

METALURGIA DO PÓ

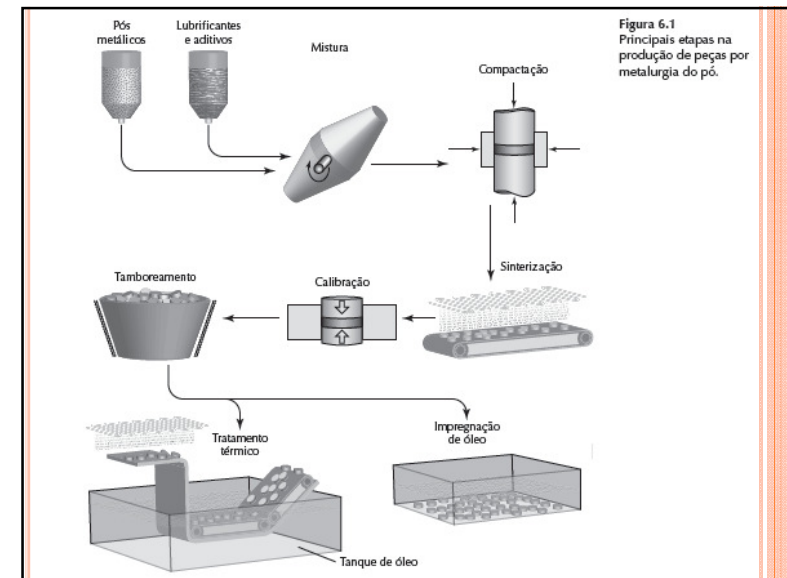
Tecnologia Metalúrgica
 Prof. José Luís L. Silveira
 Curso de graduação em Engenharia Mecânica
 UFRJ – Centro de Tecnologia – sala I-241

BIBLIOGRAFIA

- Livro Texto:
 - “Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos” (capítulo 6)
 - autores:
 - Claudio Shyinti Kiminami,
 - Walman Benício de Castro e
 - Marcelo Falcão de Oliveira;
 - Editora Edgard Blücher, 1ª edição, 2013.

METALURGIA DO PÓ

- Uma mistura de pós é compactada em matrizes para formar o compactado “verde”.
- A peça verde em seguida é aquecida, ou sinterizada, para ligar as superfícies de contato entre as partículas de pó.
- A sinterização elimina vazios e produz um corpo, tanto quanto possível, denso.
- A figura a seguir mostra as etapas da produção de uma peça pela metalurgia do pó.



COMPACTAÇÃO

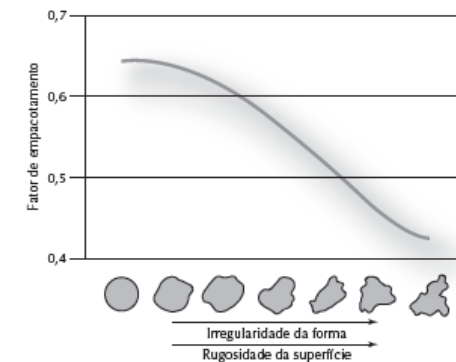
- É a etapa em que a mistura de pós é colocada em uma matriz com a forma da peça a ser produzida e em seguida é submetida a uma pressão de compactação.
- No ponto de contato entre as partículas ocorrem deformações elástica e plástica.
- A compactação deve ser o mais homogênea possível, para evitar que surjam defeitos (heterogeneidades) durante a etapa de sinterização.



FATOR DE EMPACOTAMENTO

- O fator de empacotamento varia com a forma e a rugosidade da superfície das partículas.

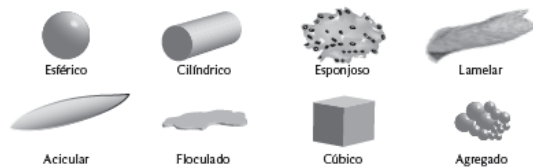
Figura 6.2
Fator de empacotamento de partículas de mesmo tamanho de acordo com a sua rugosidade superficial e irregularidade de forma.



FORMAS DAS PARTÍCULAS DE PÓ

- A forma das partículas do pó tem grande influência nas etapas de compactação e sinterização.

Figura 6.8
Ilustração de algumas formas que as partículas dos pós podem apresentar.



