



SEM-0534

Processos de Fabricação Mecânica
Metalurgia do Pó

Professor:

Alessandro Roger Rodrigues

Metalurgia do Pó



Sumário

- 1) Introdução
- 2) Equipamento
- 3) Processo



Introdução

Near net shape é uma técnica de manufatura industrial.

O termo implica que a produção inicial de um item esteja muito próxima a sua forma final (Net Shape), reduzindo a necessidade de acabamento superficial. Reduzindo processos tradicionais de acabamento como usinagem (retificação) elimina mais de 2/3 dos custos de produção em algumas indústrias.

Indústria: conjunto de atividades econômicas que têm por fim a manipulação e exploração de matérias-primas e fontes energéticas, bem como a transformação de produtos semiacabados em bens de produção ou de consumo.



Introdução

Indústria de Base: Transformam matéria-prima bruta em matéria-prima processada, para a utilização por outras indústrias.

Indústria de bens intermediários: Produzem máquinas e equipamentos utilizados nas indústrias de bens de consumo.

Indústria de bens de consumo: Transformam matéria-prima fabricada pela indústria de base em itens para o consumidor final. Podem ser subdivididas em três subgrupos, de acordo com o que produzem:

a) bens duráveis ; b) bens semi-duráveis; c) bens não-duráveis.

Encontram-se muito dispersas geograficamente,5 situadas próximos ao centros urbanos, para proporcionar maior acesso pelos consumidores.



Metalurgia do Pó

Processo de Compactação e sinterização do pó

O processo, denominado de metalurgia do pó (M/P), foi inicialmente usado pelos egípcios, 3000 a.c, para fazer ferramentas de ferro.

O uso moderno ocorreu no início do século XX (1900), para fazer filamentos de tungstênio para lâmpadas incandescentes.

Os metais mais comumente usados em M/P são Al, Cu, Sn, Ni Ta, Ag, Be, Ti, Fe, Co.

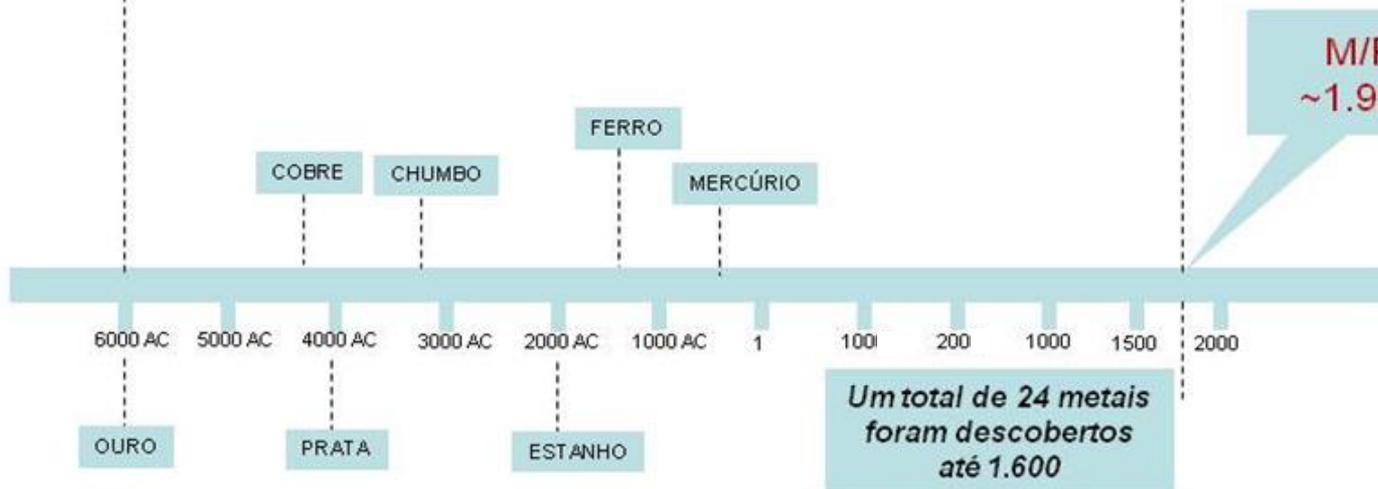
Tamanho de peças 2.5 a 50 kg.

Metalurgia do Pó

HISTÓRIA DO USO DOS METAIS



Em 7.700 anos eram usados apenas 12 metais



Metalurgia do Pó

PORQUE ESCOLHER A METALURGIA DO PO COMO PROCESSO?



Metalurgia do Pó



Metalurgia do Pó

TABLE 17.1

Application	Metals	Uses
Abrasives	Fe, Sn, Zn	Cleaning, abrasive wheels
Aerospace	Al, Be, Nb	Jet engines, heat shields
Automotive	Cu, Fe, W	Valve inserts, bushings, gears
Electrical/electronic	Ag, Au, Mo	Contacts, diode heat sinks
Heat treating	Mo, Pt, W	Furnace elements, thermocouples
Joining	Cu, Fe, Sn	Solders, electrodes
Lubrication	Cu, Fe, Zn	Greases, abradable seals
Magnetic	Co, Fe, Ni	Relays, magnets
Manufacturing	Cu, Mn, W	Dies, tools, bearings
Medical/dental	Ag, Au, W	Implants, amalgams
Metallurgical	Al, Ce, Si	Metal recovery, alloying
Nuclear	Be, Ni, W	Shielding, filters, reflectors
Office equipment	Al, Fe, Ti	Electrostatic copiers, cams

Source: R. M. German.

Metalurgia do Pó

UTILIZAÇÃO DE SINTERIZADOS EM UM CARRO ATUAL

COMPONENTES DE AÇO EM GERAL

- Armações do air bag
- Induzido e estatores de motores elétricos
- Placa base da válvula EGR
- Pinhões do levantador de vidros
- Arruela do EGR
- Núcleo da válvula EGR
- Carcaça da válvula EGR
- Carcaça do sistema cruise control
- Anéis controladores de fluxo de ar condicionado

ASSENTOS

- Alavancas de ajuste
- Lingüetas da trava
- Mecanismo reclinagem espaçadores

SUSPENSÃO

- Guia da haste
- Válvula de compressão
- Cilindros
- Pistões
- Espaçadores
- Placa de orifícios

FREIOS

- Anéis sensores ABS
- Porca de ajuste
- Ajustadores
- Trava de freio - cilindro mestre
- Pistões
- Insertos do induzido
- Estatores
- Induzidos
- Accionadores
- Carcaça de engrenagens

DIREÇÃO

- Colar da coluna de direção
- Engrenagem da coluna de direção
- Placa terminal
- Alavanca de regulagem da altura do volante
- Tampa do mancal de rolamento
- Corpo da válvula tampa

MOTORES

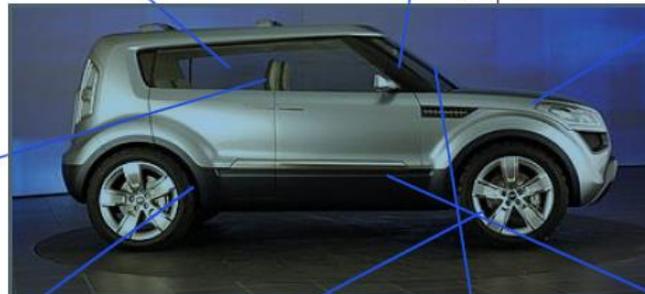
- Pinhões do planetário (motor de partida)
- Sapata polar (motor de partida)
- Núcleos magnéticos para bobinas de ignição
- Placa de controle de emissões
- Buchas para balancins
- Engrenagens VVT
- Tampa do eixo de comando das válvulas
- Carcaça de válvulas de injeção de combustível
- Espaçador de injetores de combustível
- Núcleo magnético
- Chave magnética (motor de partida)
- Buchas e placas para ventiladores (sistema de arrefecimento)
- Bielas
- Mancais de girabrequim e eixo de comando de válvulas
- Sensores de fase comes
- Guia e assento de válvula

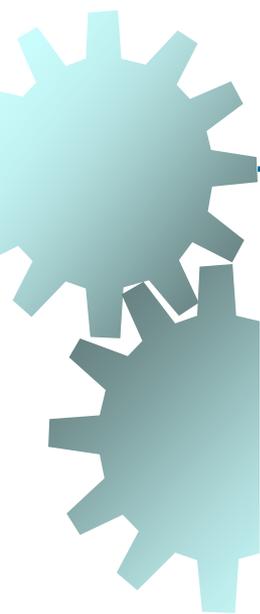
TRANSMISSÃO

- Anéis sincronizadores
- Chavetas de retenção
- Cubo conversor de torque
- Pinhões
- Engrenagem planetária
- Polia dentada de tração
- Trava de estacionamento

LIMPADORES DE PARABRISA

- Accionamento
- Trava excêntrica
- Retentores





Metalurgia do Pó

Vantagens da aplicação da M/P

Econômicas:

- Um componente sinterizado com qualidade comparável a um fundido ou trabalhado normalmente é mais barato que estes. M/P tipicamente usa mais de 97% da matéria prima original na peça acabada;
- Produz peças com excelente acabamento;
- M/P é adequada a componentes com alto volume de consumo (permite automação), com formas intrincadas, com tolerâncias dimensionais apertadas;
- Peças sinterizadas tem bom desempenho em aplicações críticas de longa duração (exemplo: *pistão de compressor de refrigeração*).

