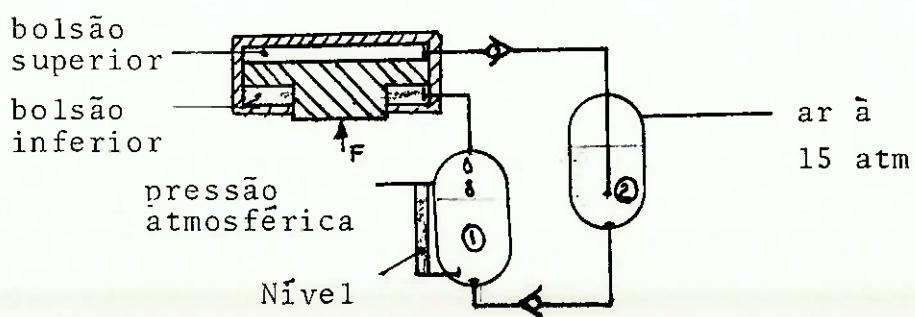
5.2.4. Materiais para os Suportes Adaptadores:

Os adaptadores usados para prender os elementos das ferramentas são feitos geralmente com um aço de baixa liga com boas propriedades de fadiga. O aço VN-50 (AISI-6150), tratado termicamente com Rc 42-45 é o mais comumente usado para estes fins.

5.3. Detalhes referentes ao projeto de Sub-Conjuntos da Ferramenta padronizada.

5.3.1. Sub-Conjunto do Mancal Flutuante do Punção Superior.

Básicamente, o esquema hidráulico deste mancal é o seguinte:



O mancal atua ciclicamente. Durante a compressão, a força F atua e provoca uma pressão bem alta de óleo no bolsão superior. Como o óleo não pode sair pela válvula de retenção, pode escoar somente pela lateral do pistão. Este vazamento é pequeno e controlado. Ao passar para o bolsão inferior o excesso de óleo sai para o reservatório (1) à pressão atmosférica. Este pistão não tem retentores (pois estes travariam o seu movimento de rotação) e gira livremente.

Quando o martelo superior da prensa estiver no ponto morto superior, a força f já não atua mais e o bolsão superior é preenchido com o óleo do reservatório (2) a 15 atm.

Durante a operação normal do mancal o óleo tende a esvaziar o reservatório (2) e a encher o reservatório (1). Quando o operador da máquina notar a partir do nível de óleo que o reservatório (1) está cheio, ele para a máquina e desengata a mangueira de ar do reservatório (2) e engata no reservatório (1) aguardando que o óleo retorne ao reservatório (2) que estará à pressão atmosférica.

Este mancal possui as vantagens sobre os rolamentos de esferas axiais pois não são importados e tem um tamanho bem menor para a mesma carga total (180ton).

A seguir temos os cálculos referentes às dimensões básicas do mancal.

A pressão máxima admissível pela válvula de retenção é de $315\text{Kgf}/\text{cm}^2 = P_{\text{max}}$

A carga máxima no pistão é de 180000 Kgf.

Logo a área do pistão será

$$\text{Área} = \frac{F_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} = \frac{180000}{315} = 571 \text{ cm}^2$$

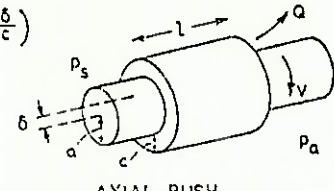
$$\text{diâmetro do pistão} = \frac{571 \times 4}{\pi} = 27 \text{ cm} = 270\text{mm}$$

Agora determinamos a vazão=Q entre o pistão e a parede do cilindro. A altura do pistão é 34mm.

Segundo uma fórmula extraída do Journal Eng. Transactions ASME - junho 1960, pág. 275, do mancal axial como no desenho abaixo

$\eta = \text{absolute viscosity}$

$(\varepsilon = \frac{\delta}{c})$



AXIAL BUSH

$E = \frac{\delta}{c}$ δ - excentricidade
 c - folga

$$Q = \frac{2\pi a (Ps - Pa)}{l} \cdot \frac{c^3 (1 + 1,5 E^2)}{12n}$$

Para o nosso caso temos:

$$a = 13,5 \text{ cm} = 0,135 \text{ m}$$

$$l = 0,034 \text{ m}$$

$$Ps - Pa = 315 \text{ atm} = 3,15 \times 10^7 \frac{\text{M}}{\text{m}^2} \text{ (diferencial de pressões)}$$

$$c = 0,01 \text{ mm} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$E = 1$$

$$n \text{ (óleo sae 90)} = 285,1 \text{ cp} = 0,2851 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,135 \cdot 3,15 \cdot 10^7 \cdot (1 \times 10^{-5})^3 (1 + 1,5 \times 1)}{0,034 \cdot 12 \times 0,2851}$$

$$Q = 5,7426 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{s} = 2l/\text{hora}$$

Como o mancal estará sujeito à pressão máxima (com exagero) em metade do ciclo da prensa, então $Q = 1l/\text{hora}$ real

Com um reservatório de 6,0 litros, a ferramenta opera até 5 horas sem o menor problema, mas após isto o operador deverá efetuar a recarga do reservatório (2). Notar ainda que as forças envolvidas na prensa muito raramente atingem 180 TON, sendo assim muito menor o fluxo de óleo.

Deve-se observar que para se obter uma folga $2c = 0,02 \text{ mm}$ num diâmetro de 270mm exige uma oficina de ferramentaria muito boa (trabalha com temperatura constante, máqui-

| nas novas e ferramenteiros experientes).

Calculando quanto o pistão sobe a cada batida (Δh) da prensa, supondo que a velocidade seja lenta (10 peças por minuto), temos a partir do volume de óleo que vaza em cada ciclo:

$$\Delta h = \frac{V_{\text{ciclo}}}{571 \text{ cm}^3} = 0,003 \text{ cm} = 0,0003 \text{ mm}$$

Este Δh é perfeitamente admissível.

5.3.2. Roscas Utilizadas nas Regulagens das Ferramentas:

(olhe a folha para localizar peças)

A rosca entre as peças 43 e 24 é uma rosca M70 x 1,5 (DIN 516).

A rosca entre as peças 23 e 41 é M120 x 1,5 (DIN 516).

A rosca entre peças 22 e 40 é M170 x 1,5 (DIN 516).

As 3 peças 22, 24 e 41 terão uma escala graduada de 75 divisões (0,02mm/div) e possuirão 4 parafusos de ponta atuante para a fixação na posição correta (basta apertar um único destes parafusos e que a peça estará presa).

As porcas são desenhadas de modo a ter grande parte de seus filetes trabalhando sob tração (porcas em "L").

5.3.3. Dispositivo de Vedação da Entrada de pó nos Rolamentos da Matriz.

Dado o grande poder abrasivo dos pôs metálicos, os rolamentos devem estar protegidos contra a penetração deste.

O lugar mais crítico é no vão criado pela matriz giratória na parte superior da mesa da matriz. A sapata de alimentação passa sobre este vão. Em vez de usar retenores que se desgastariam rapidamente com a presença do

pó, optou-se por um jato constante de ar proveniente do fundo do vão citado. O bico para a colocação da manqueira de ar está indicado no desenho da folha 51 nº 50.

5.4. Folgas entre punções e matriz

As folgas nas ferramentas devem ser minimizadas ao máximo para evitar erros de concentricidade nas peças e também não permitir a penetração de pôs nos vãos aumentando o desgaste das ferramentas.

Para se calcular as folgas deve-se levar em consideração as deformações elásticas e térmicas dos punções e da matriz. Com as ferramentas sujeitas à todas as deformações, a folga deve ser nula. Este procedimento pode levar ao aparecimento de pequenos forçamentos entre punção e matriz que geralmente são toleráveis.

O aumento do diâmetro dos punções devido à deformações elásticas vem da seguinte fórmula:

$$\Delta D = \frac{D \cdot P \cdot \mu}{E}$$

onde ΔD - a variação elástica no diâmetro do punção.

D - o diâmetro do punção.

P - a pressão de compactação.

μ - o módulo de Poisson.

E - módulo de elasticidade.

As deformações térmicas são calculadas com uma temperatura média do ferramental. Caso não se disponha de uma fórmula de cálculo desta temperatura, adota-se 80°C.

$$\Delta D_{term} = D \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

ΔD_{term} - é a variação térmica do diâmetro do punção da matriz.

D - é o diâmetro medido à tem peratura ambiente (25°).

ΔT - é a variação entre a tem peratura de trabalho da ferramenta e a ambiente.

α - é a dilatação térmica do metal duro = $6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ material.

α (aço) = $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Não há necessidade de se calcular as folgas devidas à deformações térmicas e elásticas entre punções pois geralmente eles estão sujeitos à mesma pressão e são feitos do mesmo material. Quando às tolerâncias, deve-se sempre trabalhar com a matriz na medida mínima e o macho na medida máxima para que mesmo ocorrendo desgaste as medidas permaneçam dentro da tolerância.

6 - A PADRONIZAÇÃO DO PROJETO DA FERRAMENTA DE COMPACTAÇÃO DE UMA PEÇA SINTERIZADA.

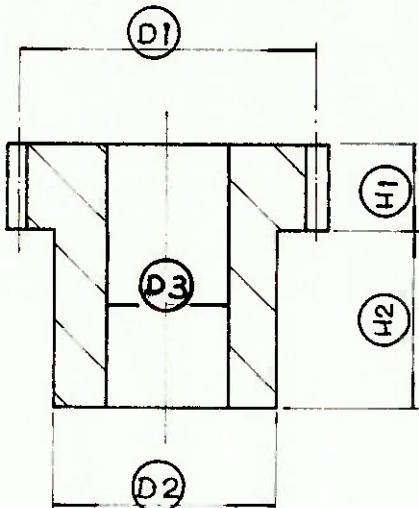
No presente trabalho desenvolvi um projeto padronizado de ferramenta de compactação para uma engrenagem helicoidal.

Esta padronização na verdade se refere à maioria das peças da ferramenta, sendo que estas peças poderão ser reaproveitadas em alguma outra ferramenta para fabricação de outra engrenagem helicoidal. As partes da ferramenta que sofrerão alterações obrigatórias nos vários projetos subsequentes de engrenagens possuem cálculos padronizados (folha de cálculos) para a determinação das suas dimensões. Assim para qualquer peça que possuir dimensões que permitam adaptá-la às características desta ferramenta obtém-se uma redução considerável do tempo de projeto.

Esta iniciativa mostra as possibilidades reais da utilização das técnicas de projeto auxiliado por computador na fabricação de ferramentas de metalurgia do pó. O computador seria utilizado para arquivar os desenhos padronizados de ferramental e os cálculos referentes aos mesmos. O objetivo final seria que ao dispor de uma peça adequada ao ferramental, este seria projetado automaticamente, bastando fornecer os dados da peça.

7 - CÁLCULOS PARA O PROJETO PADRONIZADO DO FERRAMENTAL DE COMPACTAÇÃO DE ENGRANAGENS HELICOIDAIS.

(Dimensões básicas do compacto) = (dimensões da peça). (1 + c/100) onde c é o crescimento.



- (D1) - diâmetro externo
- (D2) - diâmetro do cubo
- (D3) - diâmetro do furo
- (H1) - espessura da flange
- (H2) - altura do cubo

Observações

- Para a dimensão (D1) adota-se o diâmetro primitivo de engrenagem.

Limitações

- O valor de (D3) máximo compatível com este farramental é de 40mm. (limitação da placa de suporte dos punções inferiores).
- O valor de (D1) máximo é de 60mm (limitação devido à fixação do inserto da matriz).
- O valor de (H1) + (H2) máximo é de 60mm (devido ao dimensionamento das regulagens).

Cálculo das dimensões segundo desenho da folha

(obs.: as medidas indicadas dentro de círculos constam do desenho).

- (a1) área do punção inferior externo (PIE)

$$(a1) = \frac{\pi (D1)^2}{4} - \frac{\pi (D2)^2}{4}$$

(a2) área do punção inferior interno (PII)

$$(a2) = \frac{\pi (D2)^2}{4} - \frac{\pi (D3)^2}{4}$$

(a3) área do macho

$$(a3) = \frac{\pi (D3)^2}{4}$$

(b1) pressão de compactação do PIE

$$(b1) (Kgf/mm^2) = (\rho 1)^{2,05} \quad (\rho 1 \text{ é a densidade do compacto sobre o PIE em } g/cm^3)$$

Obs: a fórmula acima resulta num valor aproximado e foi desenvolvida empiricamente para efeito do projeto.

(b2) pressão de compactação do PII

$$(b2) (Kgf/mm^2) = (\rho 2)^{2,05} \quad (\rho 2 \text{ é densidade do compacto sobre o PII em } g/cm^3).$$

(c1) enchimento da flange

$$(c1) = H1 \times FE_1 \quad FE_1 = \frac{\rho 1}{\text{densidade aparente do pó}}$$

(c2) enchimento total

$$(c2) = (H1) + (H2) \times FE_2 = \frac{\rho 2}{\text{densidade aparente do pó}}$$

Obs: FE é o fator de enchimento e está diretamente relacionado com a densidade de peças, como vimos no item anterior deste trabalho, o valor de FE é apenas para efeito de projeto sendo (c1) e (c2) facilmente alterados por meio de regulagens.

- (d) profundidade de penetração do punção superior (PS) na matriz.

$$(d) = \frac{(c1) - (H1)}{2}$$

$$\text{se } (d) + (H1) + (H2) < 12\text{mm} \text{ então } (d) = 12\text{mm} - (H1) - (H2)$$

Obs: Após a compactação, a mesa da matriz desce de $(H1) + (H2) + (d)$ para nivelar a posição do topo da matriz (e do macho) com o topo do PIE e o topo do PII. Ao mesmo tempo em que desce, os parafusos atuam sobre a articulação das gavetas. O curso vertical mínimo neste instante é de 7mm pois com isto as gavetas se deslocam os 16mm na horizontal liberando o anel do PIE para a descida deste na extração. Por outro lado, pode ocorrer que o PIE "emperre" no PII (devido ao pó que fica na folga entre os dois) ficando por acima do topo da matriz e que seu peso próprio atuando para baixo não vença o emperramento. Se isto ocorrer, a sapata de alimentação "atropelará" o topo do PIE causando danos ao ferramental. Para resolver este problema é suficiente deixar 5mm da peça para serem extraídos da matriz após as gavetas liberarem o anel de suporte do PIE. Só este atrito de extração já basta para empurra o PIE na sua posição de extração. É por isso que força-se a situação de $(d) + (H1) + (H2) > 7\text{mm} + 5\text{mm} = 12\text{mm}$.

- (e) Quanto a matriz desce do enchimento até a posição de compactação

$$(e) = (c2) - (H1) - (H2) - (d)$$

- (f1) Força sobre a punção inferior externo

$$(f1) = (a1) \times (b1) \quad (f1 \text{ em Kgf})$$

(f2) Força sobre o punção inferior interno

$$(f2) = (a2) \times (b2) \quad ((f2) \text{ em kgf})$$

(ft) Força de compactação total

$$(ft) = (f1) + (f2)$$

Obs: este dado é útil para o operador da prensa estabelecer o limite de segurança de parada da prensa.

(g2) altura do PII

$$(g2) = (146) + (140) + (19) - (H1 + H2) - (35)$$

(g1) altura do PIE + placa

$$(g1) = (g2) + (35) - (82)$$

(g3) altura do inserto da matriz

$$\text{se } (c2) < (c1) + 20\text{mm então } (g3) = (c2)$$

$$\text{se } (c2) < (c1) + 20\text{mm então } (g3) = (c1) + 20\text{mm}$$

Obs: Deixou-se no mínimo 20mm para o inserto seguir 2 rebaixos de 5mm.

(h1) altura do pescoço do PIE

$$(h1) = (g3) + 10\text{mm}$$

Obs: Os 10mm são a folga necessária para permitir o refaceamento do punção em caso de desgaste.

(h2) altura do pescoço PII

$$(h2) = (h1) + 22 + 10\text{mm}$$

Obs: mesmas considerações com relação aos 10mm que acima.

(i) diâmetro do furo do centro da placa de suporte do PIE

adotar um (i) tal que $88 < (i) < (D1)$

(j) espessura da placa circular de suporte da PIE

resistência a fadiga do material: σ
módulo de poisson γ , $m = \frac{1}{\gamma}$

$$(j) = \sqrt{\frac{3 f_1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot m} \left[\frac{2 \cdot (88)^2 (m+1) \ln \left(\frac{(88)^2}{i^2} \right) + (m+1)}{(88)^2 - i^2} \right]}$$

(k) altura do PIE

$$(k) = (g_1) - (j)$$

(l2) alalrgamento do PII

$$(dp\ell) = \frac{3f_1 (m^2 - 1)}{4 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot E_{pl} \cdot m^2 \cdot j^2} \left[\frac{(88^2 - i^2) (3m+1)}{(m+1)} + \frac{4 (88^2 i^2 (m+1))}{(m-1) (88^2 + i^2)} (\ln \frac{88^2}{i^2}) \right]$$

$$dp_{ue} = \frac{(f_1) \cdot K}{E_{pu} \cdot a_1} ; \quad dp_{ui} = \frac{(f_2) \times (g_2)}{E_{pu} \cdot a_2}$$

onde: dp_1 - depressão da placa circular de suporte do PIE:

E_{pl} - módulo de elasticidade do material da placa.

m - recíproco do módulo de poisson do material da placa.

dp_{ue} - deflexão do PIE (área a_1 considerada constante).

dp_{ui} - deflexão do PII se tivesse área a_2 constante.

E_{pu} - módulo de elasticidade do material dos punções.

$$(a_2') = a_1 \left[\left(\frac{k - h_1}{\frac{dp_1 + dp_{ue}}{dp_{ui}} (k) - h_1} \right) \right] = \text{área alargada do PII}$$

$$(l2) = (2) \cdot \sqrt{\frac{a_2 + a_3}{\pi}}$$

verificar se $\ell_2 < i < \ell_2 + 1\text{mm}$ caso negativo adotar novo i e recalcular j , k , ℓ_2 (o programa lista do na pag 40, auxilia este processo iterativo).

Obs: a folga entre o diâmetro do punção e o furo da placa (1mm) deve ser pequena para evitar flambagem do punção que é longo.

ℓ_1 alargamento do PIE

$$\ell_1 = \sqrt{2 \frac{\ell_2^2 \pi}{4} + a_1 + a_3}$$

Obs:

- Caso $\ell_1 - \ell_2 < 3\text{mm}$ ou $\ell_2 > 75\text{mm}$ deve-se projetar o anel de suporte da placa do PIE diferente do padrão (ou mais curto ou mais largo) de modo a aumentar a deflexão do PIE, o que diminuirá ℓ_2 .

m_1 degrau do PIE

$$m_1 = \ell_1 + 7\text{mm} \quad (\text{arredondados para o 1º múltiplo de 5 maior que } m_1).$$

m_2 degrau do PII

$$m_2 = \ell_2 + 7\text{mm} \quad (\text{arredondar para o 1º múltiplo de 5 maior que } m_2).$$

n_1 Altura dos parafusos atuadores das gavetas.

$$n_1 \text{ se } (H_1 + H_2 + d) \leq 40\text{mm} \text{ então } n_1 = 146 - 80$$

$$\text{se } (H_1 + H_2 + d) > 40\text{mm} \text{ então } n_1 = 146 - (H_1 + H_2 + d) - 80 + 40\text{mm}$$

Obs: $(H_1 + H_2 + d)$ é a quantidade que a matriz desce (e o macho) da posição de compactação até a posição de extração na qual está nivelada com o PIE e o PII para permitir que a sapata de alimentação empurre a peça para a matriz antes de promover a alimentação.

40mm é o máximo que o pino extrator pode atuar sobre as gavetas.

(n2) altura das gavetas

$$(n2) = (H2)$$

a altura das gavetas definem a descida do PIE a partir da posição de compactação para se nivelar ao topo do PIL na extração.

(o) diâmetro menor do inserto de metal duro na matriz
módulo de poisson do metal duro = 0,23

$$(o) = (D1) \sqrt{\frac{40 + 0,23 \cdot (b1)}{40 - 0,23 \cdot (b1)}}$$

Obs: a fórmula acima é empírica.

(p) diâmetro maior do inserto

$$(p) = (o) + 10\text{mm}$$

Obs: deve ser colocado na matriz com interferência de 0,002 (p)

(q) altura do macho

$$(q) = (125) - (138) + (170) + (146) + (140) + (19)$$

Obs: vai até exatamente o topo da matriz

(r) diâmetro do alargamento do macho

$$(r) = 39\text{mm}$$

(s) diâmetro do degrau do macho

$$(s) = (r) + 6\text{mm} = 45\text{mm} \text{ (arredondadas para o 1º múltiplo de 5 mm maior do que (s)).}$$

(t) altura do alargamento do macho

$$(t) = (q) - ((e) + (19) + (140) + (146) + (10) + 15\text{mm}).$$

Obs: deixou-se 15mm de espaço entre o topo da placa de suporte dos punções e o alargamento do macho na posição de enchimento, pois quando se refaceia o topo deste (retirada do topo quando gasto) eleva-se sua base por meio de placas de maior espessura para compensar.

- (u) regulagem da altura da subida do punção inferior externo no enchimento (para uma altura teórica c_1).
- $$(u) = 125 + 170 + 146 + 140 + 19 + e - c_1 - g_1 - 82 - 218 - 12$$

- (v) regulagem da altura da subida da matriz (e do macho) no enchimento total teórico (c_2).

$$(v) = 125 - e - u + 6\text{mm}$$

Obs: 6mm é um valor intermediário do anel de regulagem da altura u

caso $v < - 5\text{mm}$ deve-se inverter o anel de altura 78 para uma posição de ponta cabeça.

- (x) altura do punção superior

$$(x) = 660\text{mm} - \{ 170 + 146 + 140 + 19 + (30 + 90) \} + d$$

Obs: 660mm está próximo do valor 680mm que é a máxima altura a ser regulada no martelo superior da prensa (esta regulagem é feita por um motor no topo da prensa, e existe uma escala indicando a regulagem).