FATOR DE EMPACOTAMENTO

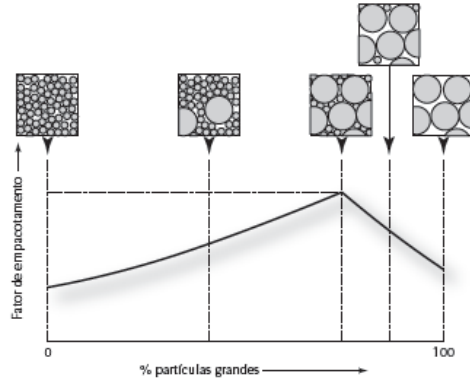
- Para uma dada pressão de compactação e partículas do mesmo tamanho, quanto mais próxima da forma arredondada for a partícula, maior será a densidade de compactação.
- Uma mistura de partículas de tamanhos diferentes permite aumentar a densidade e o fator de empacotamento.
- Partículas pequenas se acomodam entre os interstícios das partículas grandes sem causar um afastamento dessas partículas.



FATOR DE EMPACOTAMENTO

- O fator de empacotamento representa a fração do volume que corresponde a partículas de pó.

Figura 6.3
Fator de empacotamento de uma mistura homogênea entre partículas esféricas de tamanhos diferentes de acordo com a quantidade relativa entre elas.



VARIAÇÃO DA DENSIDADE NO COMPACTADO

- Uma mistura de pós não se comporta como um metal denso, que é insensível a pressão hidrostática para a deformação plástica (veja próximo slide).
- A pressão aplicada altera a massa específica (densidade) do material e a sua resistência mecânica.
- O atrito interno afeta o deslocamento das partículas do pó, bem como o atrito nas superfícies de contato entre o material em pó e as paredes da matriz.

CRITÉRIO DE MISES

- O critério de Mises afirma que a deformação plástica iniciará quando a **energia elástica de distorção** atingir um valor crítico.
- O critério de Mises pode ser descrito pelo tensor de tensões σ ou pelo tensor desviador S :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2} \leq \sigma_e$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left[(s_1 - s_2)^2 + (s_1 - s_3)^2 + (s_2 - s_3)^2 \right]^{1/2} \leq \sigma_e$$

CRITÉRIO DE MISES

- O tensor desviador e a tensão média podem ser definidos por:

$$S = \sigma - T_m I_{3 \times 3}$$

$$T_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

- e, conseqüentemente, o tensor de tensões pode ser descrito por suas parcelas média e desviadora:

$$\sigma = S + T_m I_{3 \times 3}$$

$$\sigma_1 = s_1 + T_m$$

$$\sigma_2 = s_2 + T_m$$

$$\sigma_3 = s_3 + T_m$$

CRITÉRIO DE MISES

- O tensor de tensões pode, em qualquer situação, ser descrito por suas parcelas média e desviadora, por exemplo:

$$\sigma = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & 0 \\ S_{xy} & S_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_m & 0 & 0 \\ 0 & T_m & 0 \\ 0 & 0 & T_m \end{bmatrix}$$

$$T_m = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$



VARIAÇÃO DA DENSIDADE NO COMPACTADO

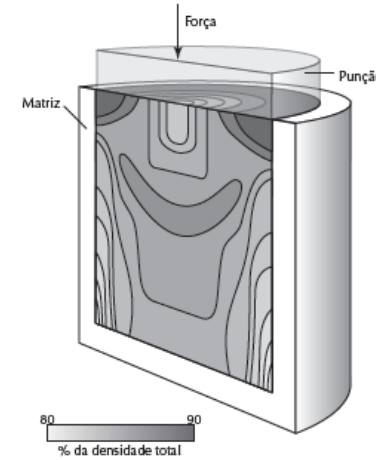


Figura 6.4
Variação da densidade em uma peça produzida por prensagem uniaxial de ação simples.

COMPACTAÇÃO COM PUNÇÃO SIMPLES OU DUPLO

Figura 6.5
Densidade de compactação em uma peça com dois níveis de espessura utilizando punção simples e punção duplo.