Metalurgia do Pó

Vantagens usar M/P

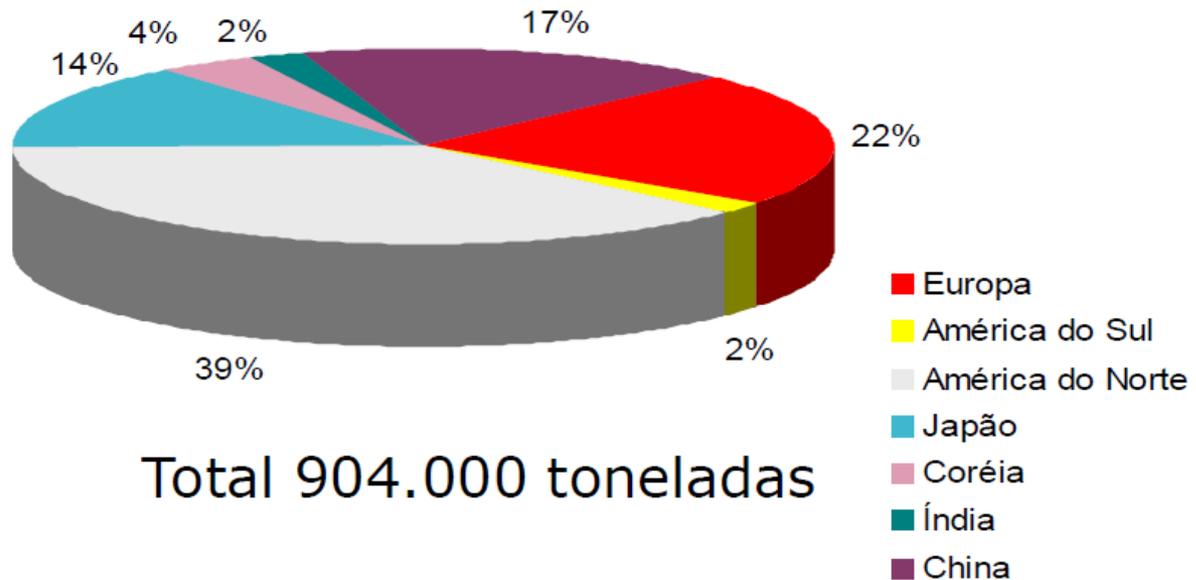
Peças podem ser fabricadas próximo á dimensões (“near net shape”)

Quando produzidos em grandes quantidades, engrenagens e mancais, a M/P torna-se ideal porque:

- A geometria é definida em duas dimensões.
- Existe necessidade de porosidade na peça para ser aproveitada como reservatório de óleo lubrificante. <http://www.revistatae.com.br/6485-noticias>

Metalurgia do Pó

VENDA DE PÓ DE FERRO POR REGIÃO EM 2006

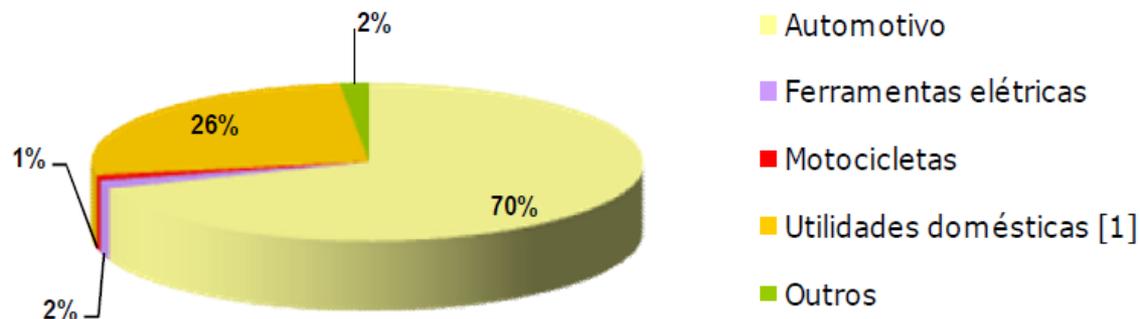


Total 904.000 toneladas

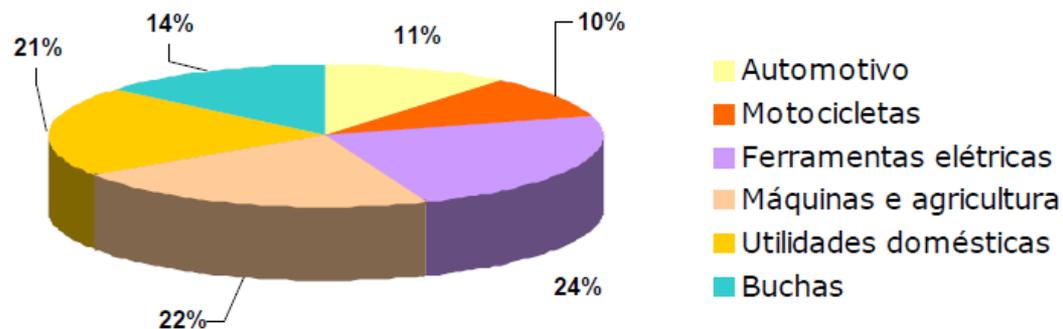


Metalurgia do Pó

UTILIZAÇÃO DE SINTERIZADOS NO BRASIL 2008 [2]



UTILIZAÇÃO DE SINTERIZADOS NA CHINA 2008



[1] Utilidades domésticas inclui compressores herméticos

[2] Dados obtidos de sinterizadores



Metalurgia do Pó

Produtos obtidos através de M/P

A “Metal Powder Industries Federation” (MPIF) define 4 classes de projetos de peças por MP, através do grau de dificuldade na prensagem convencional;

Útil porque indica algumas das limitações de forma que podem ser obtidas com o Processamento convencional por MP

4 Classes de peças M/P

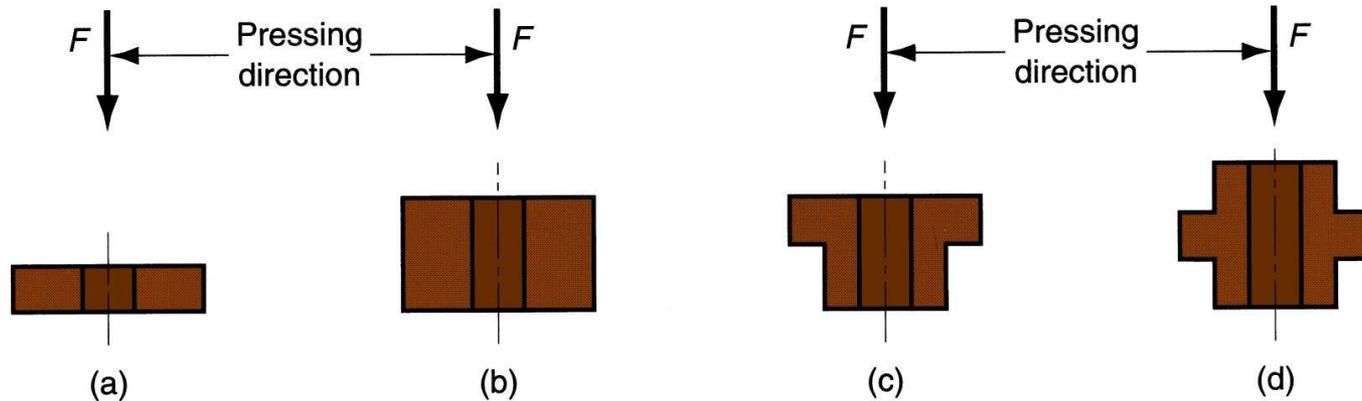
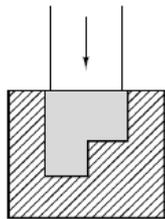


Figura 16.16 (a) Classe I formas finas simples, compressão em uma única direção; (b) Classe II forma simples porém mais espessa, exige compressão em duas direções; (c) Classe III Dois níveis de espessura, comprimida a partir de duas direções; e (d) Classe IV Múltiplos níveis de espessura, comprimida a partir de duas direções, com controles separados para cada nível.

4 Classes de peças M/P

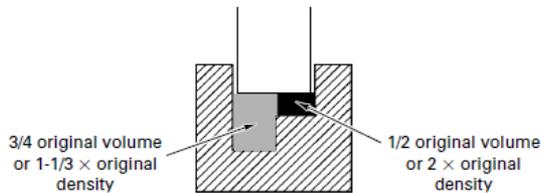
TABLE 18-2 Features that Define the Various Classes of Press-and-Sinter P/M Parts

Class	Levels	Press Actions
1	1	Single
2	1	Double
3	2	Double
4	More than 2	Double or multiple



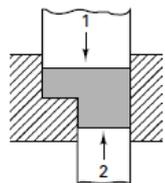
Initial conditions

(a)

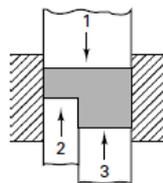


After compaction

(b)



Single lower punch



Double lower punch

FIGURE 18-9 Two methods of compacting a double-thickness part to near-uniform density. Both involve the controlled movement of two or more punches.

Class 1



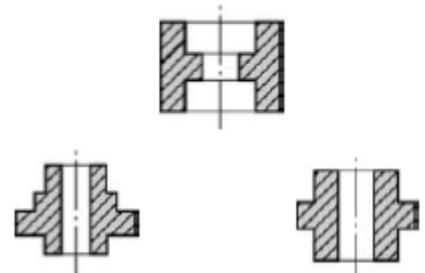
Class 3



Class 2



Class 4



4 Classes de peças M/P

Força de prensagem necessária para uma área projetada (área no plano horizontal para uma prensagem na vertical) multiplicada pela pressão necessária para compactar um dado pó metálico.