- (w) alargamento na base do punção superior

$$(w) = D_1 + 10\text{mm}$$

- (y) degrau no punção superior

$$(w) + 7\text{mm} \quad (\text{arredondados para o 1º múltiplo de 5 maior do que } y).$$

- (z) diâmetro externo do anel de fixação do punção superior

$$(z) = (y) + 30\text{mm}$$

Obs: arredondar para o 1º múltiplo de 5mm maior que z, para evitar fazer muitos furos na peça do mancal (tentativa de padronização).

NOTA FINAL:

As dimensões acima mostradas e não relacionadas diretamente com punções, macho e matriz são fabricadas com as seguintes tolerâncias:

menos que 20mm	- \pm 0,2mm
de 20mm menos de 40mm	- \pm 0,3mm
de 40mm a 100mm	- \pm 0,4mm
mais de 100mm	- \pm 0,5mm

Nos desenhos da folha 52 e 53, as peças que foram cortadas e coloridas com um traço forte no seu contorno são peças que serão trocadas de projeto para projeto, sendo que deve-se acrescentar o macho, que não foi cortado mas que também será trocado. No total são somente oito (8) peças não padronizadas sendo que os anéis de fixação dos punções são padronizados de cinco e cinco mm.

8 - PROJETO DE UMA FERRAMENTA PARA A ENGRENAÇÃO
HELICOIDAL DA PÁGINA 50

De acordo com o desenho de produto o material é
ASTM B426 GRADE 1, TYPE 3.

a) composição do material (segundo ASTM)

1,5% Cobre

0,6 a 1,0% de carbono combinado

94,5% de ferro (mínimo)

0,5% de ácidos insolúveis

1,5% total de outros elementos.

b) dados desenvolvidos no Laboratório

- densidade após compacto: 6,6 g/cm³

- densidade aparente do pó: 2,96 g/cm³

- limite de resistência à fração: 400MPa

- alongamento: 1% em 25mm

- dureza Brinell: 65 Rb

- crescimento linear após sinterização: 0,4%

- fator multiplicativo para dimensões do compacto devido ao crescimento: $\frac{1}{1 + 0,4} = 0,996$

100

Dimensões:

$$\textcircled{D1} = 32,46 \times 0,996 = 32,36\text{mm}$$

$$\textcircled{D2} = 22,21 \times 0,996 = 22,12\text{mm}$$

$$\textcircled{D3} = 19,18 \times 0,996 = 19,10\text{mm}$$

$$\textcircled{H1} = 4,80 \times 0,996 = 4,78\text{mm}$$

$$\textcircled{H2} = 11,07 \times 0,996 = 11,03\text{mm}$$

Com os dados acima definidos passamos a calcular as dimensões básicas do ferramental conforme a padronização de cálculos e o desenho 52.

$$\textcircled{a1} = \frac{\pi \cdot (32,36)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (22,12)^2}{4} = 438 \text{ mm}^2$$

$$\textcircled{a2} = \frac{\pi \cdot (22,12)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (19,10)^2}{4} = 98 \text{ mm}^2$$

$$\textcircled{a3} = \frac{\pi \cdot (19,10)}{4} = 287 \text{ mm}^2$$

$$\textcircled{b1} = (6,6)^2,05 = 48 \text{ Kgf/mm}^2$$

$$\textcircled{b2} = (6,6)^2,05 = 48 \text{ Kgf/mm}^2$$

$$\textcircled{c1} = 4,78 \times \text{FE1} = 4,78 \times 2,23 = 10,66 \text{ mm}$$

$$\text{FE1} = \frac{6,6}{2,96} = 2,23$$

$$\textcircled{c2} = (4,78 + 11,03) \times \text{FE2} = 15,81 \times 2,23 = 32,25 \text{ mm}$$

$$\text{FE2} = \frac{6,6}{2,96} = 2,23$$

$$\textcircled{d} = \frac{10,66 - 4,78}{2} = 2,94 \text{ mm}$$

Verificação: $\textcircled{d} + \textcircled{H1} + \textcircled{H2} = 2,94 + 4,78 + 11,03 > 12 \text{ mm}$ (OK!)

$$\textcircled{e} = 33,25 - (2,94 + 4,78 + 11,03) = 14,50 \text{ mm}$$

$$\textcircled{f1} = 438 \times 48 = 21000 \text{ Kgf}$$

$$\textcircled{f2} = 98 \times 48 = 4700 \text{ Kgf}$$

$$\textcircled{ft} = 21000 + 4700 = 25700 \text{ Kgf}$$

$$\textcircled{g1} = 254,19 + 35 - 82 = 207,19 \text{ mm}$$

$$\textcircled{g2} = 146 + 140 + 19 - (4,78 + 11,03) - 35 = 254,19 \text{ mm}$$

$$\textcircled{g3} = \textcircled{c2} = 31,25 \text{ mm} \text{ pois } \textcircled{c2} > \textcircled{c1} + 20 \text{ mm}$$

$$\textcircled{h1} = 31,25 + 10 = 41,25 \text{ mm}$$

$$\textcircled{h2} = 41,25 + 22 + 10 = 73,25$$

A partir deste ponto, as etapas seguintes \textcircled{i} , \textcircled{j} ,

\textcircled{k} e $\textcircled{l2}$ foram calculadas com auxílio do computador. Adotou-se $\sigma = 60 \text{ Kgf/mm}^2$, $V = 0,3$; $m = 3,3333$ Epu = Epe = 21.000 Kgf/mm^2 (aço). A saída mostra que foram necessárias apenas 2 iterações para se obter o valor de \textcircled{i} que satisfizesse a condição $\textcircled{l2} < \textcircled{i} < \textcircled{l2} + 1m$. A saída do programa está na próxima página.

SAÍDA DO PROGRAMA

JRUN
F1= 23000
F2= 4700
G1=207.19
G2= 284.19
(σ) I= 60
I= 3.33333
D
A
D
O
S
E
N
T
R
A
D
A
S

A1= 430
A2= 28
A3= 287
E= 21000
H1= 41.25

1º cálculo

I= 33
J= 34.7712884
K= 172.418711
DPL= 4.66271457E-03
DE= .393650026
DI= .580511661
(a'2)AI2= 745.610324
L2= 36.2595812
C
A
C
S

2º cálculo

I= 37
J= 33.6427236
K= 173.547276
DPL= 4.886131E-03
DE= .396226659
DI= .580511661
(a'2)AI2= 736.620317
L2= 36.1013964
C
A
C
S

I= 37

Assim continuando:

$$\textcircled{i} = 37\text{mm}$$

$$\textcircled{j} = 33,64\text{mm}$$

$$\textcircled{k} = 207,19 - 33,64 = 173,55\text{mm}$$

$$\textcircled{\ell_2} = 36,10\text{mm} \text{ verificação } \textcircled{\ell_2} < 75\text{mm} \text{ OK!}$$

$$\textcircled{\ell_1} = 2 \times \sqrt{\frac{36,10^2 \pi}{4} + 438 + 287} = 47,18\text{mm}$$

$$\text{verificação: } \textcircled{\ell_1} - \textcircled{\ell_2} > 3\text{mm} \text{ OK!}$$

$$\textcircled{m_1} = 47,18 + 7 = 54,18 \approx 55\text{mm}$$

$$\textcircled{m_2} = 36,10 + 7 = 43,10 \approx 45\text{mm}$$

$$\textcircled{n_1} = 146 - 80 = 66\text{mm}$$

$$\text{pois } \textcircled{H_1} + \textcircled{H_2} + \textcircled{d} = 4,78 + 11,03 + 2,94 < 40\text{mm}$$

$$\textcircled{n_2} = 11,03\text{mm}$$

$$\textcircled{o} = 32,36 \times \sqrt{\frac{40+0,23 \cdot 48}{40-0,23 \cdot 48}} = 42,96\text{mm}$$

$$\textcircled{p} = 42,96 + 10\text{mm} = 52,96\text{mm}$$

$$\textcircled{q} = 125 - 138 + 170 + 146 + 140 + 19 = 462\text{mm}$$

$$\textcircled{r} = 39\text{mm}$$

$$\textcircled{s} = 45\text{mm}$$

$$\textcircled{t} = 462 - (14,50 + 19 + 140 + 146 + 10 + 15) = 117,50$$

$$\textcircled{u} = 125 + 170 + 146 + 140 + 19 + 14,50 - 10,66 - 207,19 - 82 - 218 - 12 = 84,65$$

$$\textcircled{v} = 125 - 14,50 - 84,65 + 6 = 31,85\text{mm}$$

$$\textcircled{x} = 660 - \{170 + 146 + 140 + 197(30 + 90)\} + 2,94 = 67,94\text{mm}$$

$$\textcircled{w} = 32,36 + 10\text{mm} = 42,36\text{mm}$$

$$\textcircled{y} = 42,36 + \text{mm} = 52,36\text{mm}$$

$$\textcircled{z} = 52,36 + 30 = 82,36 \approx 85\text{mm}$$

9 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO FERRAMENTAL

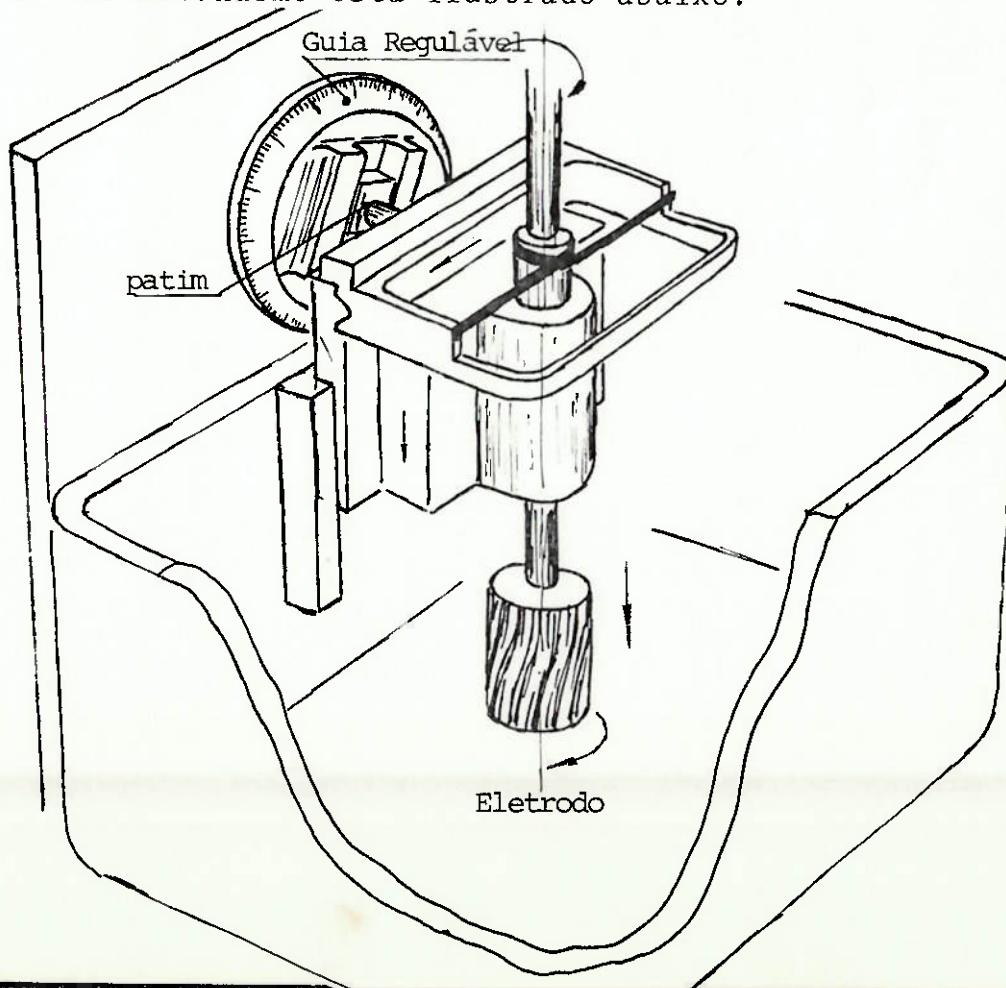
A parte mais complicada na ferramentaria é a execução dos punções e das matrizes com o formato da engrenagem helicoidal.

Fabrica-se inicialmente 1 eletrodo de eletro-erosão com o formato da engrenagem helicoidal. Este eletrodo terá 2/3 de seu comprimento mergulhado alguns minutos em ácido e após isto deixa-se apenas 1/3 do comprimento já corroído mergulhado mais alguns minutos. Com o corte em 3 pedaços iguais deste eletrodo teremos um eletrodo de penetração, outro de desgaste e por fim um de acabamento (parte corroída pelo ácido).

O eletrodo de acabamento é retificado.

Com estes eletrodos fabricam-se as cavidades no metal duro e pode-se aproveitar alguma cavidade para fabricar inversamente os punções.

Como as engrenagens a serem feitas na máquina de eletro-erosão são helicoidais, necessita-se um dispositivo que promova o movimento sincronizado de rotação dos eletrodos. Tal mecanismo está ilustrado abaixo.



Na medida em que o eletrodo desce, o patim deslisa sobre a guia de inclinação regulável, e este por sua vez move o quadro porta-fitas para a esquerda.

Uma fita metálica ao se mover força a rotação do punção. O passo de hélice pode então ser regulado alterando-se a inclinação da guia regulável.

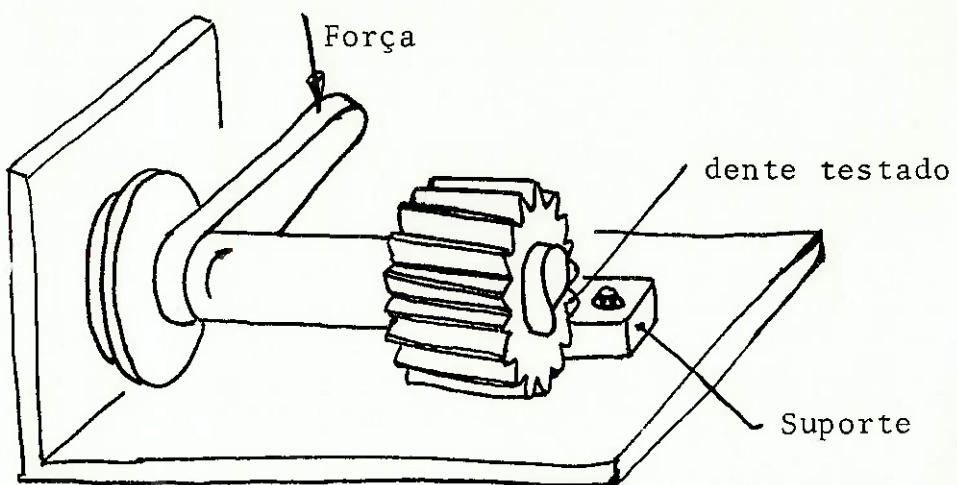
Após a fabricação dos punções e matrizes pode-se lapidá-los afim de que as superfícies fiquem polidas. Esta lapidação é feita movimentando-se o punção para dentro e para fora da matriz (movimento de vai e vem) impregnado com pasta de pó de diamante.

O controle de qualidade do ferramental pode ser feito com precisão por uma máquina de medição do tipo KLIN GENBERG, mas pode-se efetuar medições com paquímetros e roletes também.

10 - CONTROLE DE QUALIDADE

A inspeção é um dos passos mais importantes no uso de engrenagens sinterizadas. Envolve dois estágios: a amostras e produção. Na inspeção das amostras, os dados bá sicos da engrenagem como o perfil dentado e tamanho são ve rificados já que a matriz de compactação é a principal in fluenciadora destas variáveis. As propriedades macânicas da engrenagem também são medidas e, em muitos casos, a vida de funcionamento desta e testes de impacto (ou testes de medida) são feitos para verificar a funcionalidade da engrenagem. Desde que não se pode medir diretamente a re sistência à tração da engrenagem, torna-se apropriado estabelecer uma resistência mínima de quebra que possa ser usa da como critério de aceitação na produção de engrenagens a amostrais.

Um método de teste tipo torque é mostrado abaixo:



Com a carga na alavanca quebra-se o dente da engrenagem, mede-se o torque e por conseguinte acha-se a re sistência de quebra do dente.

Com o uso de estatística para um número definido de amostras, pode-se projetar uma estimativa para a população. Se os da

dos são normais, um critério de aceitação mínima de $\bar{X} - 3\sigma$ assegurará que 99.85% das engrenagens tem uma quebra acima da menor carga selecionada. O uso do método de aceitação de uma resistência mínima de quebra tem mostrado excelente correlação para medir o desempenho das engrenagens (segundo bibliografia consultada).

Para a durabilidade superficial, é especificada uma medida de dureza Rockwell mínima, já que a macrodureza correlaciona-se com o módulo de compressão do material cujos dados são obtidos de amostras do material já testado nos laboratórios da indústria.

Na produção, é prática comum se verificar a espessura da face, o diâmetro externo, a medida sobre pinos, o erro acumulado total, o erro dente a dente, paralelismo, o diâmetro interno das engrenagens e perpendicularidade furo-face. São também verificadas a resistência do dente e a macrodureza.

Quando a riscagem se torna um problema em particular para as engrenagens tratadas termicamente, é apropriado se especificar e medir a micro-dureza. Isto é feito com um penetrador de diamante e a dureza microscópica individual de cada partícula pode ser medida. A especificação de dureza da partícula é geralmente determinada por dados históricos do fabricante de peças sinterizadas.

11 - BIBLIOGRAFIA

- BRADBURY, Samuel. Source Book on Powder Metallurgy. American Society for Metals, USA, 1979.
- Metallnormcentralen. MNC Handbook GE/1978 Powder metallurgy. 1^a ed. - Stockholm, 1978.
- HENRIOT, Georges. Traité Théorique et Pratique des Engrenages (Vol. 1 e 2). 6^a ed. Paris, Dunod, 1979.
- OLIVEIRA, Nélson de Campos Gil de. Roscas e Parafusos. 2^a ed. São Paulo: Gremio Politécnico.
- CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 5^a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1982.
- WINTERBERG, Felix. The Pressing Technique in Powder Metallurgy. Mannesmann - Pulvetmetal (Folheto).
- JOURNAL Engineering Transactions, ASME. p.275. June, 1960.
- NORMA DIN, nº 3960.
- NIEMANN, Gustav. Elementos de máquinas (Vol. 1). Editora Edgard Blücher. 1971.
- CINCINNATI Operation And Maintenance Manual For Powdered Metal FSU Compacting Press.
- DORST- Keramikmaschinen- Bau - Operating Instructions for TPa 180.
- ROARK, E. Formulas for Stress and Strain.