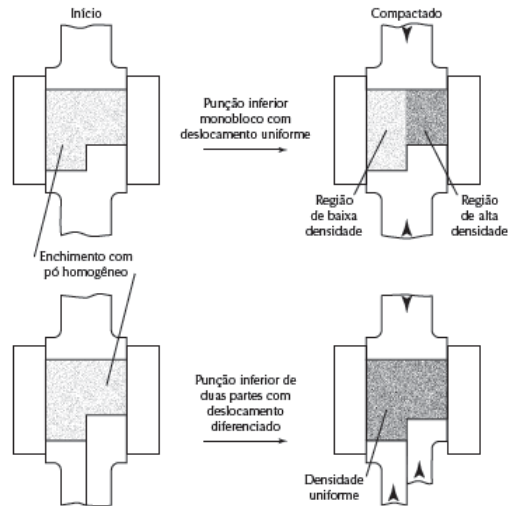
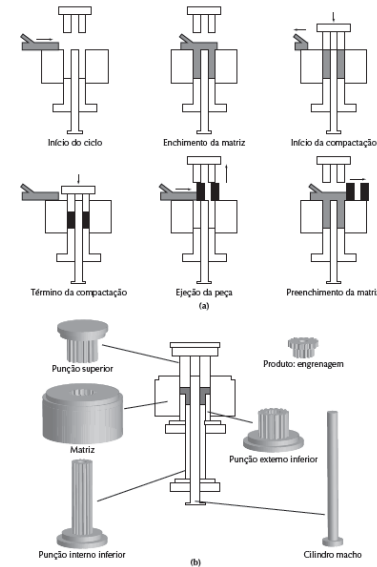


Figura 6.12
Esquema da sequência de compactação em uma matriz uniaxial com punção simples (a) e com punções múltiplas (b).

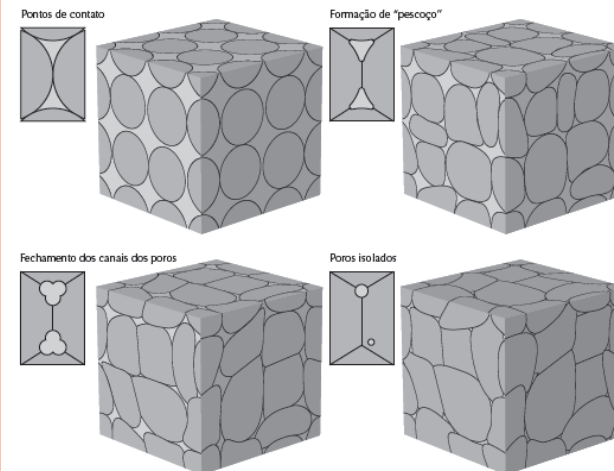


SEQUENCIA DE COMPACTAÇÃO EM MATRIZ UNIAXIAL

ETAPAS DA SINTERIZAÇÃO

- A sinterização ocorre a uma temperatura inferior a temperatura de fusão.
- Durante a sinterização ocorre a redução da área superficial das partículas e da energia interfacial.
- A sinterização ocorre em três estágios:
 - Formação de pescoços – forma das partículas preservadas
 - Fechamento de canais e poros – os canais são contínuos
 - Poros isolados

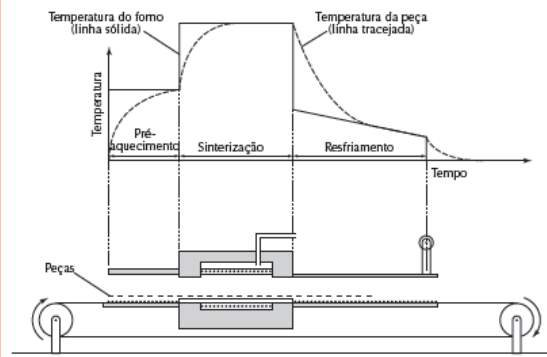
ETAPAS DA SINTERIZAÇÃO



FORNOS PARA SINTERIZAÇÃO

- Os fornos utilizados para sinterização podem ser:
 - A gás – temperatura máxima em torno de 1200 °C
 - A resistência – temperatura máxima em torno de 3000 °C
 - A indução - temperatura máxima em torno de 2000 °C
- Em geral os fornos são contínuos, como mostrado na figura a seguir, e possuem atmosfera controlada.

FORNO CONTÍNUO PARA SINTERIZAÇÃO



FORNOS PARA SINTERIZAÇÃO

- A atmosfera controlada permite:
 - Proteger as peças contra a oxidação.
 - Remover óxidos existentes por meio de uma atmosfera redutora.
 - Estabelecer uma atmosfera carburante.
 - Auxiliar na eliminação dos aditivos, lubrificantes e ligantes, usados na compactação.
- São utilizados, além do vácuo, argônio e hélio, nitrogênio, hidrogênio, entre outros.