A equação é a seguinte:

$$F = A_p * p_c$$

Onde F é a força exigida (N); A_p é a *área projetada da peça* (mm²); e p_c é a *pressão de compactação necessária para um dado pó* (material) (MPa).

Os valores típicos de pressão de compactação “ p_c ” estão na faixa de 70 MPa para pós de Al e 700 MPa para pós de aço e de ferro.

Produtos obtidos através de M/P

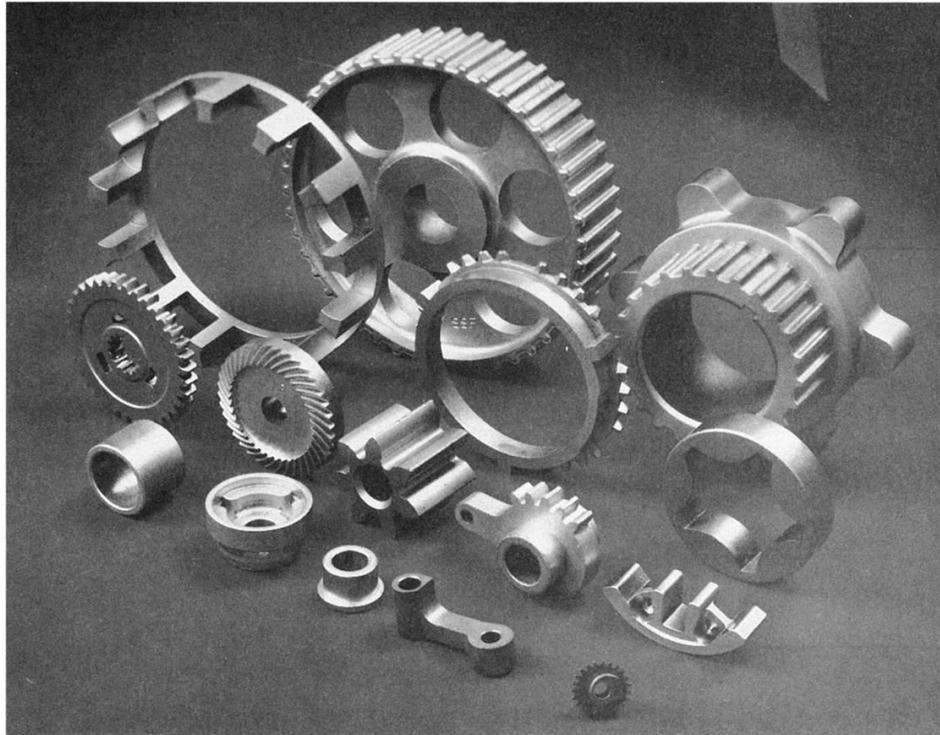
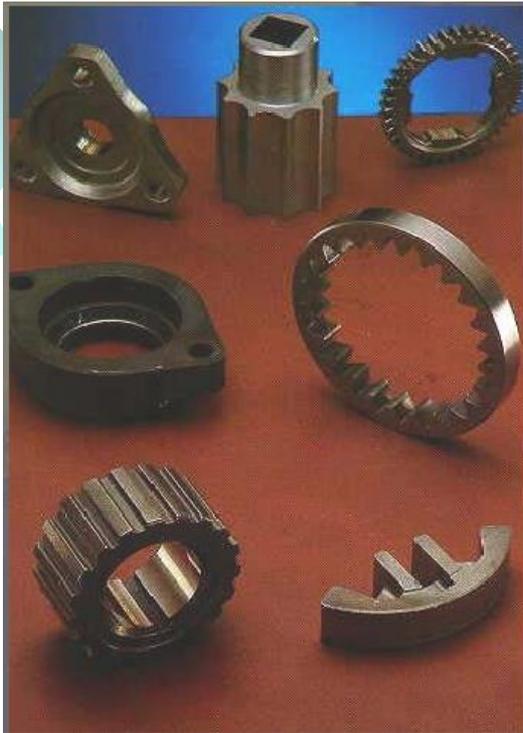


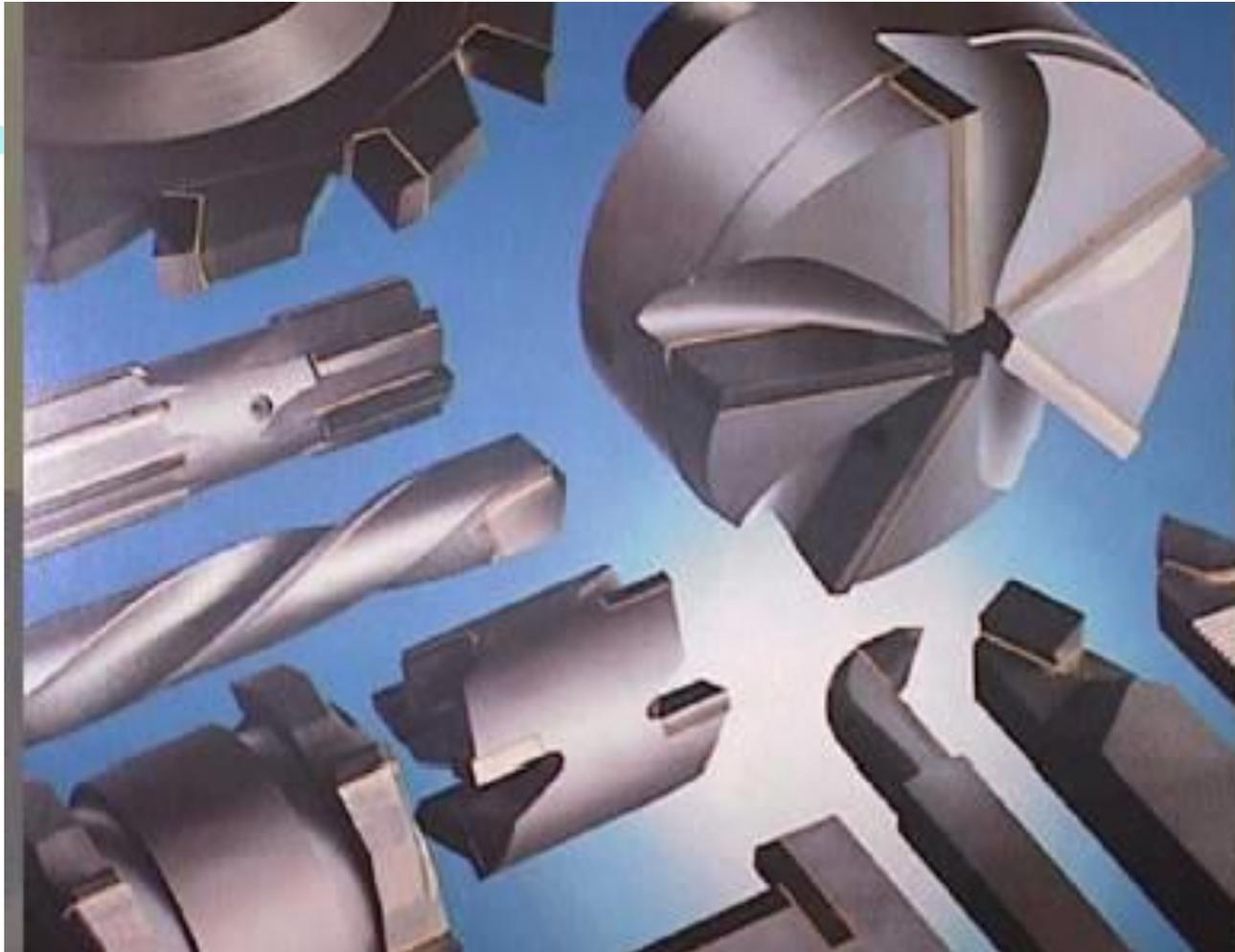
Figura. Conjunto de peças feitas através de M/P (photo courtesy of Dorst America, Inc.).

Produtos obtidos através de M/P



Produtos obtidos através de M/P

Ferramentas de corte



Produtos obtidos através de M/P

METAL DURO (Matrizes, Fieiras)



Metalurgia do Pó

METAL PESADO: W com Ni, Cu e Fe



Pt - 21,5

W e Au - 19,3

U - 18,7

W:M - 18 / 17

Ta - 16,6

Hg - 13,5

Pb - 11,4

Mo - 10,2

Cu - 8,9

Fe - 7,9

Produtos obtidos através de M/P

Moldes e Matrizes



Produtos obtidos através de M/P

Matrizes





Metalurgia do Pó

Processo de Metalurgia do pó consiste das seguintes seqüência de operações:

1. Produção do pó;
2. Mistura (“**blending**”: composição química =; e “**Mixing**” composição química \neq);
3. Compactação;
4. Sinterização
5. Operações de acabamento