ANEXO I

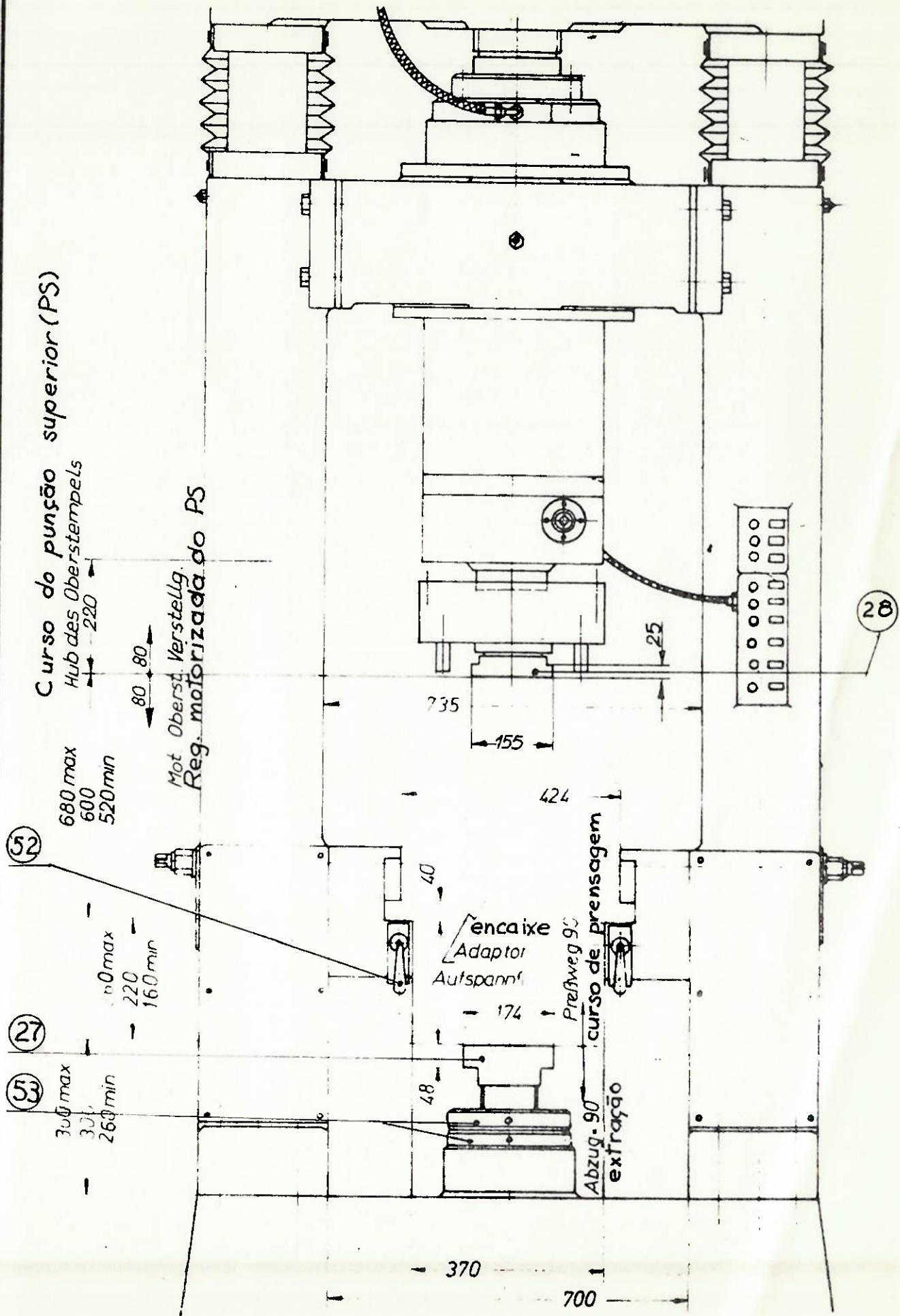
D E S E N H O S

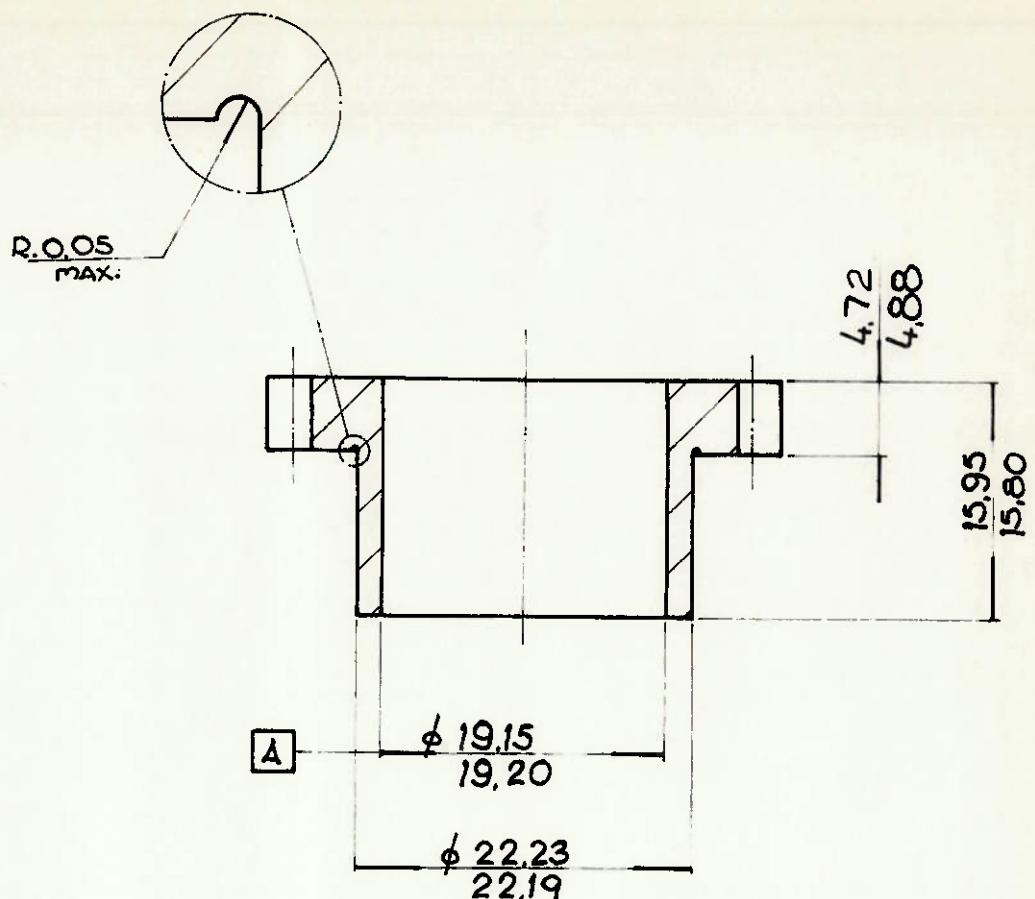
LISTA DE PEÇAS DO DESENHO DA FOLHA

<u>PEÇAS</u>	<u>TÍTULO</u>	<u>QUANT.</u>
1	Anel Fixador da Matriz	01
2	Adaptador Interno da Matriz	01
3	Anel Fixador	01
4	Anel Fixador do Adaptador da Matriz	01
5	Sub Conjunto da Matriz	01
6	Adaptador para Matriz	01
7	Mesa da Matriz	01
8	Guia	01
9	Anel Fixador do P.I.E.	01
10	Parafuso Atuador da Gaveta	02
11	Placa de Suporte para P.I.E.	01
12	Suporte para P.I.E.	01
13	Sub Conjunto das Gavetas	02
14	Suporte para P.I.I.	01
15	Régua de Aperto	01
16	Adaptador para P.I.	01
17	Coluna de Elevação do P.I.E.	02
18	Placa de Suporte dos Puncões	01
19	Macho	01
20	Anel Fixador do Macho	01
21	Suporte para Macho	01
22	Anel Limitador de Enchimento Total	01
23	Apoio da Regulagem das Colunas	01
24	Anel de Regulagem de Enchimento Total	01
25	Coluna da Mesa da Matriz	04
26	Placa de Base	01
27	Premento Inferior da Prensa	01
28	Premento Superior da Prensa	01
29	Anel Fixador do P.S.	01
30	Coluna de Guia do P.S.	02
31	Sub Conjunto Pino Local de Penetração do P.S.	01
32	Forquilha de Localização	01
33	Rolamento Axial de Esféricas (Ref.SKF 51124)	01
34	Rolamento Axial Auto-Compensador de Rolos (Ref. SKF 29320 B)	01

<u>PEÇAS</u>	<u>TÍTULO</u>	<u>QUANT.</u>
35	P.I.E.	01
36	Porca Sextavada ϕ n 20 — DIN 936	02
37	P.I.I.	01
38	Anel Fixador do P.I.I.	01
39	Gaveta	02
40	Batente	01
41	Anel de Regulagem de Enchimento do P.I.E.	01
42	Suporte do Macho	01
43	Calço	01
44	Válvula de Retenção — TIPO S — Ref. REXROTH-TN6	
45	Travessa Superior	01
46	Bucha	02
47	Mancal Axial Hidro-Flutuante	01
48	Engate p/Mangueiras	01
49	P.S.	01
50	Bico p/Mangueira	01
51	Paralelogramo do Alimentador	01
52	Sub-Conjunto do Alimentador	01

Encaixe do Ferramental na Prensa





DADOS DA ENGRANAGEM:

- N° DE DENTES = 38
- ÂNGULO DE PRESSÃO = 20°
- PASSO = 2,68 MM
- DIÂMETRO DE BASE = 30,50 MM
- DIÂMETRO PRIMITIVO = 32,45 MM
- RAIO DE ARREDONDAMENTO NO PÉ DO DENTE = 0,5 MM
- FAT. DE DESLOCAMENTO DO PERFIL = 0,038 MM
- ESPESSURA CIRC. DO DENTE = 1,36 MM
- 1/2 ÂNGULO DE FUNDO $\gamma_0 = 1,4728^\circ$
- DIÂMETRO DO FUNDO = 30,16 MM
- DIÂMETRO DA CABEÇA = 34,06 / 33,93 MM.
- ÂNGULO DE HÉLICE = 7'38' (HÉLICE ESQUERDA)
- MATERIAL: ASTM - CLASSE I (FERRO SINTERIZADO TIPO - 3), B426

ANEXO II

LISTAGEM EM BASIC (Apple) para o cálculo iterativo
das etapas i, j, k e ℓ_2 .

1155

```

10 INPUT "F1="; F1
20 INPUT "F2="; F2
30 INPUT "G1="; G1
40 INPUT "G2="; G2
50 INPUT "T="; T
60 INPUT "N="; N
70 INPUT "A1="; A1
80 INPUT "A2="; A2
85 INPUT "A3="; A3
90 INPUT "E="; E
100 INPUT "H1="; H1
105 PRINT : PRINT : PRINT
110 INPUT "J="; J
115 IF J = 0 THEN END
120 J = SQR((3 * F1 / (2 * 3.1416 * T * N) * (2 * 88 * 2 * (N + 1) * LOG
(88 * 2 / T / I) / (88 * 2 - I * T) + N + 1)))
130 PRINT "J="; J
140 K = G1 - J
150 PRINT "K="; K
160 DL = 3 * F1 * (N * N - 1) / (4E3 * 3.1416 * N * N * J * J) * ((88
* 2 - I * T) * (3 * N + 1) / (N + 1) + 4 * 88 * 2 * T * I * (N + 1) *
LOG((88 / T) * 2 / (N - 1) / (88 * 2 - I * T)))
170 PRINT "DFL="; DL
180 DE = F1 * K / E / A1
190 DI = F2 * G2 / E / A2
200 PRINT "DE="; DE
210 PRINT "DI="; DI
220 A12 = A1 * (K - H1) / (((DI + DE) / DI) * K - H1)
230 PRINT "A12="; A12
240 L2 = 2 * SQR((A12 + A3) / 3.1416)
250 PRINT "L2="; L2
255 PRINT : PRINT
260 GOTO 110

```

ANEXO III
INTRODUÇÃO À METALURGIA DO PÓ

Í N D I C E

	pagina
1. Vantagens da Metalurgia do Pó	2
2. A Técnica de Processo	5
3. Prensando e Compactando	7
4. Sinterização	11
5. O Ciclo de Operação	14
6. Seleção de Material	17
6.1 Materiais Ferrosos Sinterizados	17
6.1.1 Densidade	17
6.1.2 Porosidade	18
6.1.3 Permeabilidade	18
6.1.4 Propriedades Mecânicas	19
6.1.5 Propriedades de Resistência	19
6.1.6 Dutilidade	21
6.1.7 Dureza (Aparente)	21
6.1.8 Resistência à Corrosão	22
6.1.9 Acabamento Superficial	23
6.1.10 Isolamento Sonoro	25
6.1.11 Resistência à Fadiga	25
6.1.12 Influência dos Elementos de Liga	27
7. Operações Subsequentes nas Peças Sinterizadas	29
7.1 Melhoramento do Material	29
7.1.1 Infiltração	29
7.1.2 Impregnação	30
7.1.3 Impregnação Galvânica de Camadas Metálicas	32
7.1.4 Métodos de União de Peças Sinterizadas....	33
7.2 Retrabalho com Formação de Cavacos	34
7.3 Tratamentos Térmicos	37
7.4 Tamboreamento	39
8. Controle de Qualidade de Peças Sinterizadas	40
9. Projeto de Peças	41
9.1 Tolerâncias e Precisão Dimensional da Peças Sinterizadas	41
9.2 Regras para o Projeto das Peças Sinteriza- das	45
9.3 Como Especificar Peças Sinterizadas	52

INTRODUÇÃO

A técnica de sinterização tem assumido provavelmente uma importância maior do que muitos outros processos de fabricação. Ela é empregada atualmente para a produção de peças altamente complicadas com uma precisão dimensional superior à obtida por qualquer outro método comparável.

Sinterização, isto é, o "cozimento" ou "adesão" de materiais à base de pó é, sem dúvida, uma técnica novadora; ela foi usada pelos antigos oleiros para "derreter" materiais básicos de alto ponto de fusão, úteis ao beneficiamento de cerâmicas.

Da observação de que materiais cerâmicos para peças compactadas a partir de pó possuam propriedades mecânicas satisfatórias, sugeria-se a aplicação do processo aos materiais metálicos. Hoje, aplicamos aos póis metálicos um processo fundamentalmente semelhante ao aplicado aos cerâmicos. Além da qualidade de ser um método elegante de processar materiais e das características estruturais especiais, existem muitas outras razões de se usar o método de sinterização, sendo a principal delas a rapidez do ciclo de produção. Assim, este é um método que se adapta facilmente à produção em larga escala de componentes idênticos.

1. VANTAGENS DA METALURGIA DO PÓ

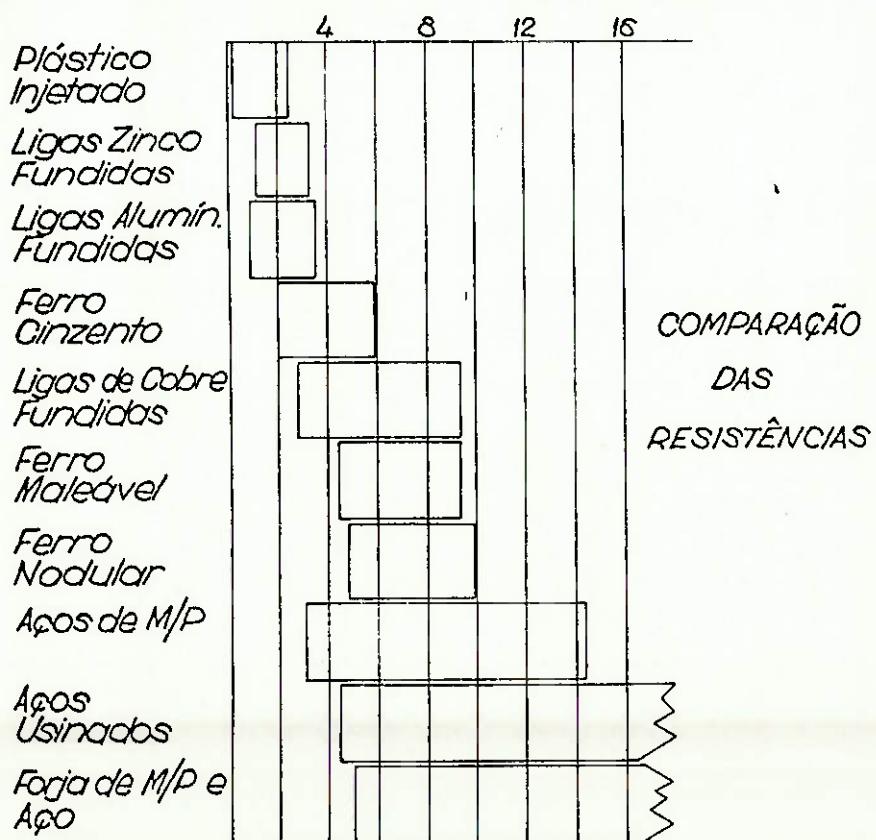
O QUE É DIFERENTE NA METALURGIA DO PÓ ?

O processo de metalurgia do pó (M/P) é um método desenvolvido para se fabricar peças ferrosas e não ferrosas. Feito pe la prévia mistura de pós elementares ou de ligas e posterior compactação em moldes, as peças resultantes são então sintetizadas (aquecidas) em um forno de atmosfera controlada, de modo a aderir metalurgicamente as partículas. Basicamente é um processo de trabalho metálico "sem cavacos". A M/P usa tipicamente mais de 97% da matéria-prima na peça acabada; - sendo assim um processo que economiza energia e material.

Este processo é eficaz quanto ao custo de produção de peças simples ou complexas, em tolerâncias dimensionais bem restri tias, com faixas de produção variando dentre centenas e milhares de peças por hora. Como resultado, pouco se aplica processo de usinagem a essas peças. As peças de M/P podem ser calibradas visando melhor controle da precisão dimensional , o que essencialmente evita etapas secundárias de fabricação. Podem ainda ser cunhadas para aumentar tanto a resistência - quanto a densidade.

Figura 1

Resistência a tração $\times 1000 \text{ Kgf/cm}^2$



O QUE É PRÓPRIO DA M/P ?

Peças de ferro e não ferrosas podem ser: impregnadas com óleo, funcionando como mancais auto lubrificantes; impregnadas com resinas para selar a porosidade interconectada; infiltrada com um metal de baixo ponto de fusão, para maior dureza e resistência a choques; tratadas termicamente; e galvanizadas quando necessário.

A maioria das peças de M/P pesam menos de 2 Kg, mas peças de até 16 Kg já foram fabricadas em equipamentos de M/P convencionais.

Nos primórdios da M/P, fabricavam-se buchas e mancais com formas simples. Aplicações mais ousadas requeriam múltiplas peças e etapas de montagem. Hoje a tecnologia permite a fabricação de peças com contornos complexos, de vários níveis, minimizando operações e reduzindo custos.

M/P ECONOMIZA ETAPAS

Já que o processo da M/P não é sensível a perfis complexos, peças como cames, engrenagens, coroas dentadas e alavancas são produzidas bem economicamente. Em casos onde o projeto exige a união de peças - círculo com engrenagem ou coroa com pinhão - a solução da M/P frequentemente elimina as etapas de montagem combinando perfis separados numa única peça de M/P.

M/P É VERSÁTIL

A versatilidade básica da M/P é aplicada em numerosas indústrias, incluindo automotiva, máquinas de escritórios, aeroespaciais, equipamentos elétricos e eletrônicos, eletrodomésticos pequenos e médios, equipamentos de jardins e agricultura, ferramentas manuais e de potência.

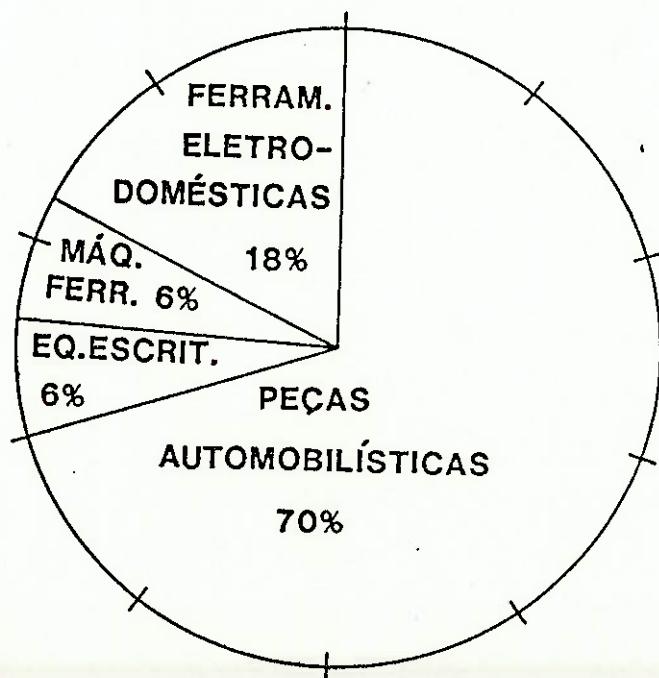
Milhares de projetos (alternativas econômicas) obtidos em M/P servem atualmente estas indústrias numa larga extensão de aplicações em engenharia. As aplicações se dividem em dois grupos principais.

Em um grupo as peças são difíceis de se obter por qualquer outro método de produção. Como exemplo temos as peças com materiais de tungstênio e molibdênio ou carboneto de tungstênio, que não podem ser feitas eficientemente por qualquer outro processo. Mancais porosos e outros tipos de peças magnéticas são produtos exclusivos do processo da M/P.

Um outro e largo grupo de aplicação, consiste em componentes onde a M/P é uma alternativa efetiva para peças usinadas e forjadas. A tecnologia da M/P está se expandindo atualmente para a forja a quente de precisão a partir de peças sintetizadas, estendendo desta maneira a capacidade de prover peças da M/P com grande resistência.

Figura 2

**DISTRIBUIÇÃO MERCADOLÓGICA
APROXIMADA DA METALURGIA
DO PÓ MUNDIAL**



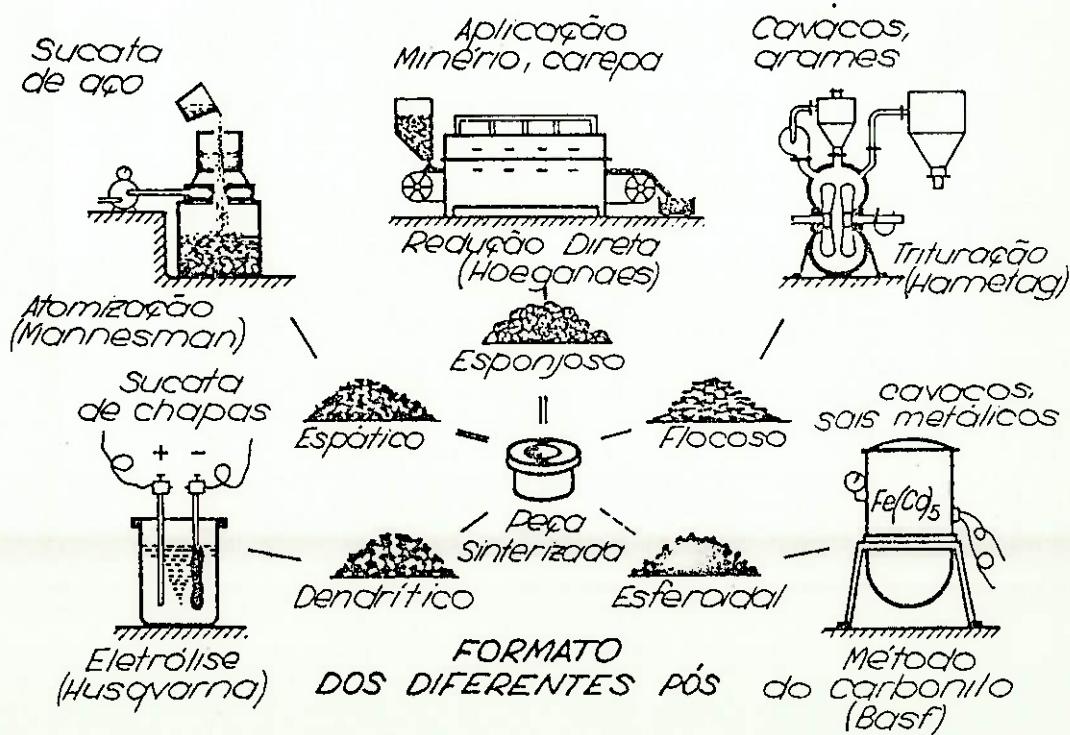
2. A TÉCNICA DE PROCESSO

A conveniência do processo de metalurgia do pó é determinada por vários fatores. Além das operações atuais de compressão e sinterização, um dos principais fatores que afetam a qualidade do produto final é o pó de metal empregado. Por esta razão é importante se ter alguma noção dos variados métodos que são utilizados para fabricação dos tipos mais convenientes de pós e da utilidade nas peças sinterizadas.