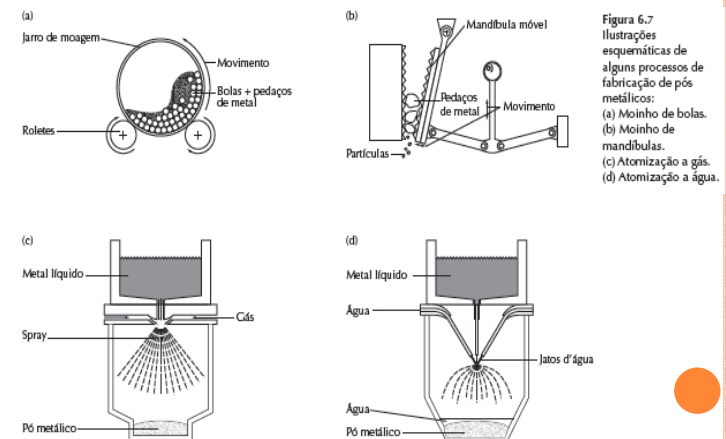
TEMPERATURAS E TEMPOS DE SINTERIZAÇÃO PARA ALGUNS METAIS

Tabela 6.2 Temperaturas e tempos de sinterização típicos		
Material	Temperatura (°C)	Tempo em minutos
Alumínio	600 – 630	10-30
Bronze	780 – 840	10-20
Cobre	850 – 900	10-40
Latão	850 – 900	10-40
Níquel	1.000 – 1.150	30-50
Aço Inox	1.050 – 1.250	30-60
Ferro, ferro + grafita	1.000 – 1.150	10-40

PRODUÇÃO DE PÓS METÁLICOS

- Os principais processos de fabricação são:
 - Moagem – é realizada em moinhos de bolas, de mandíbulas, entre outros, pode ser a úmido ou a seco.
 - **Atomização** – é o método mais aplicado e consiste na atomização do metal líquido em água ou gás.
 - Condensação – é um processo químico que consiste na evaporação do óxido (de **zinco**) seguida pela redução do vapor e a condensação do zinco na forma de pó.
 - Eletrólise – precipitação de pós a partir de uma solução eletrolítica.

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PÓS

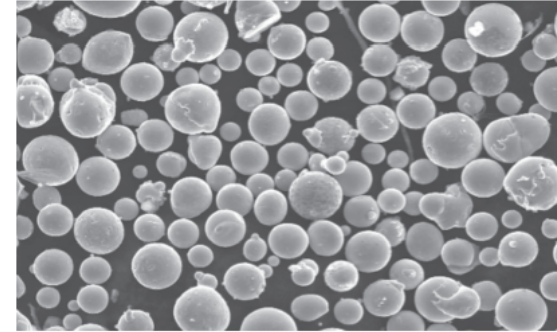


PRODUÇÃO DE PÓS METÁLICOS

- Os principais processos de fabricação são: (continuação)
 - Decomposição térmica – consiste na passagem de CO por carbonila do metal na forma esponjosa a alta temperatura e pressão (por exemplo: $\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{Ni}(\text{CO})_4$), produzindo partículas quase esféricas do metal.
 - Redução – aplicada a óxidos metálicos em pó, que são colocados em uma atmosfera redutora (com excesso de átomos de hidrogênio).

PÓ DE LIGA DE FERRO ATOMIZADO A GÁS (INERTE – ARGÔNIO)

Figura 6.9
Foto de pó de liga de ferro atomizada a gás.
Diâmetro médio:
25 μm .



DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA PARTÍCULA PARA PÓ ATOMIZADO A GÁS

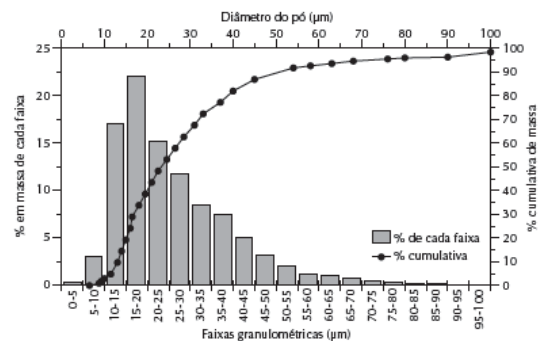


Figura 6.10
Distribuição do tamanho de partículas de um pó metálico de aço atomizado a gás.