Metalurgia do Pó

PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ

ADEQUAÇÃO ÀS APLICAÇÕES

- Microestrutura
- Composição Química
- Rota de Fabricação

MISTURA DE PÓS

- Tamanho
- Forma
- Empacotamento

EQUIPAMENTOS DE PRODUÇÃO

- Compactação
- Laminação
- Extrusão
- Injeção
- Aspersão

PROCESSAMENTO

- Sinterização
- Forjamento

ENSAIOS

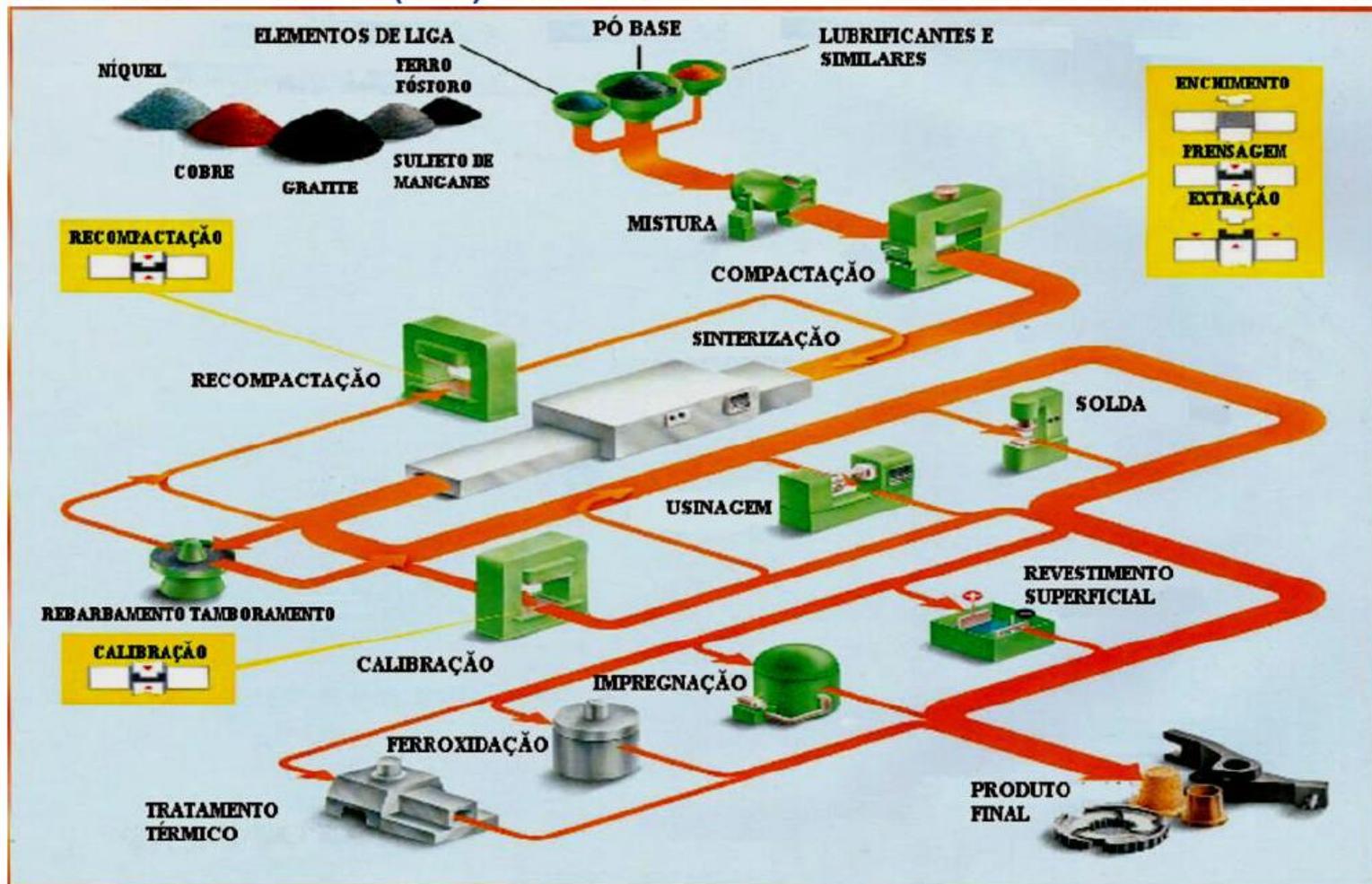
- Densidade
- Dutilidade
- Magnetismo

PROPRIEDADES

- Resistência
- Condutividade
- Microestrutura

Metalurgia do Pó

METALURGIA DO PÓ (M/P) CONVENCIONAL - FLUXOGRAMA DE PROCESSO





Metalurgia do Pó

Química e filmes superficiais

Pós metálicos são classificados tanto como

Elementais - consistindo de um metal puro
Pré ligado – cada partícula é uma liga

Filmes superficiais incluem óxidos, sílica, materiais orgânicos adsorvidos e umidade

Como regra geral, estes filmes devem ser removidos antes do processo de conformação



Metalurgia do Pó

Processo de Produção do pó:

1. **Atomização.** Produz uma corrente de metal líquido injetando o metal fundido através de um pequeno orifício.
2. **Redução.** A redução de um óxido metálico (remoção do oxigênio) usa gases, tais como H_2 e CO , como agentes redutores, fazendo com que os óxidos metálicos se reduzam a seu estado metálico.
3. **Deposição eletrolítica e Eletrólise.** Utiliza tanto soluções aquosas como sais fundidos (maior pureza do pó).
4. **Carbonyls.** Tais como $(Fe(CO)_5)$ e $(Ni(CO)_4)$, são formados deixando o ferro reagir com o CO . A reação é então decomposta em Fe e Ni , e formam partículas esféricas, uniformes e de alta pureza.
5. **Cominuição.** Moinhos de bola
6. **Formação de liga metálica através de impacto mecânico** (*mechanical alloying*): dois ou mais metais puros são misturados em um moinho de bolas. Sob impacto das bolas, os pós fraturados unem-se através de difusão, formando pós de ligas.
7. **Nanopós** (Cu , Al , Ti) etc.



Metalurgia do Pó

Em geral, quem fabrica os pós não são as empresas que fabricam as peças através de MP

Qualquer metal pode ser transformado em pó

Os 3 principais métodos usados comercialmente para fabricar pós são:

1. Atomização
2. Químico
3. Eletrolítico

Pode-se somar a esses, os métodos mecânicos usados para reduzir o tamanho da partícula (mais comum para cerâmica)

Método de atomização com gás

Uma corrente de gás em alta velocidade escoia através de um bico nebulizador, juntamente com metal fundido que é nebulizado em um tanque

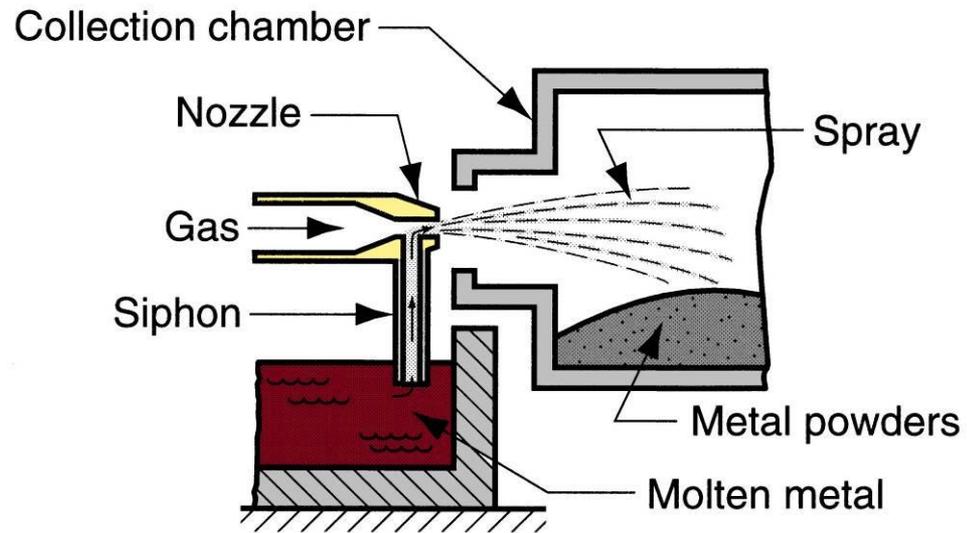


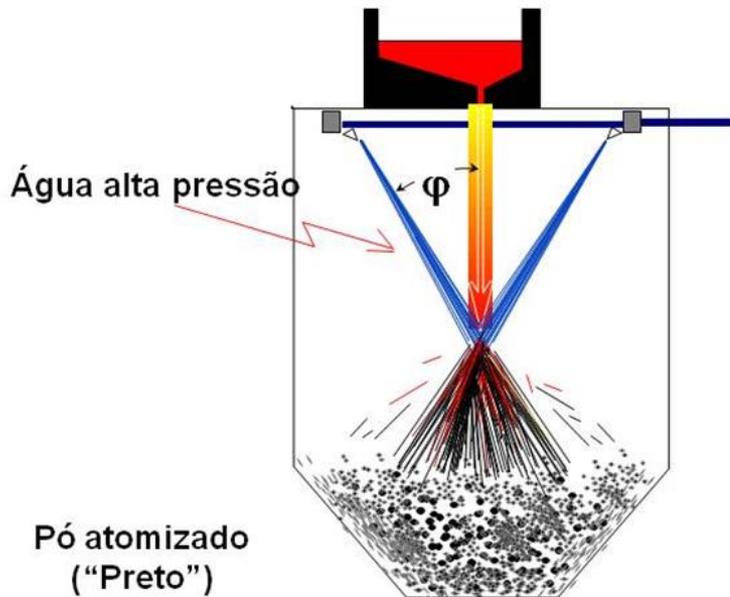
Figura 16.5 (a) Método de atomização com Gás

(a)

Atomização com água

- Atomização com água: mais usado para metais que fundem a temperatura menor que 1600°C. Desvantagem é a oxidação (alternativa é usar óleo sintético)

ATOMIZAÇÃO COM ÁGUA (+ USADO)



Variáveis:

- Temperatura de fusão
- Pressão da água
- Ângulo de incidência
- Distância de impacto
- Diâmetro do filete

Observações:

Tamanho das partículas depende da velocidade do fluido;

Resfriamento é + rápido mas as partículas apresentam formato diferente do esférico



Eletrólise

- Eletrólise: nesse método o metal desejado é o anodo que é lentamente dissolvido sob tensão (V), e transportado através dos eletrólitos e depositado no cátodo.
- Metal depositado é removido, lavado e seco formando pó com altíssima pureza.
- Os principais metais obtidos por esse método são: Be, Cu, Fe, Ag, Ta, e Ti.