FABRICAÇÃO DO PÓ

Existem vários métodos de fabricação de pós metálicos, cada qual influenciando não só a forma e o tamanho do grão, como também a pureza do produto. (vide figura 3).

- o processo de redução
- o processo de deposição eletrolítica
- o processo de carbonilo
- o processo mecânico
- o processo de atomização

Figura 3TIPOS DE PRODUÇÃO E FORMATOS DE DIFERENTES PÓS DE FERRO.

O PROCESSO DE REDUÇÃO, pelo qual os óxidos de metal em pó são reduzidos principalmente em hidrogênio, é amplamente empregado. Aqui, a pureza da matéria-prima determina a qualidade do pó final que possui sempre uma forma esponjosa. Este método é empregado para a fabricação de tungstênio e molibdênio em pó, assim como pós de ferro a partir de minério enriquecido.

O PROCESSO ELETROLÍTICO é usado principalmente na produção de pós de cobre, mas recentemente tem sido também empregado na fabricação de pós de ferro plástico de alta qualidade (em estrutura dendrítica). Neste método, o pó é depositado num banho eletrolítico sobre eletrodos de onde são posteriormente retirados e refinados.

O PROCESSO CARBONILO produz pós de ferro e níquel de grande pureza, com granulometria uniformemente fina e de forma esférica. Estes pós, extremamente finos, são formados pela desintegração do carbonilo de ferro ou níquel, com tamanhos de grão na faixa de 1 μm .

O PROCESSO DE FABRICAÇÃO MECÂNICA de pós metálicos engloba a Trituração de arame, aparas ou granalha jateada em moinho de martelo. Os pós obtidos são flocosos e são recozidos para sofrer alívio de tensões antes de serem utilizados.

O PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO, no qual o metal fundido pode ser diretamente convertido em pó, permite que pós ferrosos, não ferrosos e ligados sejam produzidos rápido e economicamente.

3. PRENSANDO E COMPACTANDO

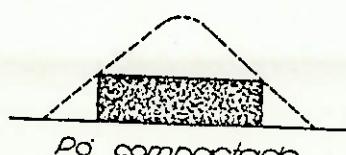
O pó inserido na matriz e sujeito a pressão pode, desde que tenha as propriedades plásticas necessárias, ser moldado como um componente compactado. Durante esta operação as partículas individuais de pó são comprimidas tão firmemente - umas nas outras que permanecem aderidas depois que a pressão tenha sido retirada. É necessário, então, altas pressões de compactação e que os pós sejam plásticos para se obterem altos graus de compressão.

O estágio mais importante da fabricação de peças na metalurgia do pó é a técnica especial de compactação empregada. Isto se deve ao fato do pó solto ter um volume bem maior do que quando compactado. A relação de dependência entre a porosidade e densidade com a pressão aplicada é ilustrada na figura 4.

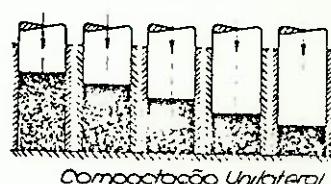
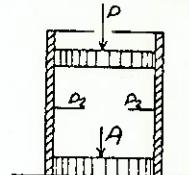
A metade esquerda da figura compara os volumes relativos do pó solto e compactado, enquanto que a parte direita do diagrama mostra as fases individuais da compactação, isto é, como a densidade do compacto aumenta com a pressão crescente. Na fase inicial o pó tem uma densidade aparente e preenche completamente a cavidade na matriz; a densidade do compacto muda de acordo com o grau de compressão até que o máximo possível (teoricamente a densidade absoluta) seja alcançado. Pela divisão em dois valores "espaço de enchimento" e "espaço de compactação" (vide figura), obtém-se o fator de enchimento - que é de grande importância para o projeto e construção de ferramenta de compactação.

Figura 4

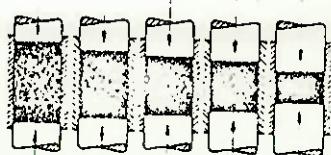
COMPARAÇÃO ENTRE DENSIDADE APARENTE(SOLTO) E DENSIDADE VERDE(COMPACTO)



Variação das Pressões durante a compactação



Compactação Uniaxial



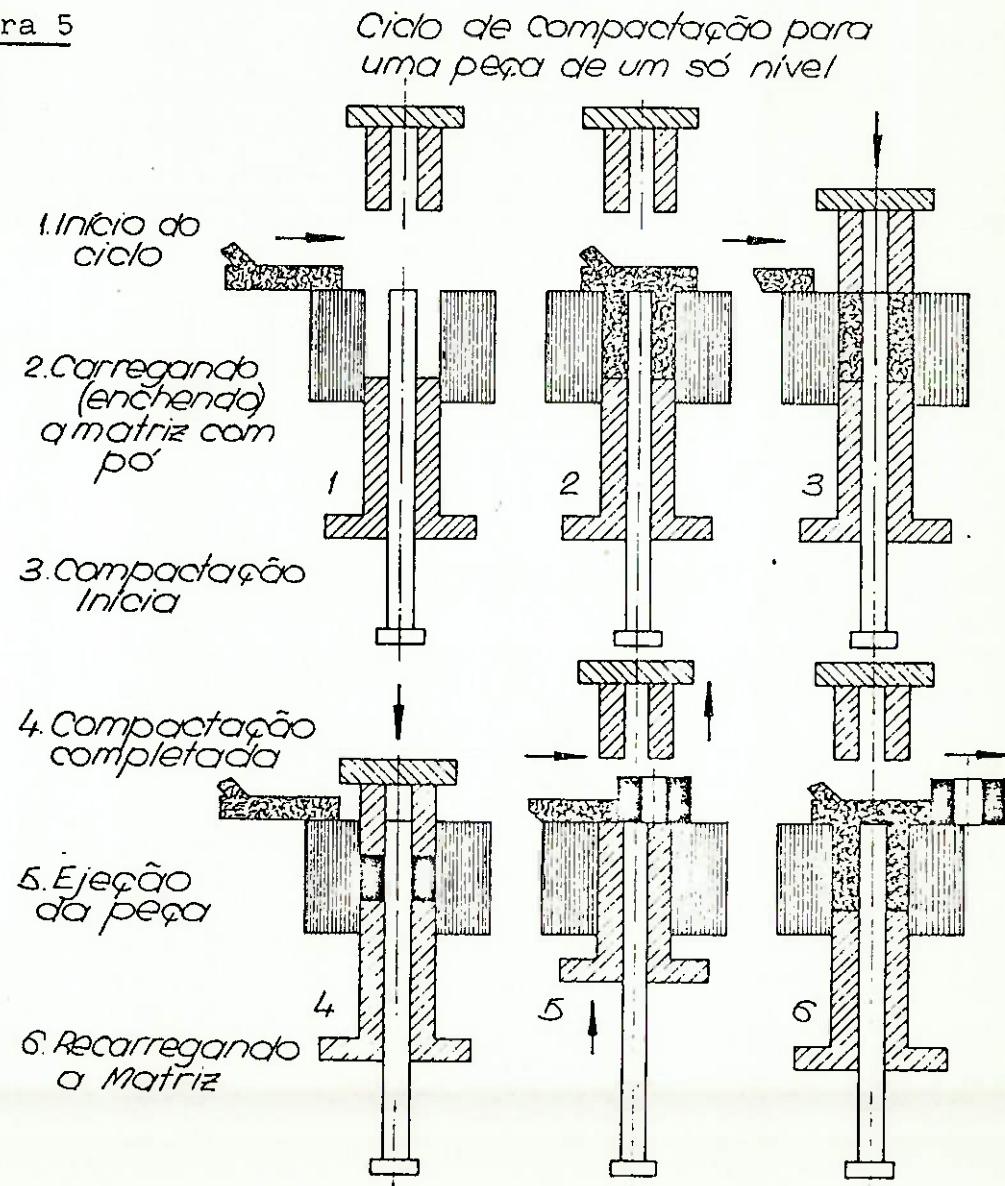
Compactação de Duplo Efeito

Existem vários processos adequados à compressão de pós metálicos, mas poucos deles garantem densidade uniforme, principalmente no caso de compactos com formas complicadas. O método empregado para a compressão de materiais fluidos ou pastosos são inconvenientes. Já que os últimos têm pressões igualmente distribuídas em todas as direções.

O primeiro processo de compressão mostrado nas figuras 4 e 5 é conhecido como o método de compactação unilateral, onde zonas de densidades diferentes são causadas no compacto devido ao uso de matriz e punção inferior fixo.

No segundo processo (processo de compressão de dupla-ação) - obtém-se uma melhor uniformidade na compactação.

Figura 5



Das dificuldades envolvidas para se fazer isto, especialmente quando a peça possui secções transversais complicadas, resultou o "processo de retração", no qual a matriz (fig. 6 e 7) executa um movimento relativo em relação ao punção inferior que permanece fixo. A vantagem especial deste processo é a possibilidade de adequar o movimento da matriz à cada altura de secção de um compacto pelo ajuste dos controles na prensa. O "processo de retração" também torna possível subdividir os punções de acordo com a tarefa em execução, sendo assim o método ideal na compactação de peças complicadas de M/P. As ferramentas especiais empregadas na M/P devem ser capazes de acomodar uma quantidade precisa de pó, compactar este pó e permitir a remoção do compacto. Assim, cada ferramenta de compactação deve ter a posição de enchimento e uma posição de extração ou remoção, que ocorrem consecutivamente durante o ciclo de compressão.

A ferramenta de compactação deve ser adequada para fabricar também os componentes de múltiplos níveis (fig. 7). Os espaços de enchimento pré-calculados para secção transversal do componente são definidos por punções separados de maneira que a densidade do compacto seja uniforme em todas as regiões (fig. 8).

Figura 6

Operação com Ferramental de Múltiplos Punções (peça de 2 níveis)

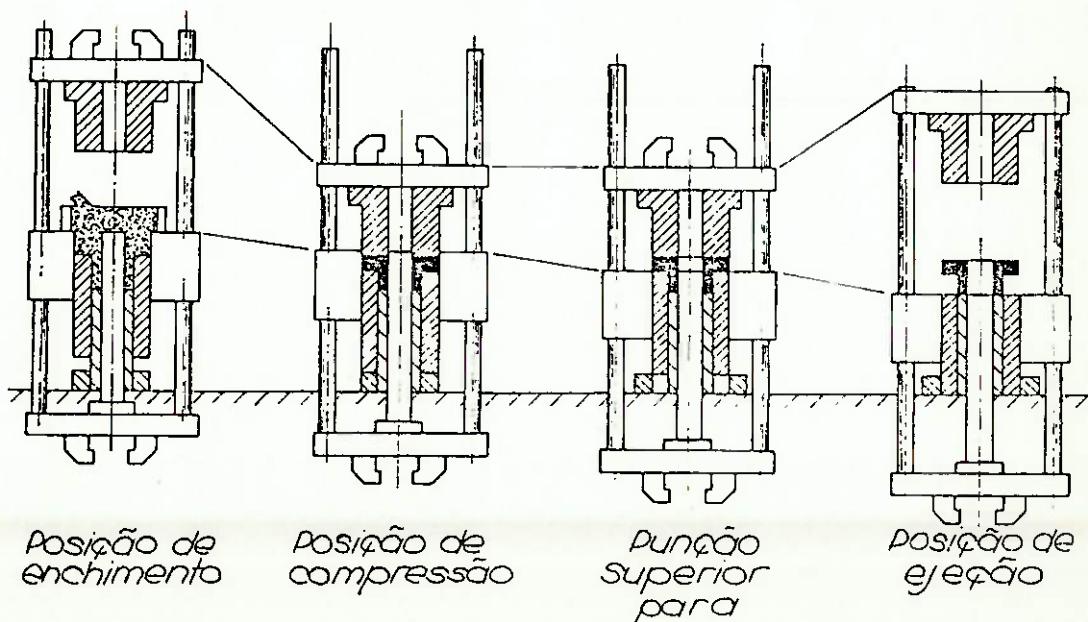


Figura 7

Ferramental de M/P para uma peça de 2 níveis

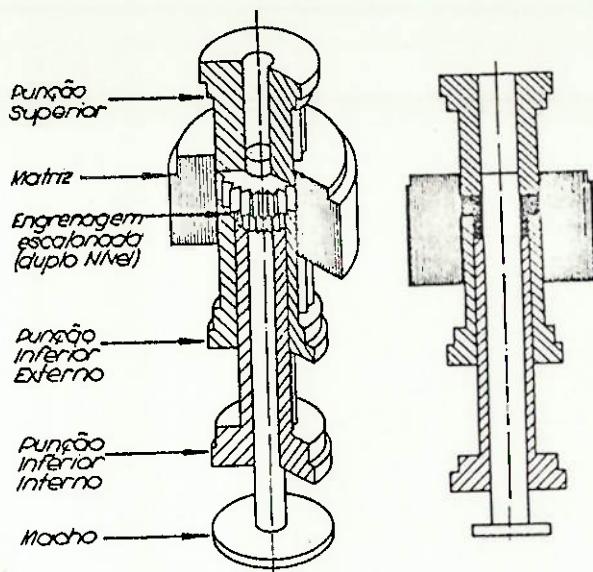
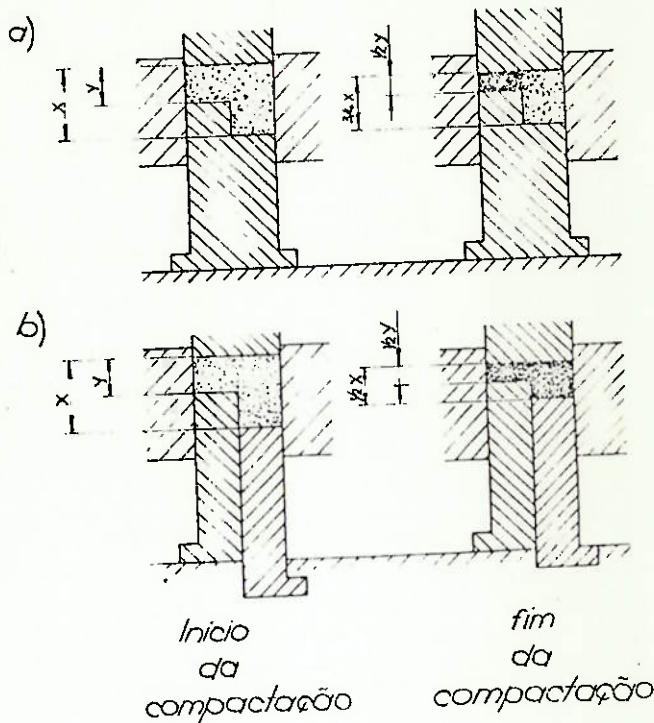


Figura 8

MELHORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE PELA SUBDIVISÃO DO PUNÇÃO



Prensas mecânicas ou hidráulicas, especialmente desenvolvidas para a M/P, são projetadas para acomodar tais ferramentas e compactar automaticamente todos os tipos de peças sintetizadas. Aqui, a maior vantagem é que, excetuando o projeto de ferramentas simples, torna-se possível fornecer ampla extensão de variação nas secções transversais por arranjos correspondentes dos punções.

Atualmente, prensas hidráulicas especiais utilizam forças de até 500 t. Assumindo que a peça sintetizada seja compactada com 6 t/cm^2 , bastaria uma prensa deste tipo para um componente formado com a superfície projetada (vista superior na direção de compactação) de 83 cm^2 . Neste caso, a altura da peça não traria maiores dificuldades, sendo limitada pelo curso do punção inferior. A superfície projetada e a altura determinam o peso do componente que no caso hipotético acima seria entre 3 e 4 Kg.

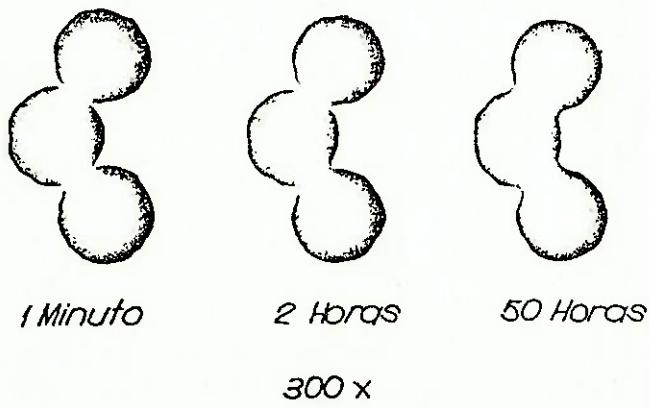
Prensas especiais deste tipo desenvolvem de 4 a 30 golpes - por minuto, dependendo da pressão aplicada, da altura de encherimento e da complexidade das ferramentas de compactação.

4. SINTERIZAÇÃO

A coesão das partículas de pó obtida durante a prensagem não proporciona, obviamente, a resistência suficiente para a aplicação desejada. Esta resistência final só é atingida pela sinterização. Apesar desta forma de tratamento térmico ser aplicada essencialmente a temperaturas abaixo do ponto de fusão dos materiais, uma fluidização parcial e temporária é desejada em certos casos, como, por exemplo, no caso de misturas contendo adições de materiais não ferrosos. Para evitar a deformação nesta operação, deve-se cuidar para que a temperatura de fusão do material estrutural da peça não seja excedida.

Sinterização (é o tratamento térmico do compacto feito de pó comprimido, estritamente falando) é um processo no qual as partículas individuais de pó são aderidas entre si sob influência térmica. Esta consolidação abaixo do ponto de fusão (2/3 a 3/4 do ponto de fusão da liga considerada) acarreta mudanças no reticulado cristalino (rearranjo dos átomos), especialmente difusões de várias intensidades entre cristais do mesmo metal ou elemento de liga (fig. 9).

Figura 9 EFEITOS DA SINTERIZAÇÃO
SOBRE UMA MATRIZ DE ESFERAS DE COBRE
(Temp. 1020°C)

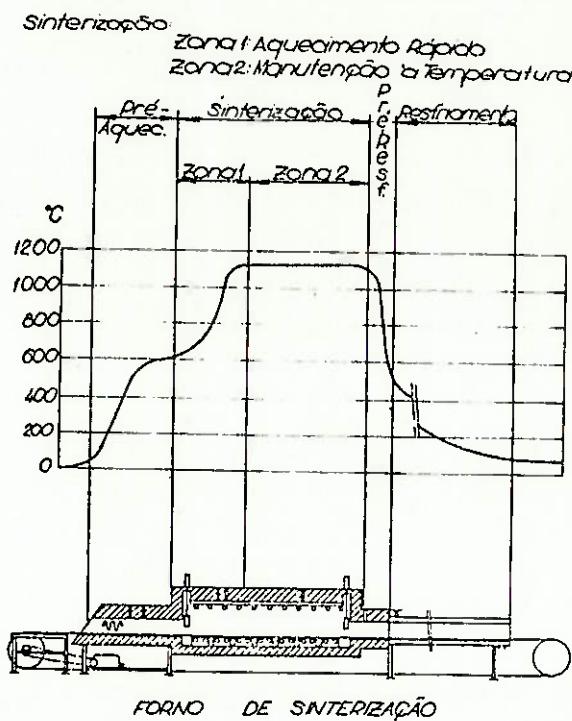


Na sinterização pode ocorrer crescimento ou contração da peça, o que indica uma nova formação cristalina. A carbonatação que transforma o pó de ferro em aço pode ser efetuada pela fase gasosa dentro do forno ou pela adição de pó portador de carbono na mistura. Com a sinterização apropriada, os métodos acima resultam numa peça de aço homogênea com uma es-

trutura bem típica. No método que se segue, mostrado no centro da figura 21c, a peça consiste de dois componentes de metais diferentes. Aqui, devido à difusão, ou em certos casos à fusão, ocorre um fortalecimento crescente até a obtenção da liga em toda a estrutura já no final da fase de sinterização. A segunda coluna a partir da direita mostra a formação da peça infiltrada produzida pela infusão da peça sinterizada ou pela superposição de uma folha de metal não ferroso apropriado no compacto antes da entrada no forno de sinterização. Este processo é denominado infiltração e é afetado pela estrutura porosa (matriz) da peça a ser sinterizada.

Fornos especiais de sinterização (a maioria deles são aquecidos eletronicamente) tem sido desenvolvidos para temperaturas variando até 1350°C.

Figura 10



Equipados com elementos de aquecimento de cromo-níquel e molibdênio, eles consistem (fig 10) numa câmara preliminar para evaporação dos lubrificantes (estearatos) adicionados ao pó, à presente câmara de sinterização e à saída resfriada a água.

Os compactos sinterizados depositados sobre bandejas se movem dentro do forno com auxílio na maioria dos casos de esteiras transportadoras. Para evitar oxidação nas peças e dos elementos sensíveis de aquecimento (molibdênio), o forno deve ser mantido constantemente num' atmosfera protetora (hidrogênio, amônia craqueada e gás propano parcialmente queimado). Esta atmosfera também auxilia a carbonatação das peças além de eliminar impurezas e óxidos na superfície porosa interna e externa das mesmas.

Durante a sinterização, que para ferro e aço se dá entre 1050°C e 1250°C, os compactos passam por diversas fases, variando os tempos de sinterização de 30 a 120 minutos. Até sob temperaturas relativamente baixas, os gases absorvidos são liberados enquanto que os cristais deformados na compactação se recuperam (recristalização). Estas fases primárias são geralmente acompanhadas pelo aumento de volume, enquanto que no alcance de altas temperaturas caracteriza-se a redução de volume (encolhimento). Este processo de encolhimento pode ser contornado ou compensado pela adição de certa proporção de cobre de pó de ferro. Neste caso, o cobre não é usado para melhorar as propriedades mecânicas do material sinterizado, mas sim como um meio de compensar o encolhimento.