EXEMPLOS DE CARACTERÍSTICAS DE PÓS METÁLICOS SEGUNDO O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Tabela 6.1 Características de alguns pós metálicos

Metal	Processo	Forma	D_{50} (1) [μm]	O_2 [ppm]	Densidade aparente (2) [g/cm^3]	Escoabilidade (3) [s]
Aço inox	Atomizado a gás	Esférico	12	1.000	3,8	38
Aço inox	Atomizado a água	Irregular	60	2.000	2,6	30
Latão	Atomizado a água	Irregular	38	800	2,7	35
Prata	Moagem	Floco	10	100	1,5	-
Tungstenio	Redução de óxido	Poligonal	3	640	3,4	-

(1) Diâmetro da partícula que corresponde ao ponto de 50% da massa acumulada em um gráfico de distribuição acumulada.

(2) Medida pela massa de pó metálico que flui livremente por gravidade através de um funil.

(3) Medida pelo tempo necessário para escoar, através de um funil padronizado, 50 g de pó metálico.

MISTURADORES

- São utilizados para a mistura e homogeneização do pó e podem ser classificados em:
 - Equipamentos que usam a gravidade – duplo cone rotativo, tambor rotativo, misturadores em V, indicados para materiais que se misturam facilmente.
 - Equipamentos que usam esforços mecânicos – misturador de rosca, misturador de lâminas, indicados para materiais que não se misturam facilmente.
 - Equipamentos que usam um escoamento (fluxo) – indicados para pós extremamente finos como os usados no processo de moldagem por injeção.

TIPOS DE MISTURADORES

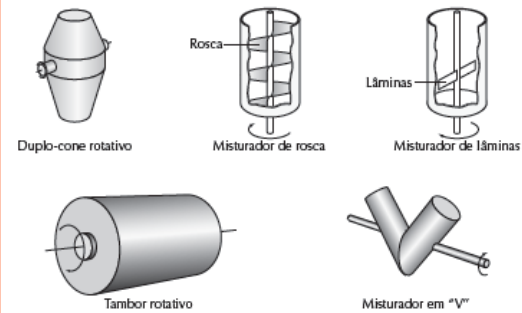


Figura 6.11
Ilustrações de alguns tipos de misturadores.

ADITIVOS

- São utilizados aditivos na mistura do pós tais como:
 - Lubrificantes – estearato de zinco e alumínio em pequenas quantidades, para reduzir o atrito entre as partículas e as paredes da matriz.
 - Ligantes – para conferir resistência mecânica “a verde” para permitir a manipulação das peças.
 - Defloculantes – para inibir a aglomeração dos pós e manter um escoamento adequado durante a alimentação da matriz.

IMPREGNAÇÃO E INFILTRAÇÃO

- Na impregnação, óleo ou outro fluido é permeado para dentro dos poros da peça sinterizada (por exemplo: mancais autolubrificantes).
- Na infiltração, metal fundido, com ponto de fusão inferior ao do material da peça, penetra nos poros da peça sinterizada.

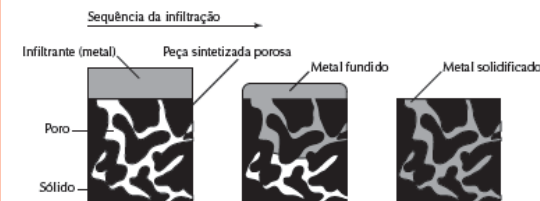
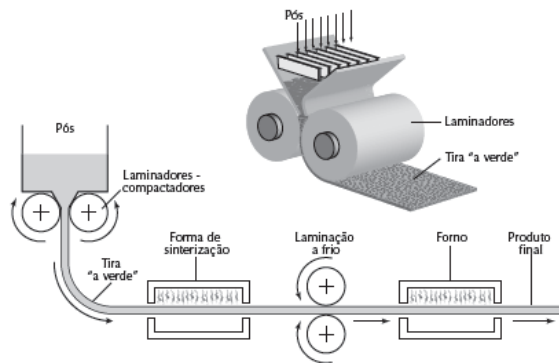


Figura 6.14
Ilustração esquemática da sequência de infiltração.