Redução Química

Esse método envolve uma série de reações químicas pelas quais os compostos são reduzidos a pós elementais puros.

- Um processo comum envolve a liberação de metais a partir de seus óxidos através de agentes redutores tais como hidrogênio e monóxido de carbono.
- O agente redutor é aplicado para se combinar com o oxigênio em um composto livre do elemento metálico.
- Os principais metais obtidos por esse método são: W, Cu, Fe.

Decomposição Química

Decomposição química do **Pentacarbonil** ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) em partículas esféricas com alta pureza.

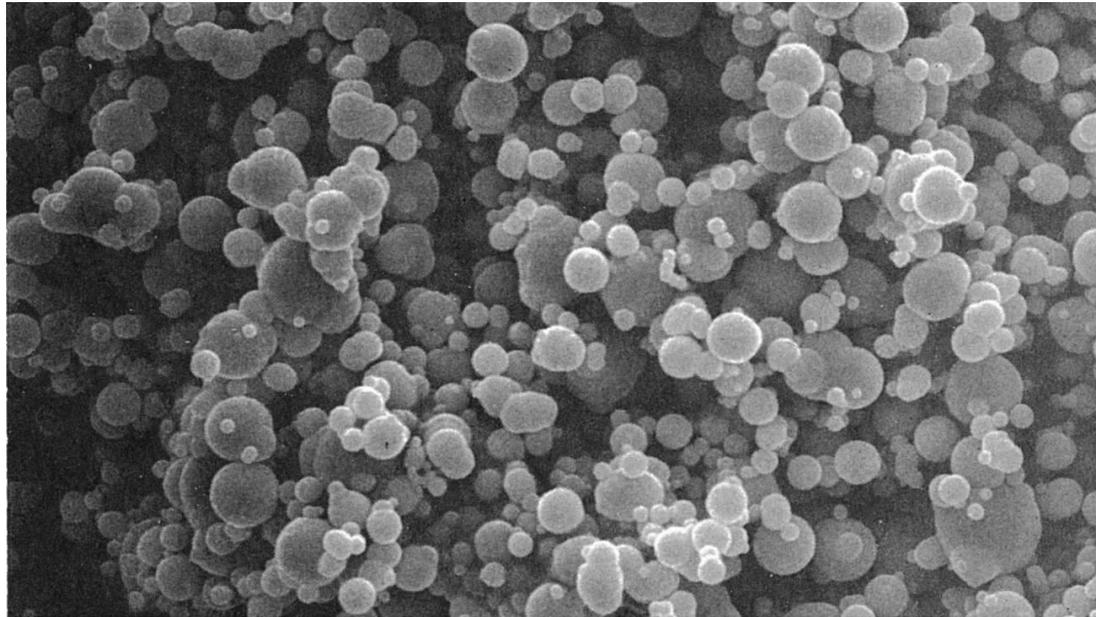


Figura 16.6 Pó de Fe produzido por decomposição de Pentacarbonila de Fe ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) (photo courtesy of GAF Chemical Corp); tamanho de partículas varia de 0,25 - 3,0 microns (10 a 125 μ -pol).

Precipitação



Decomposição química do elemento metálico a partir de sais dissolvidos em água.

Pós de Cu, Ni e Co podem ser obtidos através desse método.

Formas das partículas na Metalurgia do pó

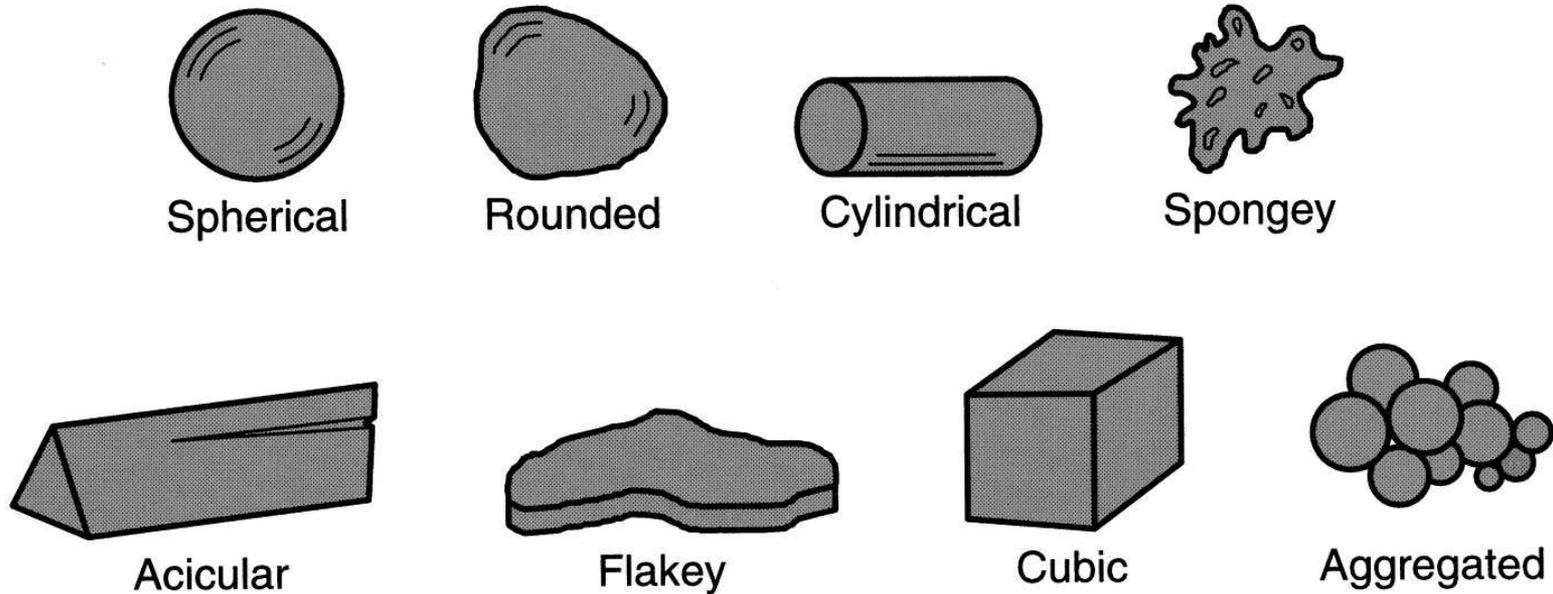
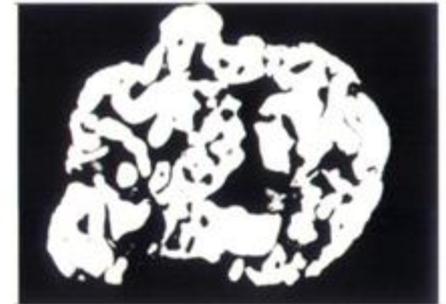
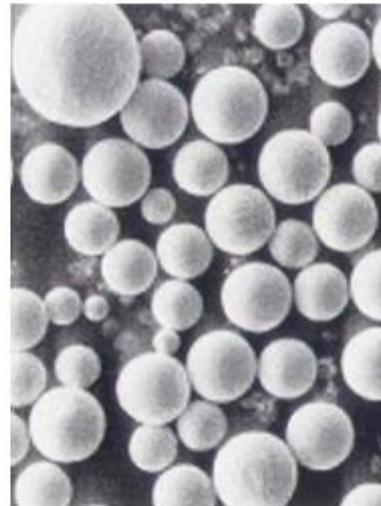
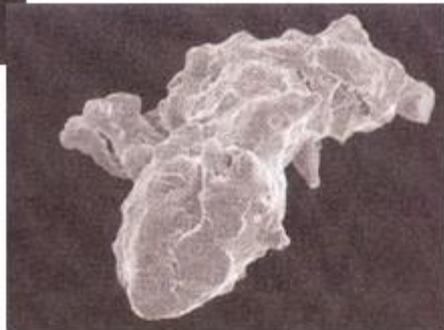
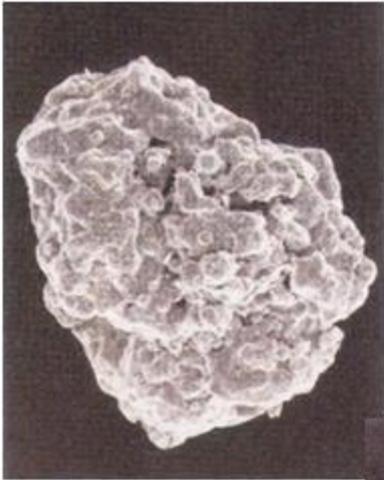
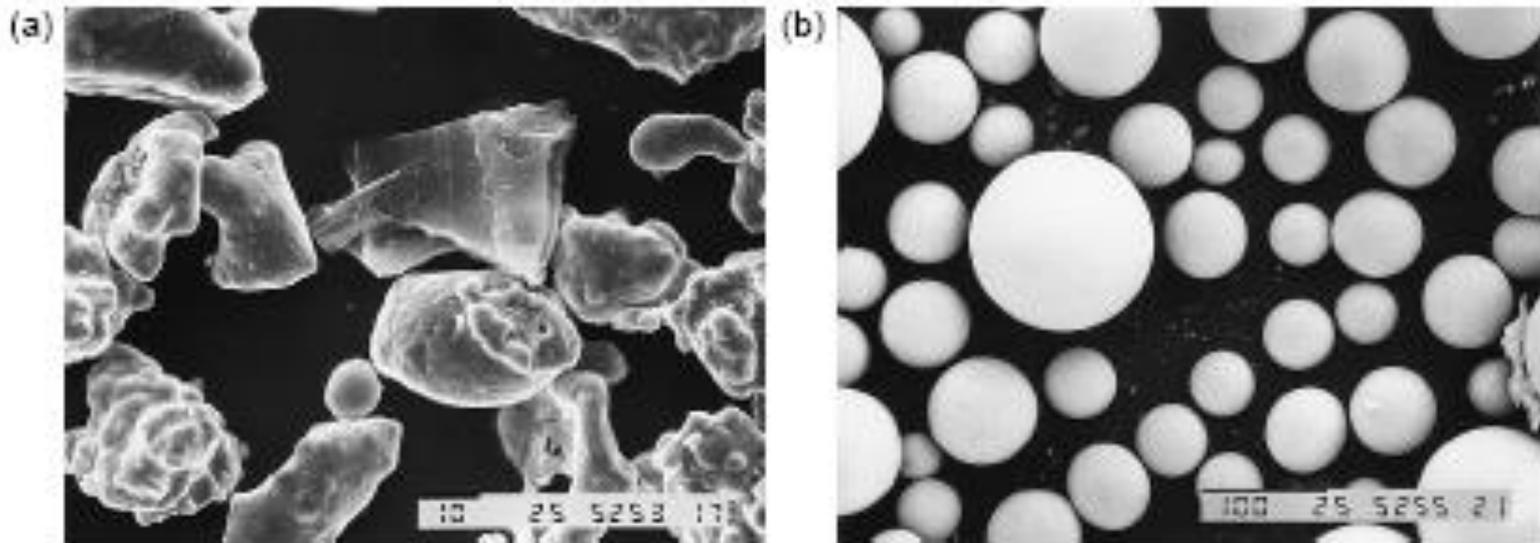