5. O CICLO DE OPERAÇÃO

Após rever os principais métodos empregados no processo de metalurgia do pó, torna-se possível agora descrever resumidamente o ciclo de produção da peça sinterizada:

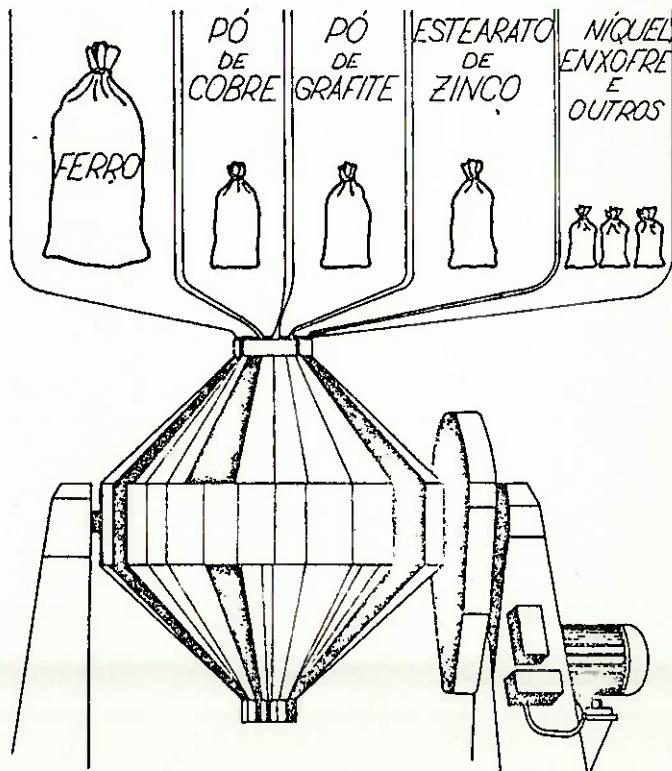
Assumiremos, por exemplo, uma peça feita de ferro com uma resistência à tração de 25 Kg/mm². Com a ajuda de normas como MPIF, DIN e outras, seleciona-se o pó adequado; este último é misturado com lubrificante (por exemplo 0,5% estearato de zinco) e cobre para evitar encolhimento (por exemplo - 1,5%).

Na maioria dos casos a mistura ocorre em misturadores de duplo cone ou similar e além de distribuir homogeneamente os grãos de diferentes formas e tamanhos melhora as características de fluidez e compressibilidade dos pós. (Figura 11).

O tempo de mistura é um dado muito importante, pois após um determinado instante as partículas ficam arredondadas e menos rugosas, o que faz com que os agregados compactados não atinjam o requisito mínimo de resistência a verde (se desfizeram com facilidade).

Depois de completa, a mistura é colocada no reservatório da prensa. Enquanto isto, a ferramenta com alturas de enchimento pré-calculadas foi fixada na prensa e submetida a um teste funcional.

Figura 11



MISTURADOR DE DUPLO CONE

Após a determinação do requisito pressão de compactação a partir da superfície projetada da peça e o ajuste na prensa, a compactação é efetuada com controle manual. As primeiras peças experimentais geralmente variam na densidade e algumas chegam a trincar. Baseando-se em experiências anteriores, deve ser feita uma correção cuidadosa da altura de enchimento de maneira a se obter uma densidade uniforme em todo o compacto e dar ao último as dimensões desejadas. Para este fim, são executadas uma série de tentativas de prensagem, cuja quantidade depende da complexidade do compacto.

O tratamento térmico não é executado antes que o "compacto verde" esteja com suas propriedades totalmente livres de falhas.

Os compactos seguem então sobre bandejas ou caixas para a câmara desengraxante do forno (pré-sinterização) em temperaturas próximas de 500°C, de maneira a facilitar o processo de sinterização. A seguir, as peças seguem para a zona de alta temperatura saindo a seguir pela câmara de resfriamento num estado praticamente frio.

Devido ao fenômeno de variação cristalina dentro do forno, a precisão dimensional das peças sinterizadas após tratamento de sinterização é ainda inadequada e, ainda mais, têm resistências à tração limitadas e seus fatores de elongação são baixos.

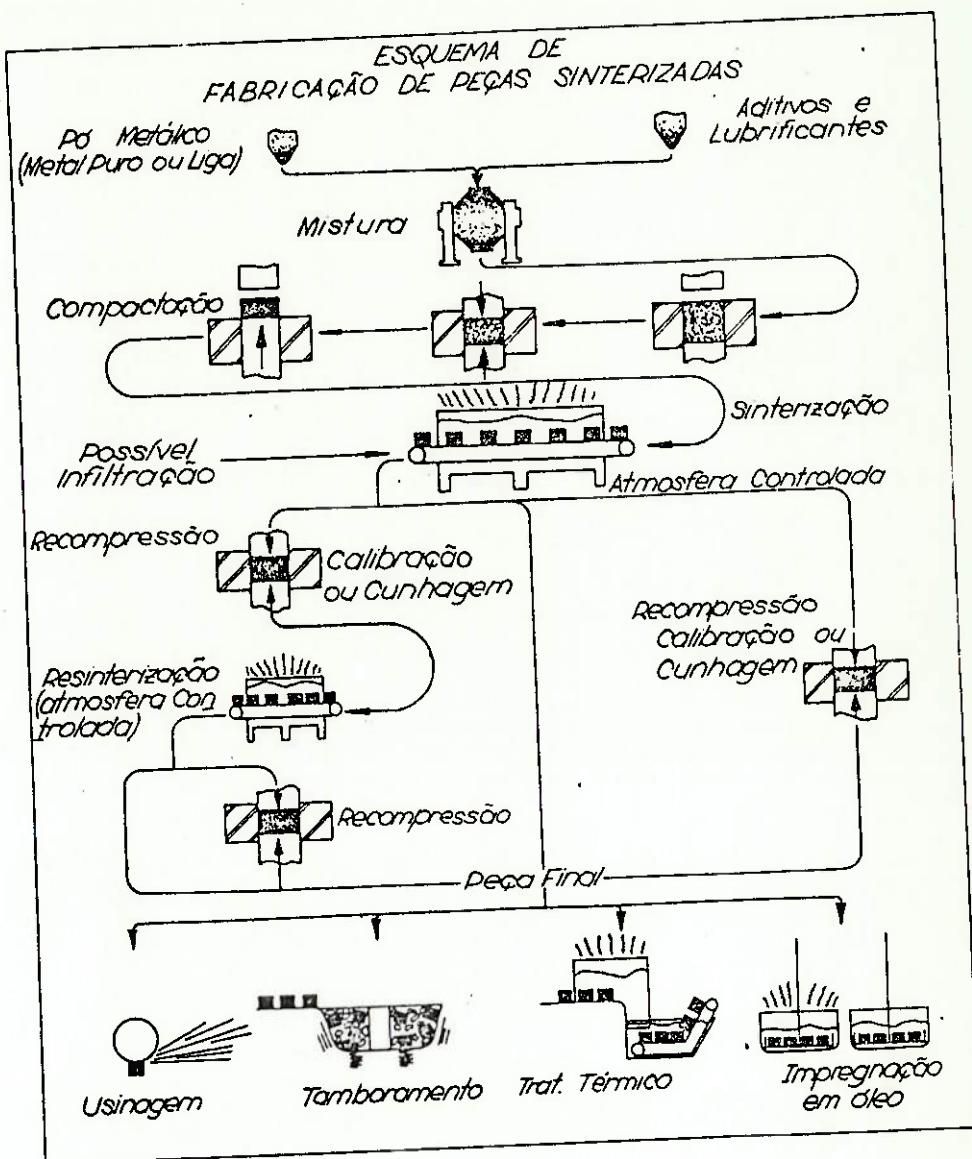
Se mesmo assim forem consideradas adequadas para a aplicação desejada, elas podem ser diretamente usadas. Se for necessário melhorar suas precisões dimensionais, estas deverão ser submetidas à recompressão que não chega a afetar suas propriedades de tração. Na recompressão, as peças são prensadas em moldes fechados e com punções não subdivididos (utilizam-se lubrificantes). As peças adquirem as tolerâncias definitivas, economizando operações de usinagem, ocorrendo simultaneamente um aumento de densidade e alisamento superficial.

A sequência de operações descrita acima é denominada **COMPACTAÇÃO SIMPLES**.

A **COMPACTAÇÃO DUPLA** engloba a recompactação e sinterização da peça e é destinada a melhorar as características físicas da última. Entretanto, recomenda-se executar uma pré-compacting a pressões específicas próximas à de recompactação e uma pré-sinterização sob baixas temperaturas. Após a segun-

da operação normal de sinterização, o componente deixa o forno com o requisito de dureza e fator de elongação maiores. Aqui também as tolerâncias são piores, podendo melhorar consideravelmente pela cunhagem.

Figura 12



O tempo e o trabalho envolvido para a dupla compactação aumenta consideravelmente o custo do produto final que possui características próximas àquelas de metal fundido.

Recentemente, tem sido desenvolvido uma tecnologia que utiliza sinterização a altas temperaturas para se conseguir a densificação. Precisando-se de densidades bem próximas à teórica, emprega-se outros processos como forja de M/P, compactação ou recompactação a quente, etc. Dependendo das exigências, as peças sinterizadas podem ser submetidas a tratamentos posteriores pelos vários métodos descritos na secção.

6. SELEÇÃO DE MATERIAL

6.1 MATERIAIS FERROSOS SINTERIZADOS

Os métodos empregados na fabricação de materiais sinterizados mostram que estes possuem características especiais. Peças produzidas pelo processo de metalurgia do pó e compactadas mesmo com a máxima pressão possível, possuirão sempre um determinado grau de porosidade.

Os dados fornecidos nesta seção são somente elucidativos, podendo ser expandidos bastando para isso consultar o Departamento de Sinterizados COFAP.

6.1.1 DENSIDADE

A maioria das propriedades da peça de M/P estão intimamente relacionadas com sua densidade final. Esta densidade é o peso por unidade de volume da peça expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3). Normalmente a densidade das peças mecânicas e estruturais é tomada numa base seca e desimpregnada, enquanto que a densidade dos mancais é tomada numa base completamente impregnada de óleo.

A densidade pode ser expressa como uma porcentagem da densidade teórica, na qual é definida a relação entre a densidade da peça de M/P e a densidade da mesma em metal forjado. Na prática as peças em M/P que possuem menos que 75% da densidade teórica são consideradas como sendo de baixa densidade; aquelas de 90% são de alta densidade; e aquelas entre estas duas faixas são consideradas como média densidade.

Em geral, peças estruturais e mecânicas possuem densidade variando de 80 para mais de 90%. Muitos mancais auto-lubrificantes tem densidade da ordem de 75% e peças filtrantes tem densidade de 50%.

6.1.2 POROSIDADE

Porosidade é a porcentagem de volume vazio da peça. Ela é o inverso da densidade. Uma peça com 85% da densidade teórica terá 15% de porosidade. A porosidade nas peças de M/P podem se apresentar sob a forma de uma rede de poros interconectados que se estende até a superfície com uma esponja ou como um número de buracos fechados dentro da peça. A porosidade interconectante é importante para a performance dos mancais auto-lubrificantes e faz parte da especificação para estes tipos de materiais.

A porosidade, que é uma característica estrutural única das peças de M/P, é controlável, sendo função da matéria-prima e das técnicas de processo. Peças podem ser produzidas com porosidade uniforme ou com variações de porosidade (e densidade) de uma secção para outra, fornecendo diferentes propriedades.

Como exemplo temos que peças como engrenagens podem ser feitas auto-lubrificantes numa área e ao mesmo tempo densas e duras em outras áreas, através de infiltração de cobre. O método para calcular o volume poroso ou o conteúdo de óleo em componente de M/P também pode ser visto no item (Controle de Qualidade).

6.1.3 PERMEABILIDADE

A habilidade de passar fluidos ou gases, como por exemplo em filtros é uma propriedade única que pode ser projetada nos produtos de M/P. Dependendo das técnicas de conformação e de sintetização, a peça pode adquirir permeabilidade variando entre o fluxo altamente restrito e altamente aberto. As peças podem ser produzidas com partes que separam seletivamente materiais difusos no escoamento de gases ou líquidos, regulando o fluxo e queda de pressão nas linhas de fornecimento; ou atuar como anti-inflamantes pelo resfriamento de gases abaixo das temperaturas de combustão.

6.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Como nos metais forjados e fundidos, a composição da peça de M/P influencia fortemente as propriedades mecânicas. Entretanto, nas peças da M/P existem fatores adicionais (como densidade, tamanho da partícula e do poro, forma e distribuição estendendo-se à sinterização) das quais as propriedades dependem.

Por esta razão, dados sobre as propriedades mecânicas são comumente fornecidos em gráficos mostrando a relação entre a propriedade e a densidade (ou percentual da densidade teórica). Os gráficos ou diagramas representam valores típicos e tendências das propriedades de acordo com a análise química e densidade dos corpos de prova. Os dados obtidos em corpos de prova padronizados não representam necessariamente a performance - precisa da peça em desenvolvimento, porque as variações da densidade na peça e no corpo em teste podem não ser similares. Assim, os dados provenientes de corpos de prova só podem ser considerados como uma avaliação aproximada da performance da peça.

6.1.5 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA

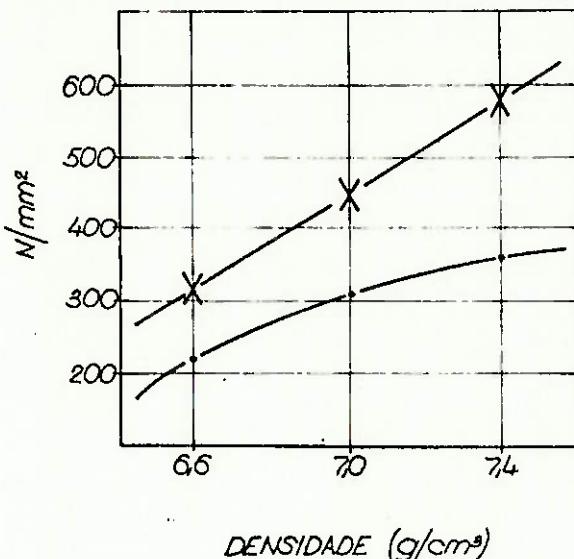
A figura 13 mostra o limite de resistência e o limite de escoamento de um material de M/P compactado e sinterizado com 2% Ni e 0,8%C em função da densidade. O limite de escoamento geralmente de 62% a 98% do limite de resistência é mais próximo da resistência à tração do que para os materiais forjados.

A figura 14 mostra a resistência ao impacto de um material sinterizado com resistência ao impacto aumentando significativamente nas altas densidades e baixos teores de carbono.

Em outras palavras, qualquer porosidade remanescente no material está ligada à perda de resistência da mesma. Este fato mostra alguma indicação dos problemas envolvidos na determinação precisa dos valores físicos de um componente sinterizado em comparação com as peças convencionalmente produzidas.

Figura 13

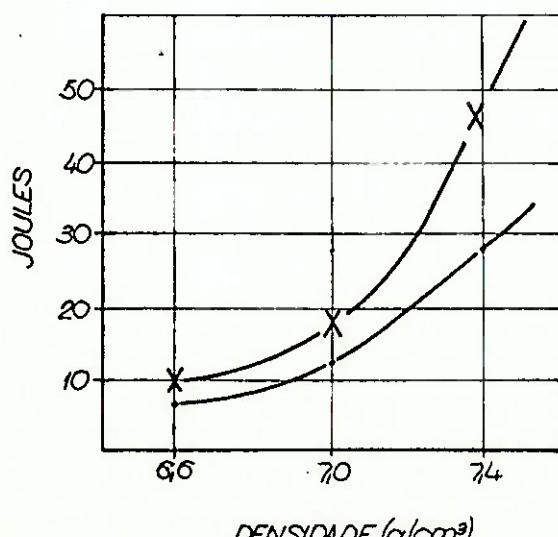
X = Limite de Resistência
 • = 2% ponto de Ruptura



Resistência à Tração e 2% do ponto de Ruptura para o FN 0208 (2% Ni e.8% C), sinterizado.

Resistência à Tração e Ruptura x Densidade

Figura 14 X = FN 0205 (2% Ni e.5% C)
 • = FN 0208 (2% Ni e.8% C)



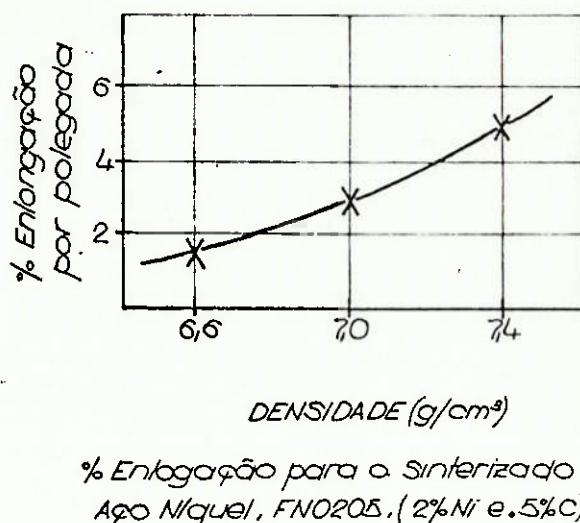
Energia do Impacto de Charpy sem entalhe
 Aço Níquel sinterizado.

Resistência ao Impacto de Charpy x Densidade

6.1.6 DUTILIDADE

Dutilidade (quantidade da deformação plástica) é relativamente baixa nos materiais de M/P, principalmente devido à presença de poros. A dutilida de em função da densidade é ilustrada na figura 15. A elevação é geralmente menor do que 10% para os materiais ferrosos. A dutilidade para a maioria dos materiais de M/P pode ser aumentada consideravelmente pela recompactação (quente ou fria), seguida pela ressinterização.

Figura 15



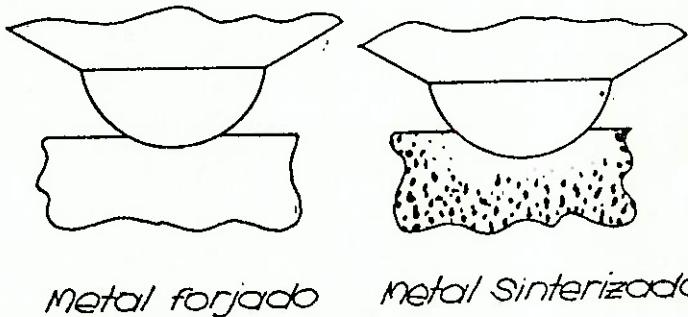
6.1.7 DUREZA (APARENTE)

Quando a dureza determinada pelos métodos convencionais Brinell, Rockwell ou Vickers, o apalpador encontrará uma resistência muito menor no material poroso (figura 16). Consequentemente, os valores medidos pelo teste de dureza no material sinterizado tendem a ser menores que os valores efetivos. Se a dureza medida confrontada com a quantidade de abrasão superficial, o teste pode facilmente levar a conclusões errôneas. Este ponto de vista pode ser compreensível no caso de materiais altamente porosos que contenham carbono. Supondo que se tenha uma bucha de mancal com estrutura de perlita (eutetoide), uma porosidade de 25% e uma dureza medida (segundo Brinell) de 90 Kg/mm² teremos que a dureza do material compacto chega a ser no mínimo 160 Kg/mm² (Brinell). Baseado somente na abrasão, sem con-

siderar qualquer pressão superficial, o alto valor Brinell obtido está mais próximo ao que se apresenta realmente do que o valor baixo da medição. Apesar do estudo profundo desta questão, ainda não foi possível achar, por exemplo, um fator relacionado com o volume de poros que dê uma informação confiável sobre o grau de dureza efetivo. Por enquanto, temos que nos basear em medições comparativas ou complementar as medidas de macro dureza com as de micro dureza ou testes de baixa carga e usar estes dois valores como base para estabelecer a dureza efetiva. É óbvio que o desvio entre a dureza medida e a dureza efetiva diminui proporcionalmente à redução da porosidade, isto é, quanto mais densa é a peça sinterizada, menor será o erro medido. Deve ser observado que o método prático de se converter a dureza Brinell para a resistência à tração (com um fator de 0,32 a 0,35) não é válido para os materiais sinterizados.

Figura 16

Deslocamento do Penetrador na medição de Dureza de Metais forjados e sinterizados



6.1.8 RESISTÊNCIA À CORROSÃO

A porosidade nas peças sinterizadas afeta significativamente a resistência à corrosão, devido ao aprisionamento do meio corrosivo em que a peça se encontra. Detalhes sobre a resistência à corrosão serão vistos nas seções de tratamento térmico e processos de beneficiamento.

6.1.9 ACABAMENTO SUPERFICIAL

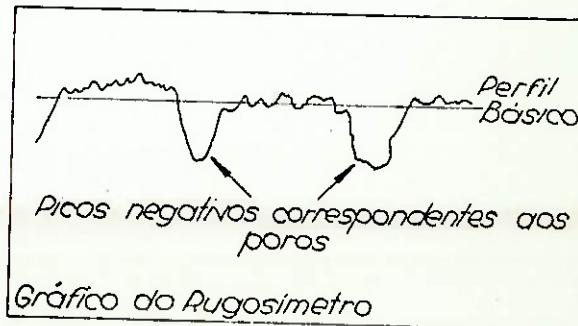
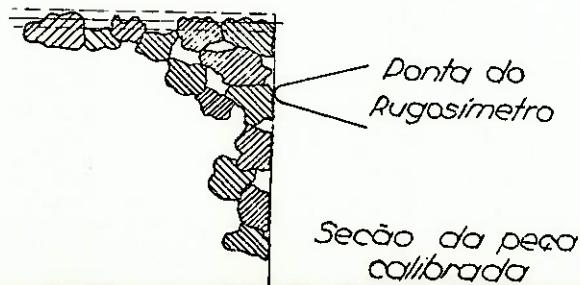
Peças feitas de pó metálico são convertidas por compressão e sinterização num formato que é externamente idêntico ao convencionalmente produzido. Devido à plasticidade do grão de pó individual, a aplicação da pressão faz a superfície da peça adaptar-se ao interior da ferramenta (matriz, punção) e dá ao "compacto verde" uma aparência lisa e de metal limpo. Este acabamento - superficial fica sensivelmente inferior durante a sinterização, especialmente se ocorrer a fase líquida.