LAMINAÇÃO DE PÓS

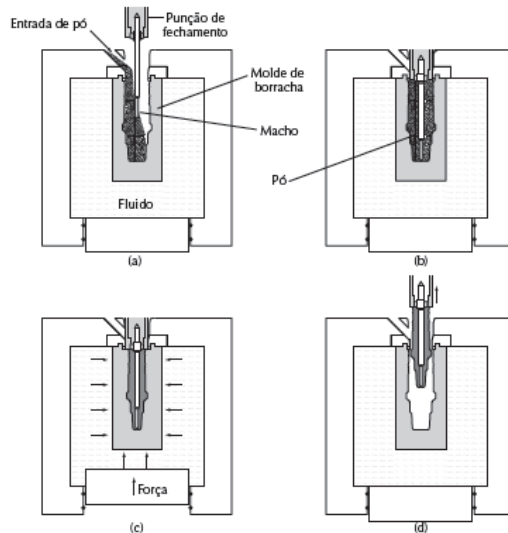
- O pó é compactado por laminação e em seguida é sinterizado.



COMPACTAÇÃO ISOSTÁTICA

- A pressão para a compactação é aplicada em todas as direções no pó confinado em um molde flexível.
- A compactação isostática pode ser realizada a frio ou a quente.
- A compactação isostática a frio utiliza água ou óleo para aplicar a pressão.
- A compactação isostática a quente utiliza argônio ou hélio para aplicar a pressão.
- Na compactação isostática a quente a compactação e a sinterização são realizadas em um só estágio.

Figura 6.16
Ilustração esquemática do processo de prensagem isostática:
(a) preenchimento do molde.
(b) fechamento do molde.
(c) aplicação de pressão.
(d) retirada da peça.



MOLDAGEM POR INJEÇÃO

- É utilizada para peças pequenas, com geometrias complexas ou de paredes finas.
- Pós metálicos extremamente finos ($<10\mu\text{m}$) são misturados com ligantes orgânicos.
- Em seguida o material é peletizado.
- Os péletes (*pellets*) são aquecidos até se tornarem pastosos e injetados na cavidade do molde.
- Após o resfriamento, a peça verde é retirada do molde e o ligante é eliminado por um tratamento térmico ou químico, quando se obtém o **compactado marrom**.
- Finalmente a peça é sinterizada.