Figura. Diversos formas possíveis de partículas usadas na MP.

Formas das partículas na Metalurgia do pó



Pós para MP



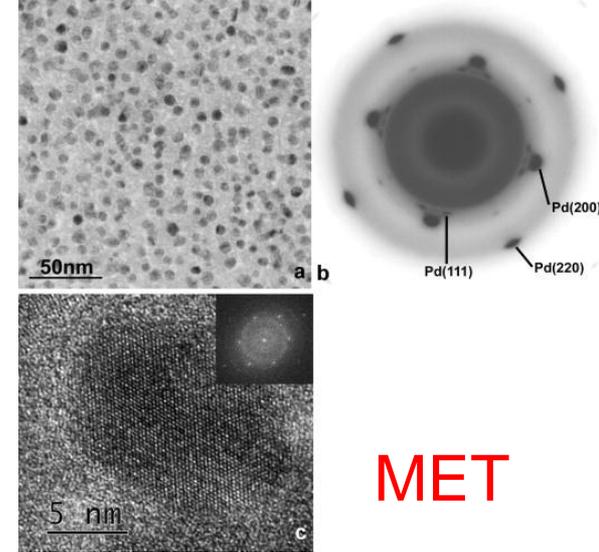
(a) Scanning-electron-microscopy photograph of iron-powder particles made by atomization.
(b) Nickel-based superalloy (Udimet 700) powder particles made by the rotating electrode process; see Fig. 17.5b. Source: Courtesy of P. G. Nash, Illinois Institute of Technology, Chicago.

Tamanho e Seleção das Partículas

- Tamanho de partículas, distribuição

Avaliação do Tamanho:

- Sedimentação.** Envolve medir a taxa na qual a partícula sedimenta em um fluido padrão.
- Análise microscópica** (MEV e MET);
- Espalhamento de luz.** Um laser ilumina as partículas suspensas em um meio líquido (as partículas fazem a luz ser espalhada, um detector então digitaliza e computa a distribuição do tamanho de partículas)
- Meio óptico**, partículas bloqueiam um feixe de luz que é então detectado por uma fotocélula
- Partículas em suspensão em um líquido:** sensores elétricos detectam o tamanho e a distribuição da partícula.



MET



Etapas do processo – Separação de Tamanho do pó

Os métodos mais comuns usam peneiras de diferentes aberturas da malha (*mesh sizes*)

Mesh count – refere-se ao número de aberturas por polegada linear na peneira

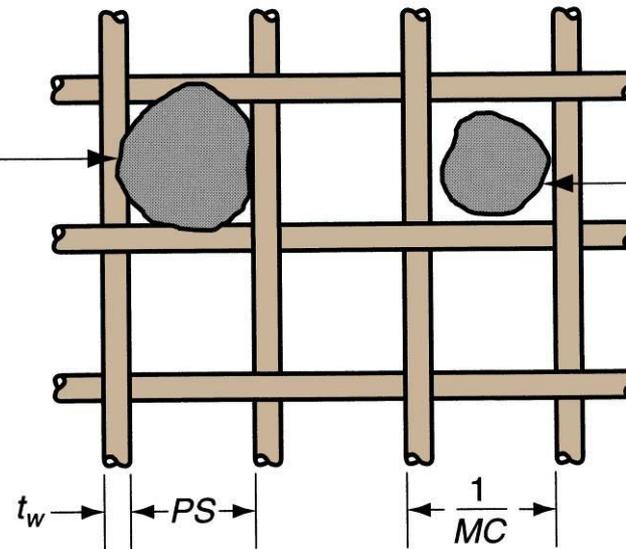
Um *mesh count* de 200 significa que existem 200 aberturas por polegada linear

Uma vez que a malha é quadrada, a contagem é igual em todas as direções, e o número total de aberturas por polegada quadrada é $200^2 = 40,000$

Quanto maior a contagem de mesh = menor o tamanho das partículas

Etapas do processo – Tamanho do pó

Tamanho de partícula
que não passaria



Tamanho de partícula
que passaria

Figura. *Screen mesh* para classificar tamanho de partículas



Atrito entre partículas e escoamento do pó

O atrito entre partículas afeta a capacidade de um pó escoar prontamente e ser empacotado de maneira adequada

Um teste comum de atrito entre partículas é o ângulo de repouso (“*angle of repose*”), o qual é definido como o ângulo formado por uma pilha de pó quando estes passam por um funil estreito

Atrito entre partículas e escoamento do pó

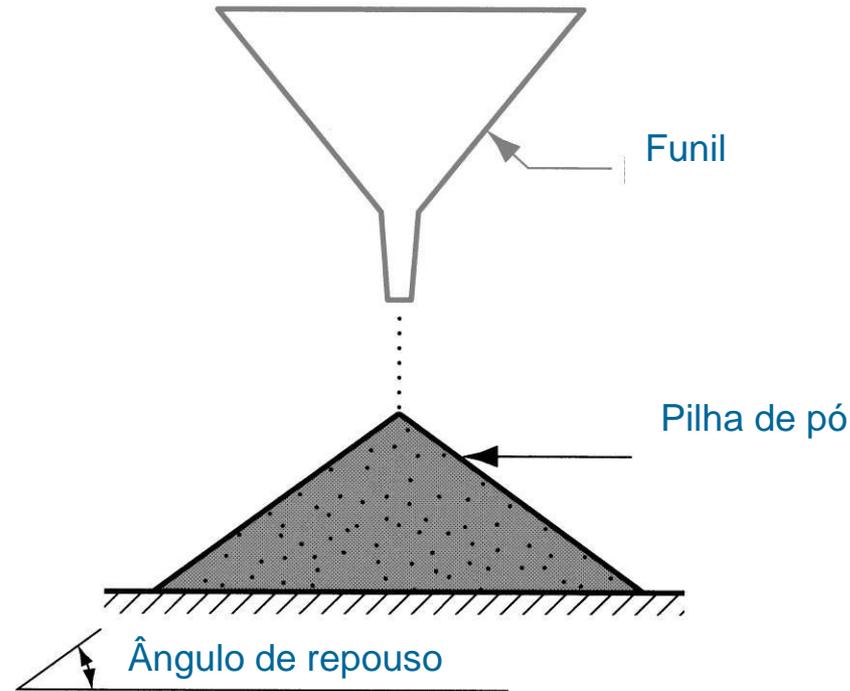
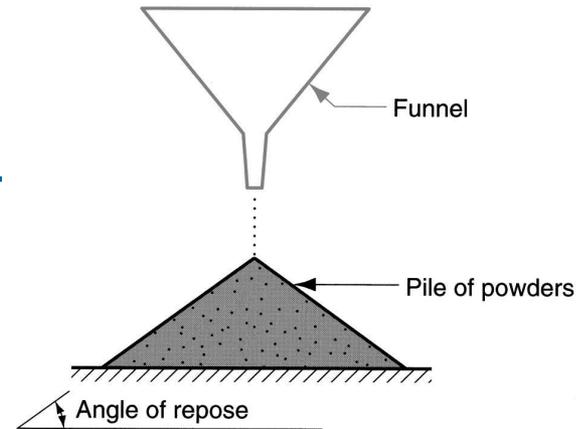