Após a sinterização, os componentes moldados possuirão uma aparência metálica de "sinterizado-liso", com profundidade de rugosidade (DIN 4762) - variando entre 10 e 15 μm . Se isso for inadequado, a superfície pode ser "polida" por cunhagem; obtém-se, assim, uma rugosidade com profundidade - de 1 a 2,5 μm , valores que são equivalentes aos obtidos por retificação (DIN 4763). Torna-se - essencial definir aqui, no que diz respeito às peças sinterizadas, o termo "profundidade de rugosidade" que é tão enganoso quanto, por exemplo, dureza. A profundidade de rugosidade não deve - ser interpretada como a profundidade dos poros na superfície do material, mas somente o elemento rugoso acima e além do perfil básico atual. Considerando este aspecto, as peças sinterizadas possuem um tipo de rugosidade mais negativa, parecida com os produtos torneados e plainados, - mas sem as ranhuras características.

Contrastando com isto, a superfície "polida" de uma peça calibrada possui uma rugosidade somente no lado negativo do perfil.

Seção da peça
não calibrada
(Punção Superior)

Figura 17 - MEDAÇÃO DE RUGOSIDADE



Segundo a MPIF, a maneira mais correta de se ter uma verdadeira noção do acabamento superficial é com um apalpador em forma de cunha (pois o apalpador cônico penetra no vão dos poros, medindo variações a nível de partículas). (figuras 18 e 19).

Figura 18

Apalpador em cunha padronizado
para Medir Rugosidade

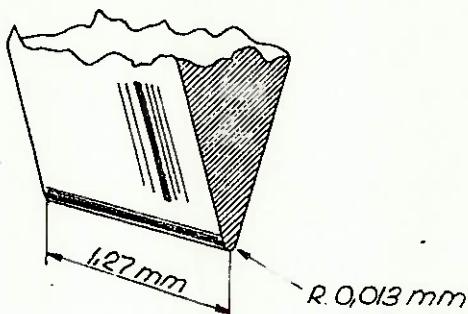
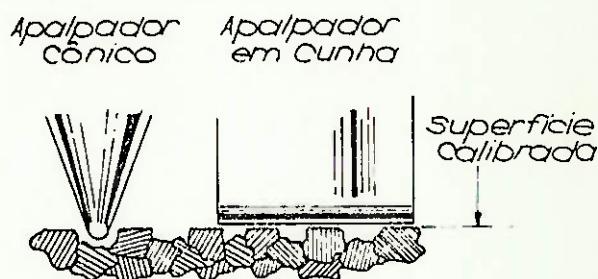


Figura 19



Conclui-se aqui que o aspecto liso da peça pode ser melhorado por operações secundárias como recompactação, brunimento, polimento e retificação.

As marcas frequentemente se acham ao longo da direção de compactação, não constituem uma rugosidade no verdadeiro sentido da palavra. São, na sua maioria, causadas por partículas de pó que aderiram na lateral da matriz; isto produz um risco facilmente visível que, no entanto, não possui as dimensões de um sulco.

Existem, é claro, sulcos verdadeiros que, quando ocorrem indicam que a ferramenta está em estado bem desgastado.

As rebarbas que comumente ocorrem nos cantos das superfícies sinterizadas devem ser aqui também consideradas. A rebarba causada por usinagem difere basicamente da rebarba por sinterizada, pois a primeira é sempre fina na base e pode ser removida facilmente, enquanto que a última tem uma base larga tornando-se, desta maneira, mais difícil de ser eliminada.

A rebarba sinterizada pode ser removida por escovamento ou tamboreamento.

Na maioria dos casos, o tamboreamento não quebra a rebarba, mas simplesmente provoca um desgaste, arredondando-a. Escovamento só elimina rebarbas de usinagem do material.

6.1.10 ISOLAMENTO SONORO

A natureza porosa da peça de M/P provoca um bom amortecimento sonoro. A ressonância, comum nas engrenagens de aço e outras peças, é reduzida devido à densidade controlável nas peças sinterizadas. Esta é uma importante vantagem que as peças sinterizadas possuem que, por isto, tem nas máquinas de escritório uma boa aplicação.

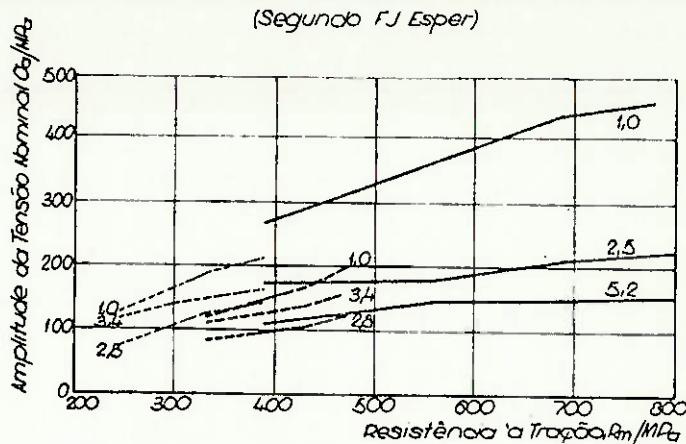
As características de amortecimento sonoro podem ser ainda melhoradas com a impregnação ou infiltração de materiais isolantes. A densidade controlável das peças de M/P é também usada para dissipar e amortecer o barulho em ferramentas móveis a ar comprimido.

6.1.11 RESISTÊNCIA À FADIGA

As peças sinterizadas possuem, nos ensaios de fadiga sem entalhes, uma resistência bem menor do que as dos metais forjados.

Todavia, sabemos que com a introdução de um entalhe no corpo de prova, a resistência à fadiga dos metais forjados cai bastante a ponto de aproximar-se dos valores das peças sinterizadas. Pesquisas recentes indicam que os diferentes tipos de entalhes (fator de entalhe) influenciam pouco a resistência à fadiga dos metais de M/P.

Figura 20
Comparação entre a Resistência
à fadiga dos metais forjados e a dos sinterizados



Os números na figura representam os valores de K_t (fator de entalhe)

— Aços forjados
- - - Fe-Cu-C Aço de M/P
- - - Fe-Cu-Ni Aço de M/P

Carregamento tipo axial
 $R = \frac{V_{min}}{V_{max}}$

$\Delta = 50\%$ (probabilidade de sobrevivência)

$N = 10^5$ ciclos para romper

A figura 20 mostra influência do fator de entalhe.

Notar que:

- para corpos de prova sem entalhes ($K_t=1$) a resistência à fadiga dos aços sinterizados é menor que para os forjados.
- com a introdução do entalhe central ($K_t=2,5$ e $K_t=2,8$) as resistências à fadiga decresce como esperado.
- introduzindo o entalhe de 2 cantos ($K_t=3,4$ e $K_t=5,2$) temos contradietoriamente aos forjados um aumento de resistência à fadiga dos sinterizados.

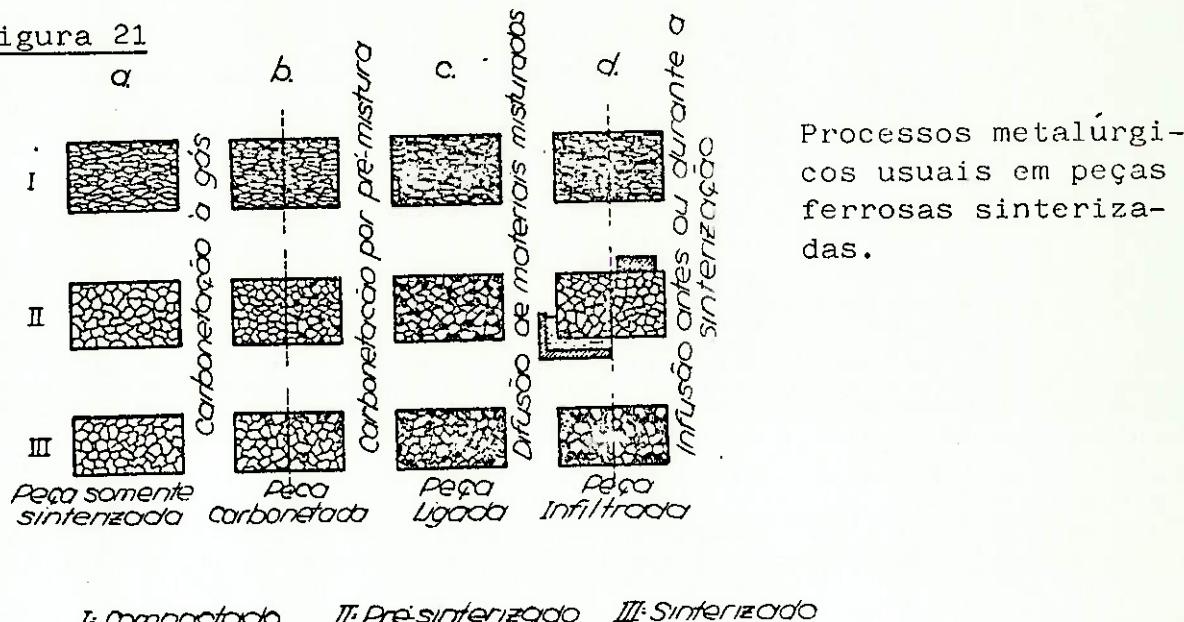
Isto pode ser explicado pela presença determinante da estrutura porosa irregular na raiz do entalhe que tende a homogeneizar os resultados e, - além disto, os poros também atrasam a propagação das trincas.

Na prática, a maioria das peças estruturais possuem entalhes. Isto significa que os valores da resistência à fadiga das peças sinterizadas quando confrontadas com os dos metais forjados ou fundidos (aço nodular) são comparáveis, em muitas situações, especialmente nos casos dos aços de M/P de alta densidade.

6.1.12 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA

Graças à possibilidade de carbonetar o ferro e torná-lo adequado para o endurecimento e têmpera, os materiais sinterizados são tão valiosos quanto os materiais de mesma composição produzidos convencionalmente. Para estas aplicações, o carbono, na forma de grafite, (vide figura 21b) pode ser misturado junto com o pó de ferro, ou a carbonetação pode ser realizada separadamente após a sinterização. O uso de aços finamente ligados é, no entanto, quase fora de questão, já que suas propriedades não plásticas torna-os resistentes ao processo de compactação.

Figura 21



Além da adição de grafite, podem ser incorporados componentes de liga.

Dos elementos mais comumente adicionados ao pó de ferro nos métodos de M/P, destacam-se o grafite, o cobre e o níquel, e enxofre cujas características são mostradas abaixo:

a) Adição de Grafite (1 a 1,5%)

- método mais simples para se fabricar aços-carbonos sinterizados;
- a resistência à tração pode ser aumentada em mais de 100%;
- na maioria dos casos a elongação diminui consideravelmente;
- o grafite utilizado é de alta atividade;
- é considerado como lubrificante útil;

- a adição depende das perdas durante a sinterização e da quantidade final de carbono de sejada;
- em peças pequenas pode ser substituído por atmosfera carbonetante ou cementação.

b) Adição de Cobre

- os sistemas Fe-Cu e Fe-Cu-C oferecem valiosas propriedades físicas controláveis nos - produtos acabados;
- a resistência à ruptura transversal aumenta com a adição de cobre;
- a resistência ao impacto decresce rapidamente quando se aumenta a adição do cobre - principalmente em altas densidades);
- provoca crescimento excessivo;
- aumenta a maleabilidade;
- provoca crescimento dependendo da natureza e do tamanho do grão de pó de cobre.

c) Adição de Enxofre

- acelera bastante o processo de sinterização, sendo útil na usinagem;
- aumenta consideravelmente a resistência, - mas tornam o material frágil;
- é barato e, quando materiais frágeis podem ser tolerados a adição se torna prática, - além de econômica;
- durante a sinterização, o aditivo funde e reage com o metal;
- deve ser notada sua ação corrosiva sobre as resistências e nos isolantes térmicos do - forno, devendo-se tomar precauções durante a sinterização.

d) Adição de Níquel

- o níquel pode parecer um aditivo ideal de - liga devido a sua baixa afinidade com o oxigênio (não oxida), entretanto se difunde muito lentamente no ferro;
- os pó de níquel e de ferro devem ser bem finos;
- os tempos de sinterização deve ser mais longos (1 ou 2 horas) para aumentar a homogeneidade;
- o "níquel-carbonilo" é importante na fabricação em massa de peças pequenas com alta qualidade;
- melhora as propriedades mecânicas e a temperabilidade.

7. OPERAÇÕES SUBSEQUENTES NAS PEÇAS SINTERIZADAS

7.1 MELHORAMENTO DO MATERIAL

7.1.1 INFILTRAÇÃO

O processo de infiltração (figura 21 d); em esqueleto poroso compactado em sinterizado é preenchido com metal não ferroso (cobre, latão, Cu-Mn-Fe). Com isso, obtém-se componentes de alta densidade, de grande resistência que, entretanto, não são metalurgicamente uniformes. A infiltração tem por intuito eliminar certas desvantagens do processo de sinterização relacionados com a porosidade. O método, embora bem sucedido, apresenta alguns efeitos negativos, como grande variação dimensional, custo elevado devido à necessidade de compactar as pastilhas e o esqueleto. Este processo tem uma aplicação importante na fabricação de peças absolutamente seladas contra água, óleo e ar.

O método de infiltração exige um esqueleto de ferro compactado ou pré-sinterizado de baixa ou média densidade (5,6 até 6,8 g/cm³). Uma pastilha compactada de material não ferroso, com volume correspondente ao volume de poros do esqueleto metálico é colocado sobre o último e ambos passam, então, através do forno de sinterização (figura 22 a). Quando se atinge a zona de alta temperatura do forno, o metal não ferroso se funde e, devido à menor tensão superficial e ao efeito de capilaridade, penetra na peça sinterizada até o ponto de saturação absoluta. Devido à alta temperatura ocorre a difusão do metal não ferroso no ferro, sem ter, entretanto, o efeito completo de homogeneização.

Após este tratamento, a peça consiste de uma fase rica em Fe (matriz) e outra rica em Cu (interligação), permitindo endurecimento por dispersão.

É possível efetuar uma infiltração parcial, mas somente numa extensão limitada. Usa-se este procedimento para se obter uma variação seletiva de propriedades como baixas densidades e altas resistências no mesmo componente (engrenagem com dentes duros e infiltrados com Cu com cubo autolubrificante).

O método de infiltração (figura 22 b) evita a aderência de impurezas do infiltrante na peça como também facilita a infiltração parcial.

Figura 22

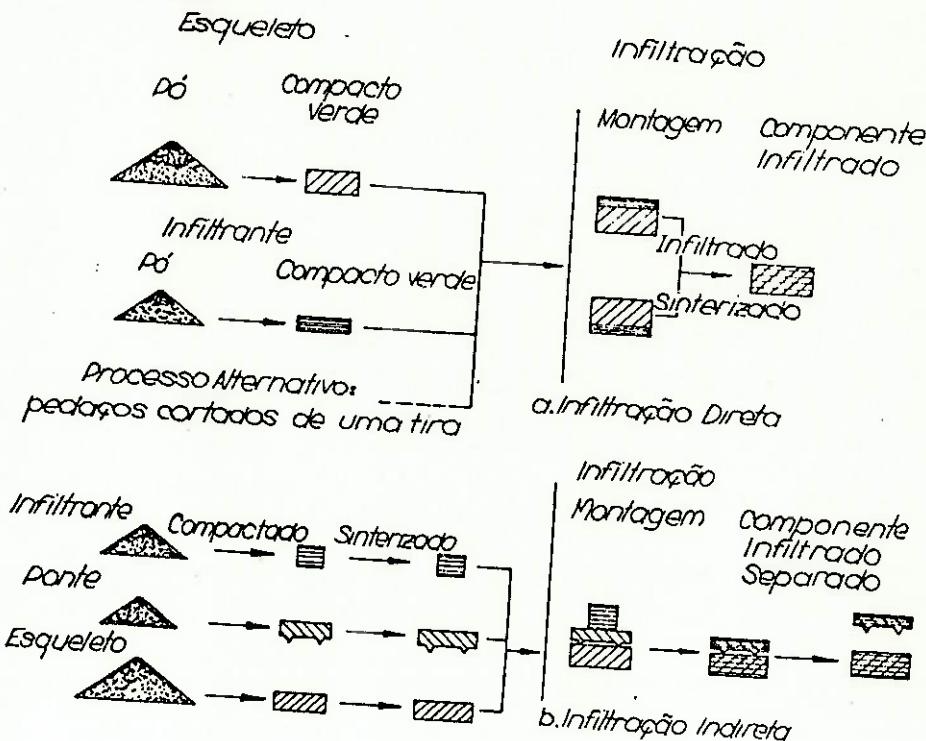


Diagrama mostrando as sequências de operação para infiltração direta e indireta

7.1.2 IMPREGNAÇÃO

Objetivos:

- Aproveitar a porosidade natural da peça sintetizada para impregnar com substâncias como óleos, graxas, impermeabilizantes, etc, evitando temporariamente a corrosão.
- Proteger contra a oxidação por impregnação com óleo, principalmente no caso de outras aplicações superficiais, metálicas ou sólidas, serem impraticáveis.

Procedimento (Impregnação com óleo)

• Existem três métodos básicos, que são o de banho quente e frio, o de banho parcial da peça e o método vácuo.

.. O método de banho quente e frio é o mais comum. Por este método a peça é submetida a vários banhos consecutivos em diferentes temperaturas. Este método tem a intenção de remover as inclusões de ar peça variação conjunta da viscosidade do óleo e da expansão (contração) do ar (nos poros) e do corpo sinterizado.

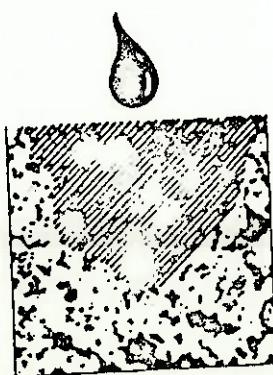
.. no método de imersão rasa a peça é parcialmente submersa no óleo que penetra na peça por ação capilar. O método é efetivo, mas lento. Na parte superior da peça o ar sai na medida que o óleo sobe, mas na parte submersa pode acontecer de bolhas de ar ficarem completamente fechadas pelo óleo.

.. no método de vácuo as peças são colocadas numa câmara de vácuo onde, após retirado todo o ar da mesma, abre-se uma válvula que permite a entrada de óleo que submerge totalmente as peças. Possui desvantagens em relação ao método dos banhos quente e frio, pois os componentes de baixa viscosidade do óleo vaporizam-se deixando-o mais viscoso. O efeito de lavagem no primeiro método (movimentação do óleo para dentro e para fora) inexistente neste método (o óleo penetra de fora para dentro).

Variáveis

Na impregnação com óleo, a porosidade interligada é de importância relevante. Somente com todos os poros abertos (comunicante com a superfície) teremos uma impregnação completa.

Figura 23



Impregnação com Óleo

7.1.3 IMPREGNAÇÃO GALVÂNICA DE CAMADAS METÁLICAS

Objetivo:

- Melhorar a resistência à corrosão e o aspecto superficial.
- Melhorar a resistência ao desgaste e proporcionar a dureza desejada.
- Aumentar a condutibilidade (útil em soldas).

Procedimento:

- Inicialmente as peças devem ter seus poros externos fechados de modo a evitar que as soluções empregadas deixem depósitos salinos no interior das peças, conduzindo futuramente à corrosão.
- Neste parágrafo estão relacionados os métodos de fechamento de poros aplicáveis comumente à galvanização. Pede-se adotar o tratamento de vapor mencionado no item 7.3 ou adição de enxofre na mistura: o pó de enxofre (2,5% da mistura) durante a sinterização forma sulfeto de ferro líquido, que arredonda e fecha os canais. O método de infiltração com cobre costuma ser inviável pelo seu alto custo.
- As peças tratadas pelos métodos acima podem receber uma camada galvânica desde que suas superfícies estejam metalicamente lisas. No caso de peças tratadas por vapor, o alisamento pode ser conseguido por meio de uma decapagem imediatamente anterior à galvanização.

Variáveis:

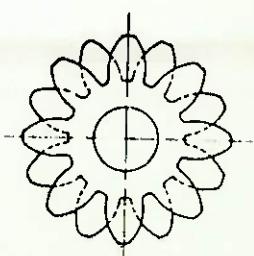
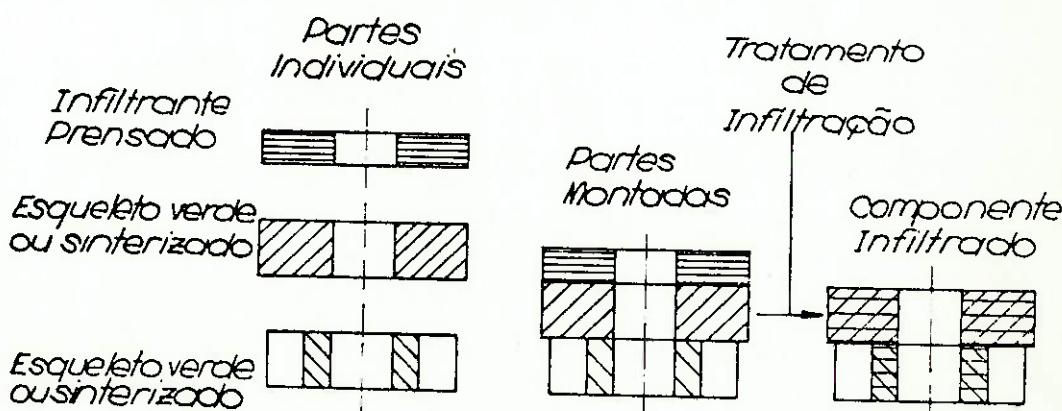
- Cromo é aplicado para fins decorativos.
- Cromo duro confere dureza, resistência ao desgaste e ao calor.
- Níquel (pode ser aplicado sobre pré-revestimento de cobre) confere resistência ao desgaste e à corrosão.