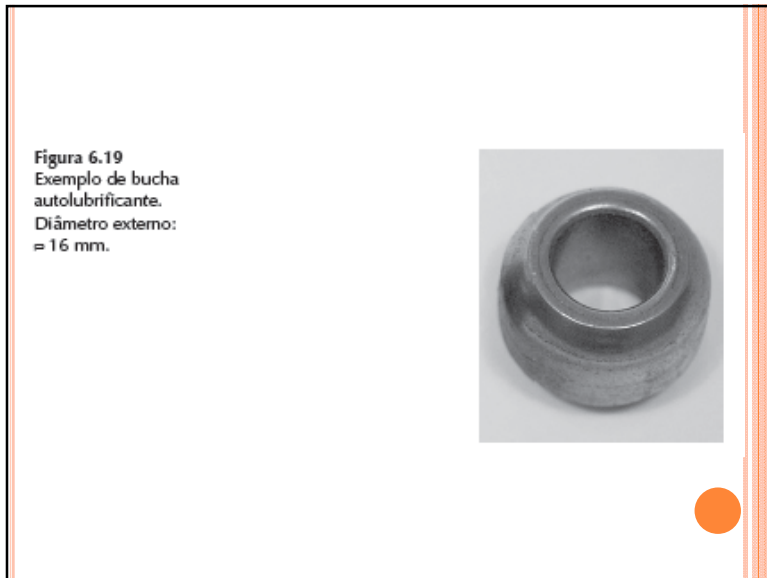
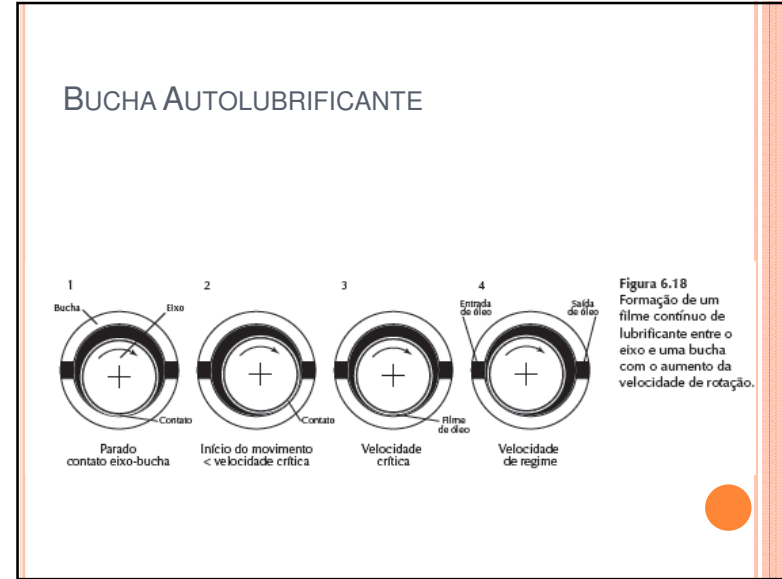
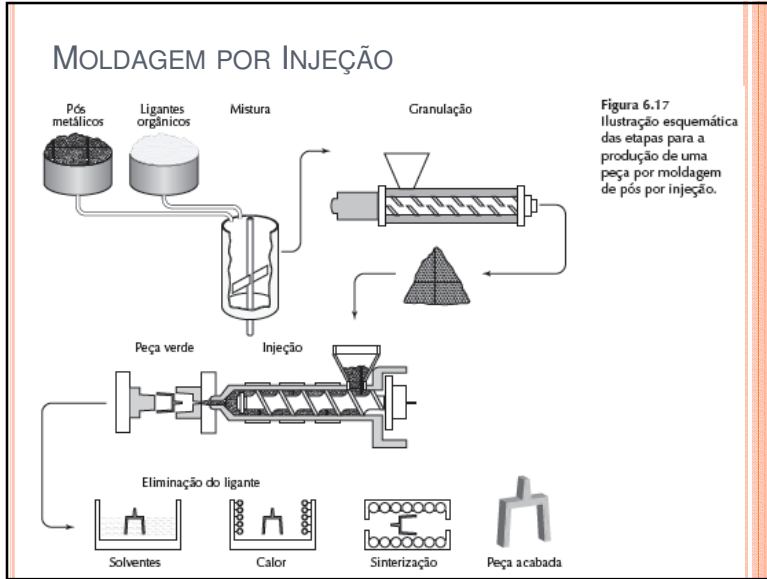


Tabela 6.3 Composição química da liga usada na fabricação da bucha autolubrificante. Porcentagens em peso

C	Cu	Pb	Fe
1,2	3,0	1,5	94,3

Figura 6.20 Fluxograma do processo de fabricação de uma bucha autolubrificante.

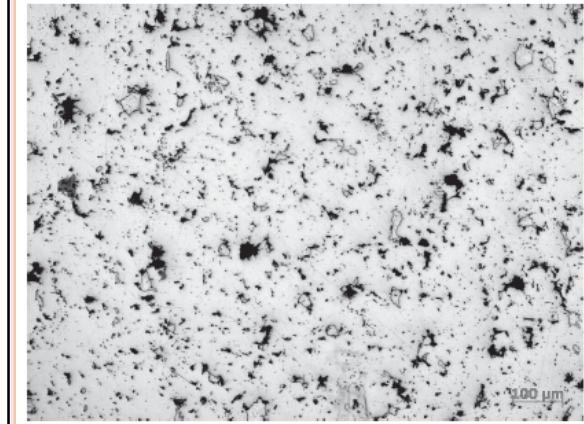
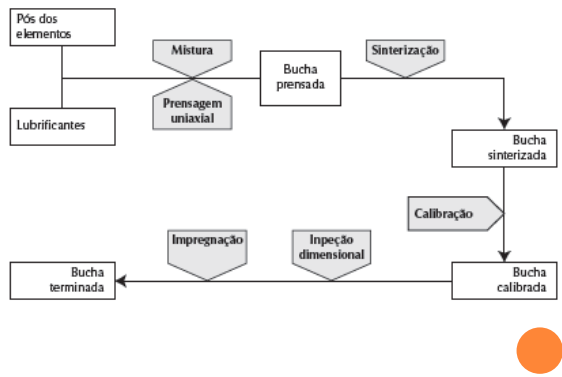


Figura 6.21 Metalografia de uma bucha autolubrificante evidenciando a presença de poros.