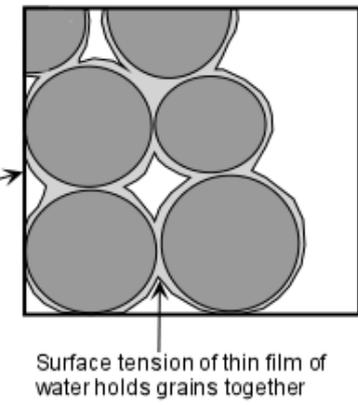
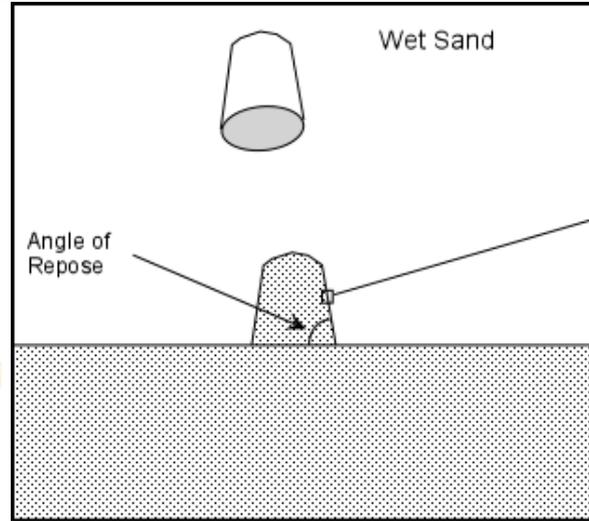
Figura O atrito interpartícula como indicado pelo ângulo de repouso de uma pilha de pó derramado por um funil estreito. **Grandes ângulos indicam maiores atritos interpartículas.**

Observações



- Maiores ângulos significam maior atrito entre partículas
- Partículas menores geralmente apresentam maior atrito e ângulos mais inclinados
- Formatos esféricas resultam em menor atrito entre partículas
- Quanto mais a forma das partículas se desviam do formato esférico, maior a tendência de aumento do atrito entre partículas
- A maior facilidade de escoamento de partículas está relacionado com o menor atrito entre partículas
- Lubrificantes são geralmente adicionado aos pós para reduzir o atrito entre partículas e facilitar o escoamento durante a prensagem

Observações



Areia seca: ângulo de repouso 34°

Areia úmida: ângulo de repouso 45° ??????????

Areia molhada: ângulo de repouso 15° a 30°

OBS.1: Maiores ângulos significam maior atrito entre partículas

OBS. 2.: Lubrificantes são geralmente adicionado aos pós para reduzir o atrito entre partículas e facilitar o escoamento durante a prensagem.



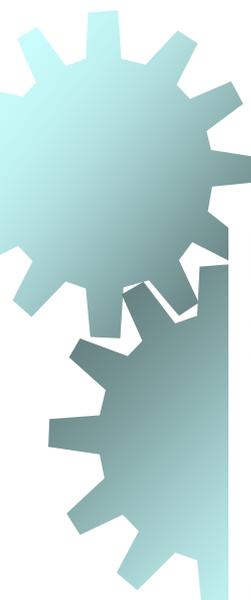
Medidas de densidade de partículas

Densidade real – densidade do volume real do material

A densidade do material se o material fosse fundido em uma massa sólida

Densidade do substrato (*Bulk density*) – densidade dos pós no estado solto após a sua formação

Por causa dos poros entre partículas, a densidade do substrato é menor do que a densidade real



Fator de empacotamento

FE = Densidade do substrato dividida pela densidade real

Valores típicos dos pós soltos variam entre 0,5 e 0,7

1. Se pós de diferentes tamanhos estiverem presentes, partículas menores irão preencher espaços entre os maiores, assim será maior o fator de empacotamento real

2. Empacotamento pode ser aumentado através da vibração dos pós, gerando um empacotamento mais homogêneo

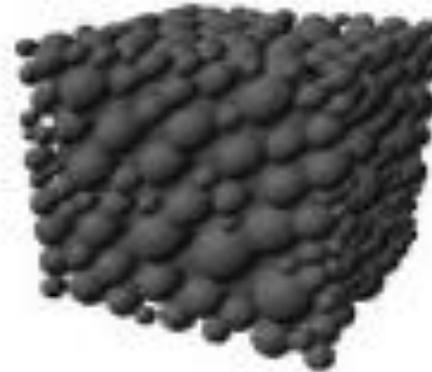
3. A pressão aplicada durante o empacotamento aumenta fortemente o empacotamento dos pós através do rearranjo e deformação das partículas

Fator de empacotamento

Processo de Compactação e Sinterização do pó



Raw powder



Formed product



Sintered product



Porosidade

Razão de volume dos poros (espaços vazios) no pó em relação ao volume do substrato

Em princípio:

$$\text{Porosidade} + \text{fator de empacotamento} = 1.0$$

O problema é complicado quando há poros aprisionados no interior das partículas!!!!

Se o volume interno do poro for incluído na porosidade acima, a equação será exata

Metalurgia do Pó

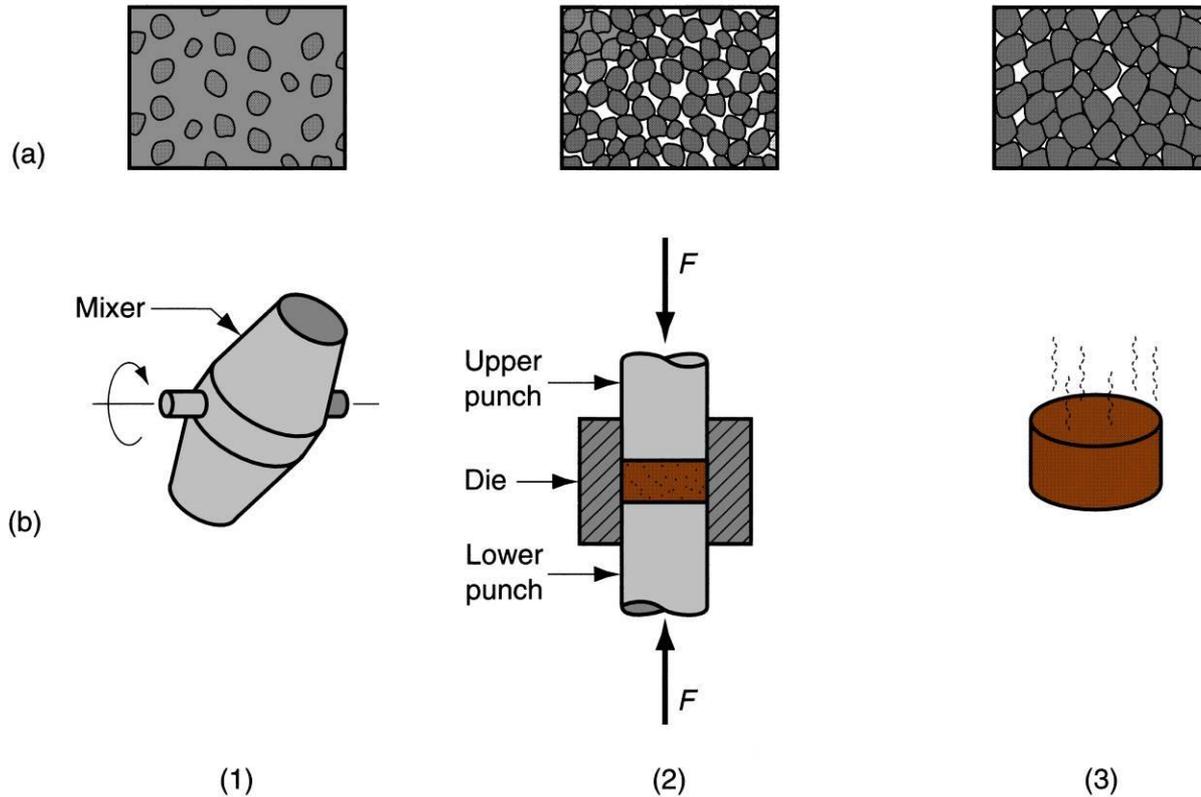


Figura: Sequencia convencional de produção de peças por M/P: (1) mistura, (2) compactação, e (3) sinterização; (a) apresenta a condição das partículas em cada etapa (b) mostra a operação e/ou a peça ao longo da sequência.

Etapas do processo - Mistura

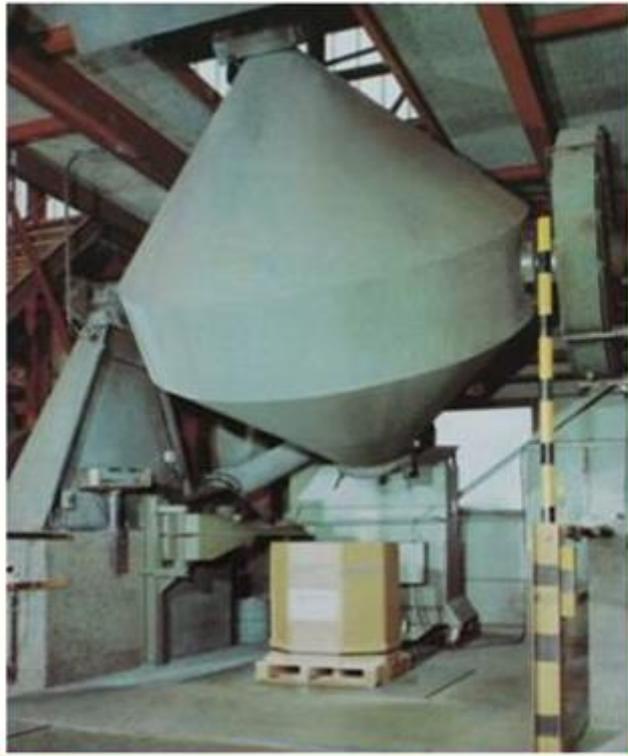
Etapas do Processo



- Feita com base na especificação do material definido para peça.
- Os componentes da mistura, todos na forma de pó, são pesados e colocados no misturador de forma a obter uma mistura homogênea.
- Adiciona-se também um pó lubrificante necessário na etapa de compactação. Este pó evita que o ferramental seja desgastado e facilita a compactação e a extração da peça.