- Cádmio possui baixo coeficiente de atrito e é utilizado para operações de solda fraca (baixa dureza).
- Zinco é o revestimento de custo inferior, mas confere ótimas propriedades anticorrosivas - apesar de sua baixa dureza.

7.1.4 MÉTODOS DE UNIÃO DE PEÇAS SINTERIZADAS

As peças sinterizadas podem ser permanentemente soldadas com outros tipos de componentes, sendo que isto é provocado por aquecimento (sinterização conjunta), soldagem, caldeamento ou adesão. No primeiro método é utilizado o efeito da variação dimensional entre duas peças ou dois componentes moldados. Se, por exemplo, um inserto cilíndrico deve ser unido a outro componente, o primeiro é colocado no encaixe apropriado e ambas as partes são submetidas ao aquecimento; isto causa ligação rígida e permanente. No caso de componentes planos, um pó não ferroso compactado (geralmente cobre ou bronze) é colocado sobre as peças a serem soldadas. Durante a sinterização o metal não ferroso se funde sendo absorvido pela superfície do material, devido à sua menor tensão superficial, acabando por unir as peças.

Figura 24 Diagrama Ilustrativo da Fabricação de engrenagens composta por Infiltração



O método de soldagem é feito colocando um material não ferroso adequado (solda) entre as peças seguido de simples aquecimento.

No método acima (soldagem), deve-se tomar cuidado para que a temperatura fique apenas ligeiramente acima do ponto de fusão, para que o material da solda não acabe se difundindo através das porosidades da peça sinterizada. Por esta razão torna-se preferível o uso de soldas de aquecimento localizado como solda por resistência (de ponto).

7.2 RETRABALHO COM FORMAÇÃO DE CAVACOS

A necessidade de várias operações de usinagem em uma peça sinterizada tende a inviabilizar economicamente o próprio processo de sinterização. Contudo, podem ser considerados econômicos os casos de retrabalho quando são necessários furos transversais, rebaixos, altas tolerâncias ou qualidades superficiais.

Os metais sinterizados não possuem usinabilidade tão boa quanto os metais fundidos. Devem ser criteriosas a seleção do material e a aplicação das condições de usinagem de modo a obter boas qualidades superficial e precisão dimensional além de elevar a durabilidade das ferramentas.

Assim, as principais variáveis que influenciam as características usinabilidade são:

- a) Composição favorável da liga do material a ser usinado (bom exemplo: as ligas de Fe-Cu Sinterizadas a 103°C). Um exemplo de material que apresenta características extremamente desfavoráveis de usinabilidade é o ferro não ligado.
- b) A densidade, ou seja, a natureza porosa dos materiais sinterizados de baixa densidade afeta a ferramenta de corte da seguinte maneira:
 - a ponta da ferramenta ao passar alternadamente no metal e nos poros está sujeita a choques - contínuos.
 - a estrutura porosa faz com que o material cortado forme cavacos pequenos.

se o material ficar oxidado não será possível, como nos materiais fundidos, penetrar (na usinagem) abaixo da camada oxidada, pois em sintetizados de baixa densidade a oxidação se estende em toda a secção interna da peça.

Nestas circunstâncias a ferramenta estará sujeita a maior abrasão e tende a desgastar-se rapidamente.

- c) A adição de compostos pode facilitar a usinagem. Como exemplo, temos a adição de enxofre e as ligas de Fe-Cu-Sn que geram bons cavacos de fita.
- d) Temperaturas e atmosferas de sinterização afetam o processo de usinagem. A temperatura afeta a densidade final da peça enquanto que uma atmosfera, por exemplo, rica em nitrogênio forma nitretos que por serem duros dificultam demasiadamente a usinagem.
- e) Lubrificantes não são usados normalmente, pois provocam o acúmulo dos cavacos pequenos, formando uma "pasta" que adere na ferramenta, prejudicando a usinagem. Casos onde lubrificação é imprescindível, devem ser estudadosmeticulosamente.

DADOS PARA RETRABALHO

FURAR:

MATERIAL	VELOCIDADE DE CORTE (M/MIN.)	HÉLICE DA BROCA	Ø DA BROCA EM MM			
			Ø 2	Ø 6	Ø 10	Ø 20
			AVANÇO (MM/ROTAÇÃO)			
sem carbono	10 - 15	40°	0,05	0,12	0,20	0,30
com carbono	15 - 20	28°	0,04	0,08	0,12	0,22
com enxofre	30 - 40	28°	0,04	0,08	0,12	0,22

Obs.: A saída da broca deve ser lenta para evitar quebras nas bordas.

Recomenda-se brocas de aço rápido (HSS) ou metal duro.

TORNEAR:

OPERAÇÃO	VELOCIDADE (M/MIN)	AVANÇO (MM/ROTAÇÃO)	ÂNGULO DE FOLGA	PROF. DE CORTE (MM)	ÂNGULO DE SAÍDA
				DESBASTE	ACABAMENTO
desbaste	mín. 150	0,3	5° - 10°	0,3	6° - 10°
acabamento	mín. 150	0,1	5° - 10°	0,1	6° - 20°

Obs.: Materiais mais macios implicam em maiores ângulos de saída.

Recomenda-se ferramentas de metal duro (K10, P10).

FRESAR: (dados obtidos em peças de média-alta e alta densidade)

FRESA	VELOCIDADE DE CORTE (MM/MIN)	AVANÇO (MM/ROTAÇÃO)	PROFUNDIDADE DO CORTE	
			DESBASTE	ACABAMENTO
aço rápido (HSS)	30 - 50	0,01 - 0,02	6 mm	1 mm
metal duro (K10-P10)	100 - 200	0,02 - 0,04	6 mm	1 mm

RETIFICAR:

OPERAÇÃO	GRANULAÇÃO	DUREZA	VELOCIDADE TRANSVERSAL MÁX. (DE POSÍVEL)	VELOCIDADE PERIFÉRICA DO REBOLO	PROFUND. DO CORTE (MM)
retífica cilíndrica	60 80 100	K I J	35 m/min.	35 m/min.	0,01-0,05
retífica plana	46 60 80	K J I	20 m/min.	35 m/min	0,005-0,01

BRUNIR:

A velocidade eficaz de corte situa-se entre 20 e 35 m/min. e um pouco maior na etapa de acabamento.

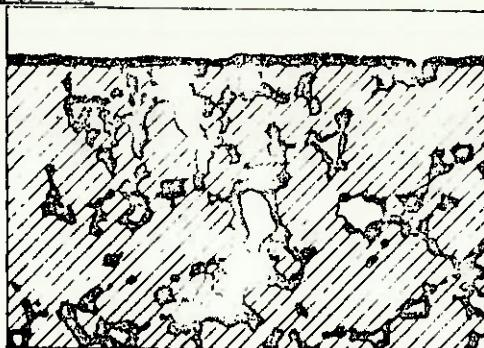
Metais temperados necessitam brunidores revestidos com diamantes.

Recomenda-se uma boa lavagem após o brunimento, pois o pó abrasivo deposita-se facilmente nos poros.

7.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

TEMPERA	CEMENTAÇÃO	CARBO-NITRETAÇÃO	TRATAMENTO A VAPOR (Fig. 25)
OBJETIVOS	PROCEDIMENTO	VARIAVELIS E CONSIDERAÇOES	
<ul style="list-style-type: none"> - aplica-se em peças com teor de C > 0,38 - pode aumentar em 70% a resistência a fadiga. - pode aumentar resistência à tração (entre 50 e 200%). - pode diminuir alongamento (até 25%). 	<ul style="list-style-type: none"> - alterar a composição química do material por difusão de um ou mais elementos (tratamento termo-químico). - melhorar (junto com a tempera) o comportamento ao desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> - técnica mais usada para obter apena nas endurecimento superficial (para peças com densidade $> 7,0 \text{ g/cm}^3$) - obtém-se dureza maior e mais uniforme. - dar melhor resistência ao desgaste devido à presença de nitretos (partículas duras). - aumentar a resistência estática à flexão 	<ul style="list-style-type: none"> - aplicar em todas as superfícies expostas da peça sinterizada uma camada de óxido na forma estável (Fe₃ e O₄) - aumentar a dureza superficial (devido às características do óxido) conferindo resistência ao desgaste. - diminuição da porosidade interligada e consequente aumento da resistência à corrosão. Isto porque o óxido preenche internamente os poros e canais. - as peças isentas de oleosidade são aquecidas em cestas dentro de um forno com circulação forçada de atmosférica. - o vapor é introduzido após as peças sofrerem pré-aquecimento até (370°C) de modo a evitar condensação da água nas peças. O ar é purgado. - a temperatura sobe até 570°C com o vapor circulando sempre. - após ≈ 2 horas as peças são retiradas e resfriadas com ar.
<ul style="list-style-type: none"> - aquece-se a peça por pouco tempo sob a influência de gás portador e aplica-se resfriamento rápido. - pode-se aplicar temperatura imediatamente após a peça cair da câmara de alta temperatura no forno de sinterização - o resfriamento em óleo em peças até média densidade é preferido pois, óleos nos poros é vita corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> - a peça é mantida em contato com um agente carbonetante à temperaturas médias de 900°C - utiliza-se uma atmosfera endotérmica enriquecida de gás natural ou propano. - o processo é via fase gasosa já que facilita o controle da composição química do agente carbonetante (propano + ar). 	<ul style="list-style-type: none"> - a peça a ser tratada é simultaneamente enriquecida com carbono e nitrogênio proveniente de atmosfera do forno (gás carbonetante + amônia). - processo semelhante ao da camentação mas com temperaturas na faixa de 840°C 	<ul style="list-style-type: none"> - as mesmas considerações quanto a densidade da peça comentada servem para peças carbonetadas. - para as mesmas condições de temperatura a camentação produz uma camada superficial ligeiramente superior à obtida pela carbonitretação, pois o nitrogênio retardaria a penetração de carbono.
<ul style="list-style-type: none"> - pode-se obter endurecimento total (de fora a fora) na peça tratada. - deve-se aplicar revertemento após a tempera de modo a aliviar as tensões internas e obter propriedades desejadas - é impossível evitar deformação (tolerância até JT9 ou JT10) 	<ul style="list-style-type: none"> - normalmente densidades $< 7,1 \text{ g/cm}^3$ asseguram um endurecimento de forma à flora. - peças de densidades superiores a 7,1 g/cm³ é possível manter uma profundidade definida de carbonetação diminuindo a variação dimensional da peça. - as propriedades finais da camada dependem da temperatura, do tempo de tratamento e da densidade (ou porosidade) da peça. 		<ul style="list-style-type: none"> - o processo, devido a baixas temperaturas de tratamento, mostra reduzida deformação dimensional na peça. - pode-se, após este tratamento, impregnar as peças com óleo melhoreando a resistência à corrosão e desgaste. - maior porosidade implica em maior penetração e formação de óxido que endurecerá globalmente a peça. - o processo prejudica a propriedade de resistência à tração, ao impacto e a dutilidade.

Figura 25

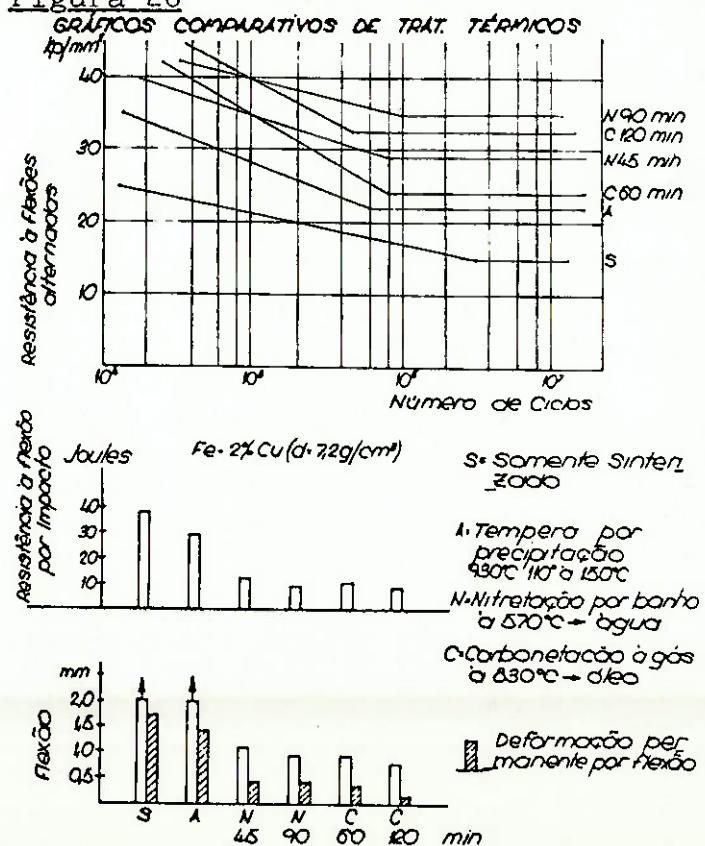


*Tratamento de Vapor d'água (Ferrox)
em peças sinterizados*

Notar na figura acima que o ferrox (em preto) está selando o contorno externo e interno dos poros nas peças, diminuindo a porosidade interligada.

Na figura abaixo temos três gráficos comparativos de resistência à fadiga, ensaio de charpy e elongação (elástica e plástica) para diferentes tratamentos térmicos aplicados a um corpo de prova de Fe-Cu (2% de cobre) e densidade $7,2 \text{ g/cm}^3$.

Figura 26



7.4 TAMBOREAMENTO

Objetivo:

- Eliminar rebarbas de peças usinadas e conferir textura superficial macia à peça.

Procedimento:

- Utiliza-se equipamento convencional para esta operação.
- Empregam-se no tamboreamento bolas de pedra ou de material cerâmico e ainda pasta à base de água.
- Após a operação deve-se secar rapidamente as peças - de modo a evitar que a umidade provoque corrosão, com óleo repelente à umidade.

8. CONTROLE DE QUALIDADE DE PEÇAS SINTERIZADAS

As peças sinterizadas costumam ter boa homogeneidade dentro de um mesmo lote. Haja visto esta característica, aplique-se largamente o controle estatístico às mesmas.

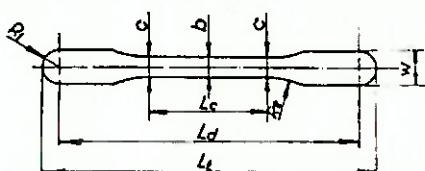
Características próprias das peças de M/P levam a ensaiá-las de modo diferente dos testes convencionais.

Comumente, as peças de pequenas dimensões não se permitem ensaios de resistências à tração, tenacidade e desgaste. Em casos como estes, recomenda-se que os ensaios sejam efetuados em corpos de prova de formato padronizado (vide figura 27) fabricados com o mesmo material e densidade das peças. Nestes casos, deve-se considerar o efeito que a variação de densidade ao longo de uma mesma peça causa em suas propriedades.

Já os testes de dureza e densidade podem ser aplicados diretamente nas peças.

Os testes de dureza já foram vistos no item 6.1.7.

Ensaio de porosidade e densidade são uma sequência de pesagens da peça ao ar e submersa em água. Se a peça for imersa no óleo antes de se efetuar a pesagem na água, resultam dados úteis para o cálculo da porosidade interligada. (Fig. 28).

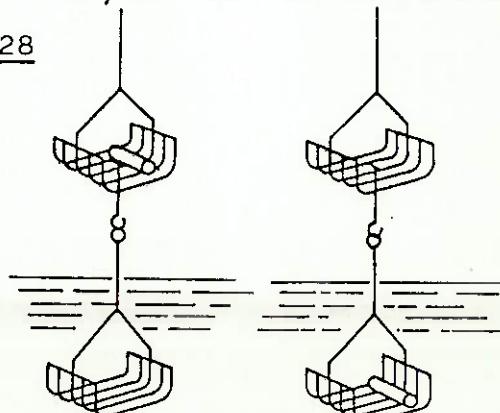


b	c	L_c	L_d	L	w	R_i	R_d
570	$b+0,25$	32	81,0	89,7	87	4,35	25
1002		$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$			

Figura 27 corpo de prova para
ensaio de tração

Medição de Densidades

Figura 28



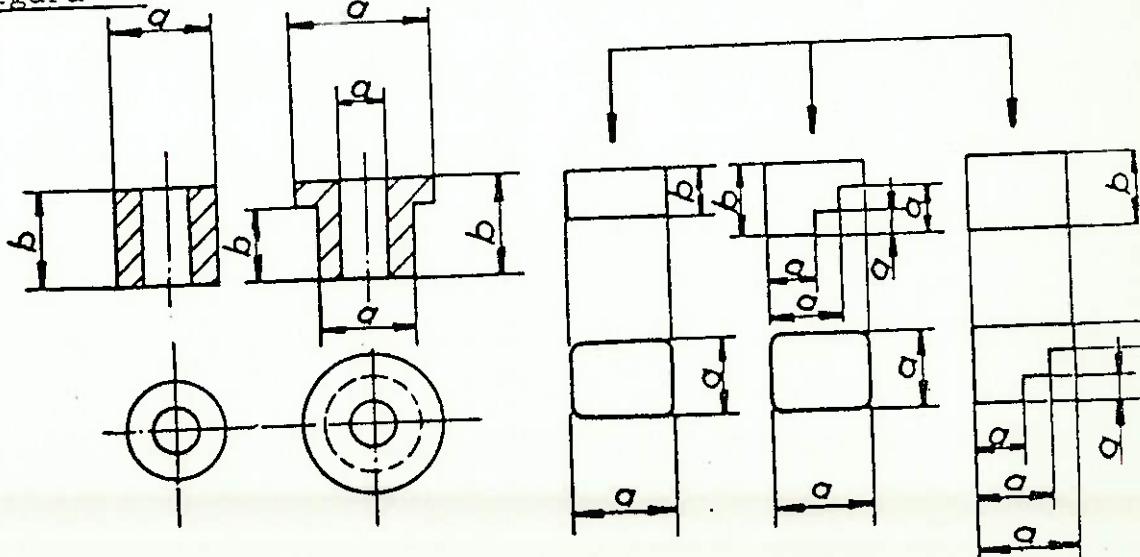
a) Pesando ao ar b) Pesando em água
Arranjo para Teste

9. PROJETO DE PEÇAS

9.1 TOLERÂNCIAS E PRECISÃO DIMENSIONAL DAS PEÇAS SINTERIZADAS

Os comentários acima sobre a qualidade superficial das peças de M/P também se aplicam ao grau de precisão dimensional alcançável. Este fator depende inicialmente do projeto da ferramenta de compactação e também do controle da variação dimensional durante a sinterização. Devido ao fato que o contorno lateral formado pela matriz durante a compactação tem forma mais precisa (dimensões tipo "a" da figura 29) do que as dimensões verticais "abertas" ou alturas (tipo "b" da figura 29) formadas pelos punções superior e inferior, a precisão dimensional de um componente moldado é inicialmente determinada pela posição do compacto na ferramenta. Em geral, as alturas obtidas durante a compactação vertical "b" são menos precisas do que as dimensões horizontais "a" formadas pela matriz (diâmetro da bucha, etc). Além do mais, a porcentagem de variação durante a sinterização varia para cada dimensão, de tal maneira que o tamanho da ferramenta deve ser calculado de antemão numa base empírica. Quando ocorre, por exemplo, um crescimento; este pode ser considerado como uma ampliação proporcional ou "fotográfica" (mudanças de escala)

Figura 29



Pelo que já foi dito, torna-se patente que as dimensões das peças sinterizadas são influenciadas por dois fatores principais, o próprio tamanho da ferramenta e a variação na sinterização. Ambos os fatores podem ser tidos sob controle, permitindo que a peça tenha precisão dimensional depois da compactação e da sinterização. Se este não for o caso, a peça deverá ser calibrada (isto é, recomprimida). Após esta operação adicional, a precisão dimensional da peça sinterizada é suficientemente alta para satisfazer a maioria das especificações de montagem. O processo de dupla compactação, isto é, recompactação e resinterização para aumentar a resistência das peças, deve ser também seguida de calibragem quando as exigências dimensionais a tornarem necessária.

Deve-se sempre tomar cuidado com o tratamento térmico posterior à correção da precisão dimensional. A cunhagem deve ser a operação final do ciclo de produção, caso se deseje que seja mantido o requisito da precisão dimensional.

Abaixo, estão resumidos os principais fatores que afetam as tolerâncias:

a) Pó de Metal

Os materiais diferem entre si na quantidade em que são afetados por variações do tempo, temperatura e atmosferas de sinterização, bem como por variações na densidade e na composição química.

b) Tamanho Dimensional

Como a estabilidade dimensional é uma mudança proporcional, as peças grandes terão uma variação dimensional maior do que as peças pequenas.

c) Desgaste das Ferramentas

O desgaste das ferramentas é normalmente afetado pelo material da ferramenta e pelo número de peças produzidas. Quando a ferramenta sofre desgaste, as dimensões externas das peças se tornam maiores e as internas menores.

d) Tolerância de Concentricidade

A tolerância de concentricidade em peças furadas como é o caso de engrenagens, é afetada não só pela precisão da matriz mas também pela folga necessária entre as partes móveis das ferramentas. Em peças redondas achatadas, com um furo centrado uma concentricidade de 0,075mm deve ser esperada antes de quaisquer fatores como desgaste da ferramenta ou variações dimensionais na sinterização sejam considerados. Peças com cubos ou rebaixos múltiplos em que são usadas várias partes concêntricas na ferramenta, a tolerância inicial para a concentricidade deve ser maior. As mesmas considerações servem para tolerâncias furo a furo por causa da folga de movimentação necessária nas ferramentas.

e) Tratamento Térmico

Assim como nas peças forjadas, o tratamento térmico das peças sinterizadas pode causar mudanças dimensionais. A mudança das medidas tende a ser maior nas peças de baixa densidade, pois a atmosfera de tratamento térmico penetra mais profunda e rapidamente.

f) Calibração e Recompação

Tolerâncias mais estreitas podem ser obtidas pela calibração ou pela recompação das peças. A calibração não fecha necessariamente os poros das peças (de média e baixa densidade) que se destinam a ser auto-lubrificantes. Um aumento da densidade reduz a capacidade de retenção de óleo.

TOLERÂNCIAS PARA AS CLASSES DIMENSIONAIS "a" e "b"
COMO DEFINIDAS NA FIGURA 29

Operação Final	classe dimensional de acordo com a fig.	Precisão dimensional expressa como: 1. normas de tolerância europeia (IT). 2. convertida p/ microns	Limites/graus de precisão normalmente atingidos		
			Estreita	Média	Larga
Calibração, cunhagem e possível endurecimento por <u>precipitação</u>	a)	1. IT 2. Microns (de 18-30mm)	IT 6 13	IT 9 52	- -
	b)	1. IT 2. Microns (de 18-30mm)	- -	IT 8 33	IT 11 130
Sinterização	a)	1. IT 2. Microns (de 18-30mm)	- -	IT 9 52	IT 12 210
	b)	1. IT 2. Microns (de 18-30mm)	- -	IT 10 84	IT 14 520
Endurecimento por camada	a)	1. IT 2. Microns (de 18-30mm)	- -	IT 9 52	IT 14 520
	b)	1. IT 2. Microns (de 18-30mm)	- -	IT 11 130	IT 14 520

Obs.: Deve ser notado que as tolerâncias mais estreitas são obtidas se a última operação for cunhagem. De outro modo as tolerâncias variam entre me dia e larga.

9.2 REGRAS PARA O PROJETO DAS PEÇAS SINTERIZADAS

Regra nº 1

A forma da peça deve permitir a sua retirada da matriz. Por exemplo, não podem ser moldados rebaixos (nem orifícios) no sentido transversal à direção de compactação (desenho A), ocorrendo o mesmo com conicidades reversas (desenho B).

Recartilhados (desenho C) não podem ser obtidos, mas bordas dentadas (c) sim. O mesmo se aplica as roscas, que devem ser usinadas posteriormente.

Regra nº 2

A forma da peça deve ser tal que não deva exigir do pó escoar em paredes finas, cantos vivos ou peculiaridades semelhantes.

Paredes finas devem ser evitadas, pois dificultam o escoamento do pó. Do mesmo modo deve ser evitado cantos vivos, moldando-se as peças com curvas ou raios de concordância. Finalmente, deve-se evitar mudanças bruscas na espessura das paredes, pois, do contrário, pode ocorrer empenamento durante a sinterização.

Regra nº 3

A forma da peça deve possibilitar a confecção de matrizes robustas.

Peças de contornos semi-toroidais, semi-esféricos ou cônicos devem conter lateralmente um "degrau" para aumentar a robustez dos elementos da ferramenta (Desenhos M e N).

Os chanfros devem ser menores de 45°. Machos muito finos tendem a quebrar mais facilmente, devendo, deste modo, evitar-se pequenos orifícios. Não deve haver choques entre as partes móveis do ferramental (Desenho O).

Regra nº 4

A forma da peça deve ser tal que o seu comprimento não seja muito superior à secção transversal.

O comprimento da bucha não deve ser superior a 2,5 vezes o diâmetro da peça.

Se as paredes forem mais espessas esta relação pode ser ampliada para até 4 vezes ou mais (Desenho P).

Regra nº 5

A peça deve ser projetada de modo a evitar um número exagerado de níveis e diâmetros.

A uniformidade da densidade e, em consequência, da resistência mecânica aumenta inversamente ao número de níveis.

Em muitos casos recomenda-se usinagem posterior (Desenho O).

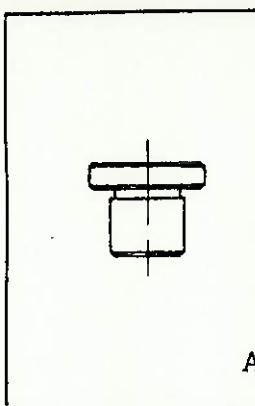
Regra nº 6

Aproveite-se o fato de que certas formas podem ser obtidas por metalurgia do pó mais economicamente, porque são difíceis ou impossíveis de se obter pelos métodos de usinagem convencionais.

Exemplo: engrenagem com involutas verdadeiras; do mesmo modo, chavetas e rasgos de chavetas para engrenagens, polias, buchas, etc, podem ser eliminados, pois a forma da chaveta pode ser parte integral das peças (Desenho R).

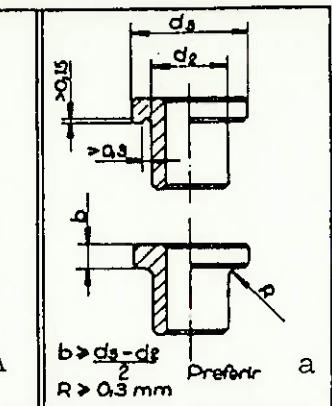
Observações:

Indesejável



A

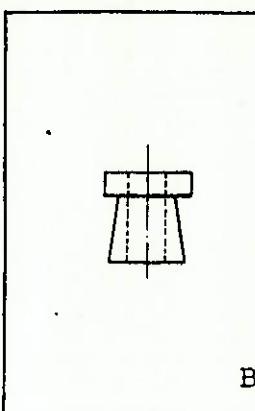
Preferível


Regra nº 1

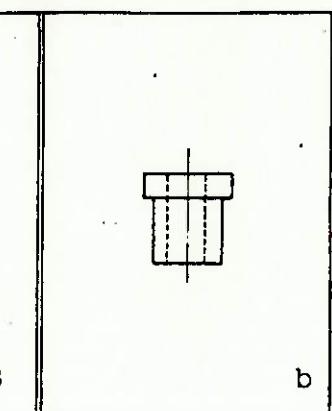
Rebaixos não podem ser mol-
dados no sentido transversal
ao sentido de compactação.

Opções:

- rebaixo no sentido da pren-
sagem;
- raio de concordância (mais
robusto).

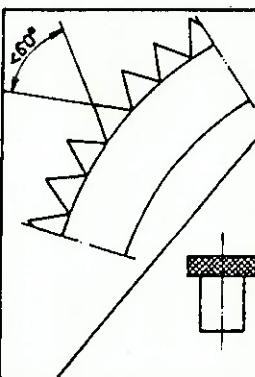


B

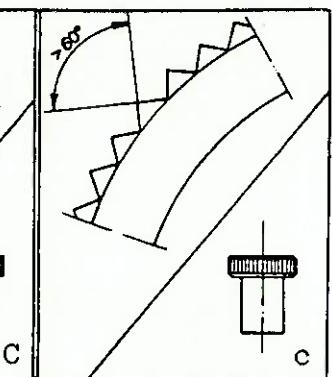


b

A conicidade reversa não per-
mite a retirada da peça da
matriz.

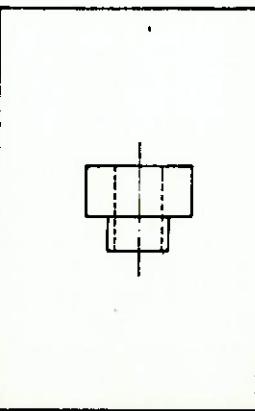


C

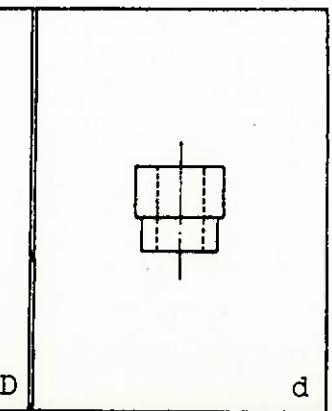


c

O recartilhado não deve ser
fino (pois complica a ferram-
enta) e nem cruzado.



D



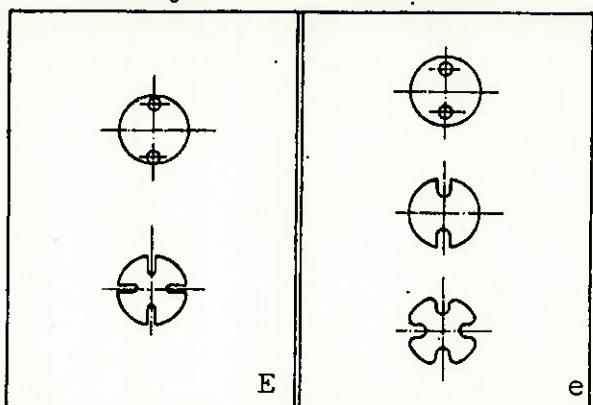
d

Regra nº 2

Evitar paredes finas nos pun-
ções e matrizes.

Observações:

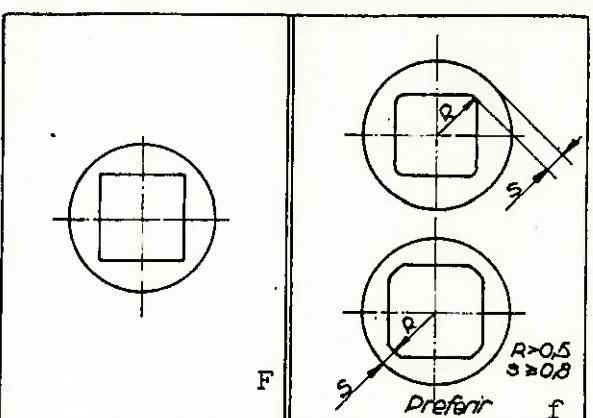
Indesejável



E

e

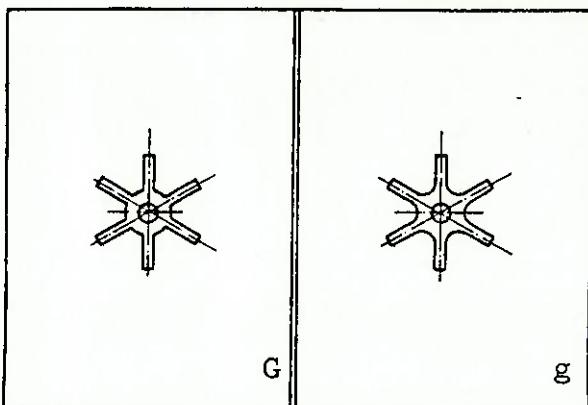
Evitar paredes finas nos punções e matrizes.



F

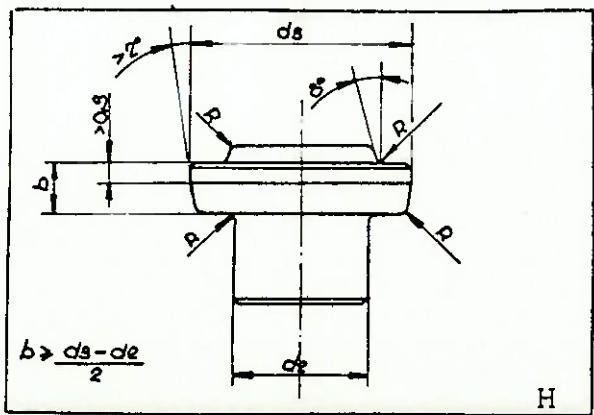
Prefeir f

Furos com cantos retos devem ser evitados. (Causam problema de densidade nos cantos - devido a espessura insuficiente nas paredes).



G

g



$$b > \frac{d_3 - d_2}{2}$$

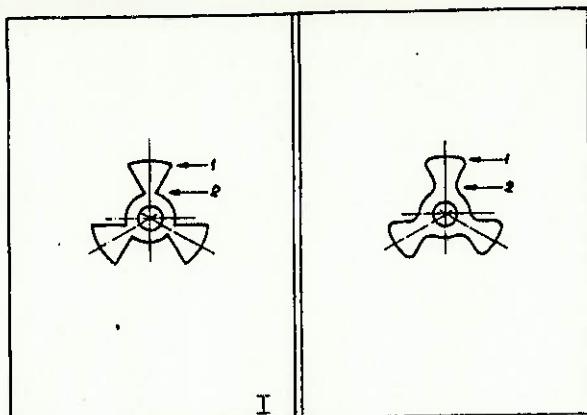
H

Raios de arredondamento melhoram o escoamento do pó e aumentam a resistência mecânica da peça.

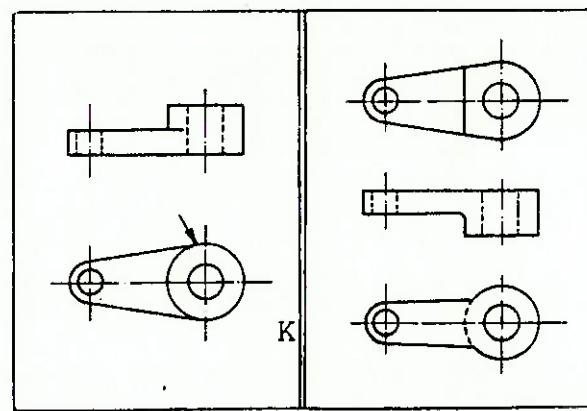
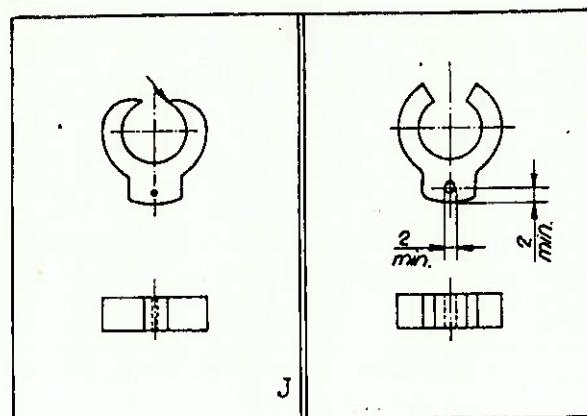
Observações:

Indescjável

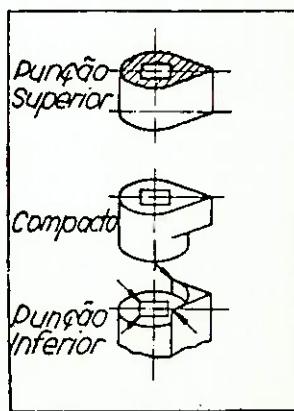
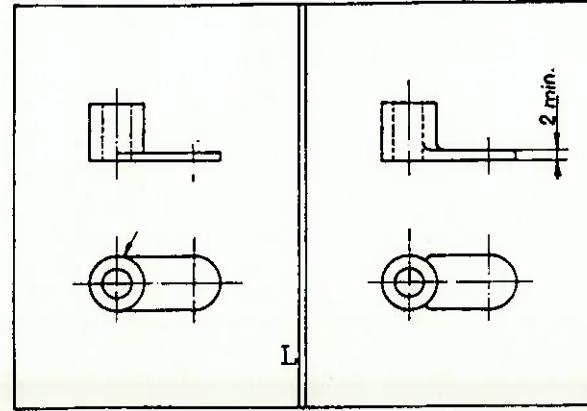
Preferível

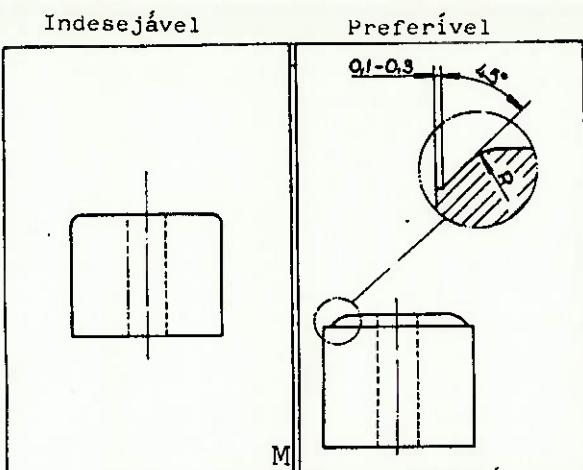


Cantos vivos de matrizes e punções se desgastam rapidamente. Não são aconselhados.

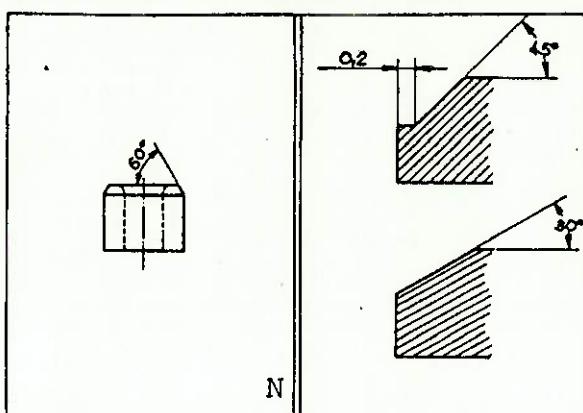


Abaixo temos uma peça mal projetada que requer o uso de cantos frageis.

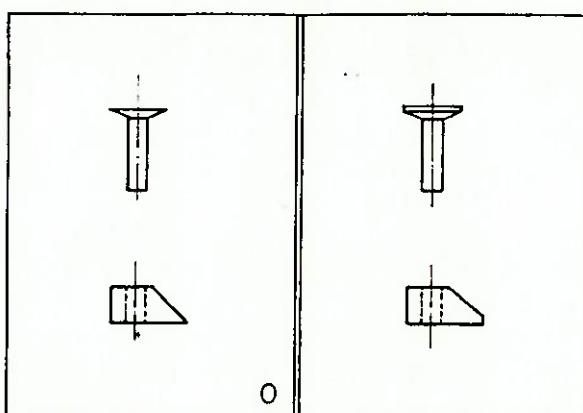


Regra nº 3


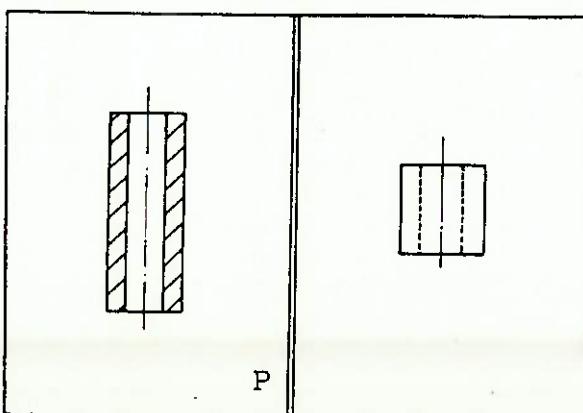
Raios verdadeiros não são possíveis na junção da face do punção com a matriz, pois necessitaria um punção afiado até a espessura zero. Projeta-se então um pequeno nível que pode ser posteriormente retirado por algum processo de acabamento.



Chanfros devem ser menores do que 45° ou possuirem planos aproximados dos anteriores.

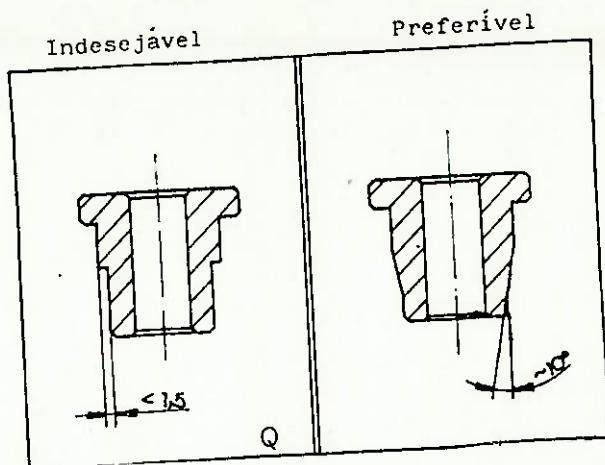


Evitar encostar os punções superiores nos inferiores ou na matriz.


Regra nº 4

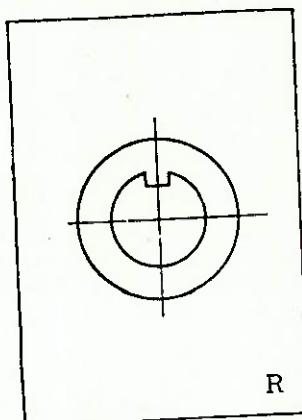
Peças delgadas de paredes e furos estreitos geram problemas de densidade e flexão dos punções (furos com forma fr banana).

Observações:



Regra nº 5

A resistência diminui se forem moldados vários níveis. Uma solução é apresentada - no desenho ao lado.



Regra nº 6

Exemplo de uma chaveta mol-
dada.

9.3 COMO ESPECIFICAR PEÇAS SINTERIZADAS

A importância da discussão da aplicação da peça com o setor fabricante de sinterizados não deve ser subestimada. É a melhor forma de se ter as vantagens das últimas técnicas numa indústria de rápido crescimento. A indústria de M/P é de grande volume que pode promover reduções de custo consideráveis combinadas com alta - qualidade.

Quando solicitar uma cotação algumas informações precisas sobre as peças devem ser fornecidas. As informações necessárias que devem ser normalmente incluídas - são as seguintes:

1. Quantidade do pedido, uso anual e estimativas futuras, para se obter as vantagens de redução de custo em altos volumes.
2. Desenhos detalhados de peça, incluindo desenhos de montagem e amostras das peças existentes ou protótipos. Identificar os materiais que atuaram satisfatoriamente para a aplicação.
3. O projeto da peça pode ser mudado sem afetar sua função?
4. As condições de serviço atuais: aquecimento, umidade, impacto, corrosivo, etc.
5. Propriedades físicas, mecânicas, corrosivas ou especiais necessárias (tensão, elongação, dureza, condutividade, impacto, fadiga, etc).
6. O acabamento necessário (galvanização, tratamento ferrox, acabamento superficial).
7. Se forem necessárias quaisquer operações de usinagem, a responsabilidade sobre as mesmas deverão ser combinadas.
8. Novas aplicações em M/P podem ser avaliadas com baixos gastos, testando peças usinadas a partir de materiais recomendados, apesar disto ser questionável*. Não existe ferramental temporário de baixo custo para compactar peças. Materiais para usinagem podem ser fornecidos por um custo razoável.

(*) Protótipos usinados a partir de blocos sinterizados dificilmente terão as mesmas condições de resistência de uma peça integralmente feita por M/P.