Misturadores

Duplo - Cone



“Y”



Processamento do pó

- Compactação a frio e sinterização
 - Prensagem
 - Laminação
 - Extrusão
 - Moldagem por injeção
 - Prensagem hidrostática a frio (CIP)
- Prensagem hidrostática a quente (HIP)



Compactação



Processo de Compactação e sinterização do pó



Metalurgia do Pó

• Compactação

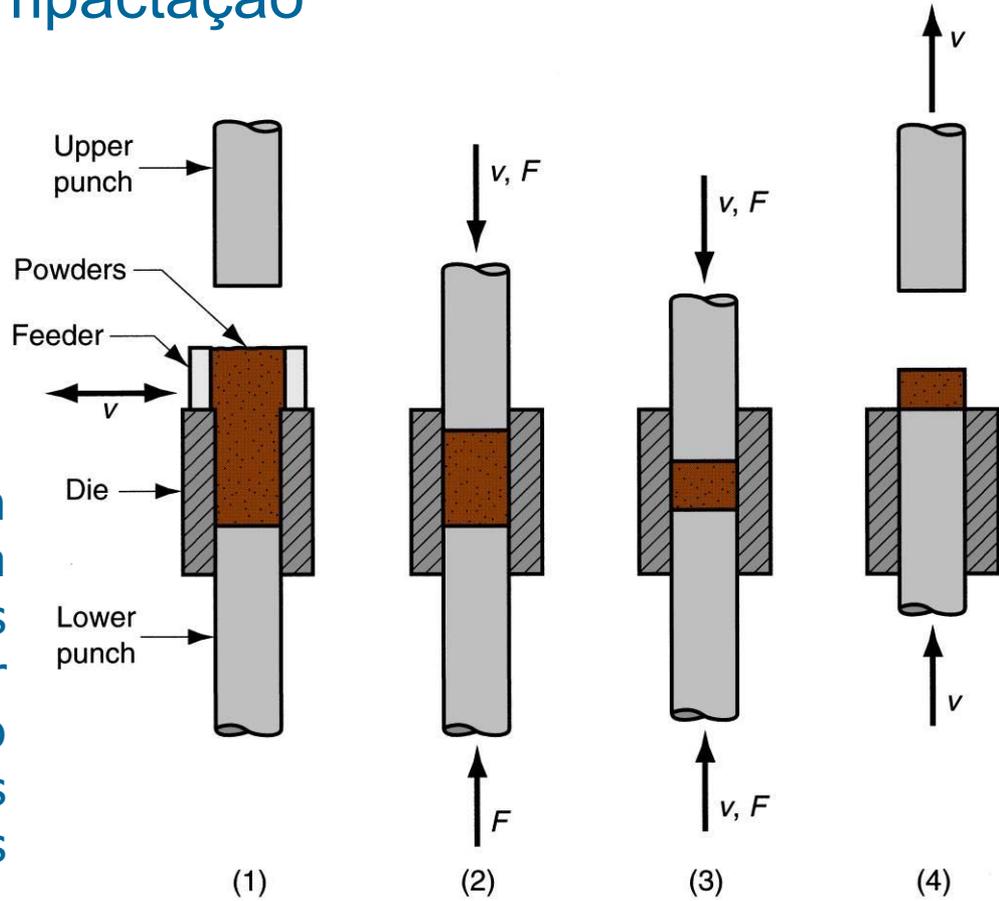


Figura 16.9 Prensagem em MP: (1) preechimento da cavidade com pós através de alimentador automático; (2) posição inicial e (3) final dos pistões superior e inferior durante a prensagem, (4) ejeção da peça.



Metalurgia do Pó

- Prensa Mecânica

A seleção da prensa depende do tamanho da peça e configuração, exigências de densidade e taxas de produção.

No entanto, quanto maior a velocidade de prensagem, maior a tendência da prensa reter ar na cavidade do molde e não realizar a compactação de forma apropriada

Metalurgia do Pó

- Prensa Mecânica

200 a 300
Tons

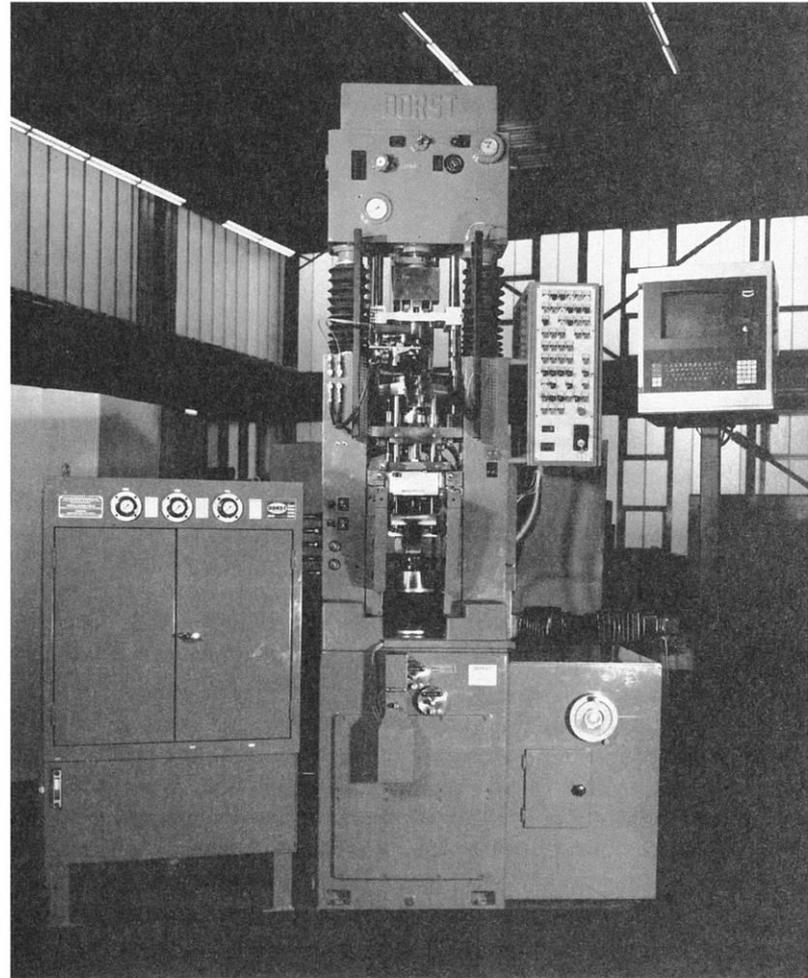
As hidráulicas
podem
chegar a
5000 tons



A 7.3 MN (825 ton) mechanical press for compacting metal powder. Source: Courtesy of Cincinnati Incorporated.

Metalurgia do Pó

Figure 16.11 A 450 kN (50-ton) hydraulic press for compaction of PM parts (photo courtesy of Dorst America, Inc.).



Metalurgia do Pó

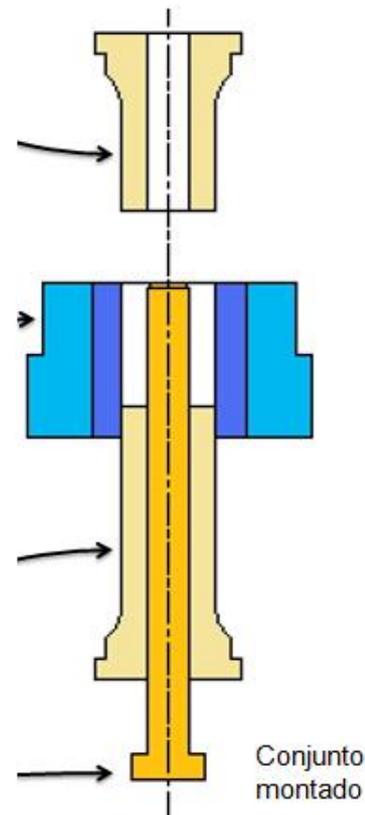
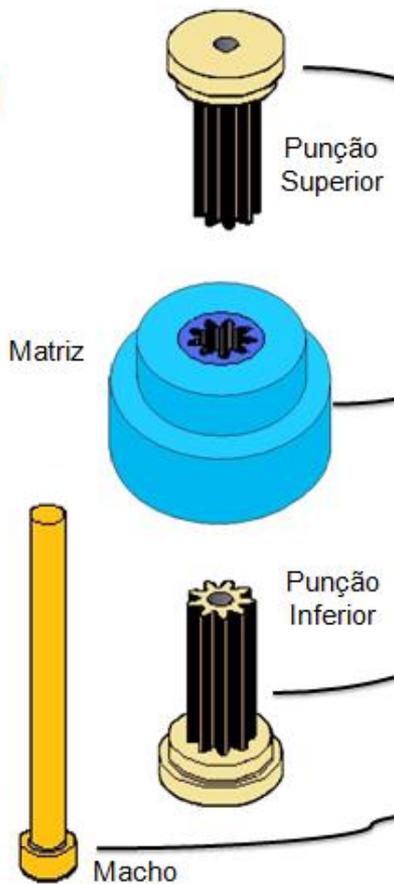
Ferramental

Ferramental



Peça a ser fabricada

Porta ferramenta
(Die-Set)



Metalurgia do Pó

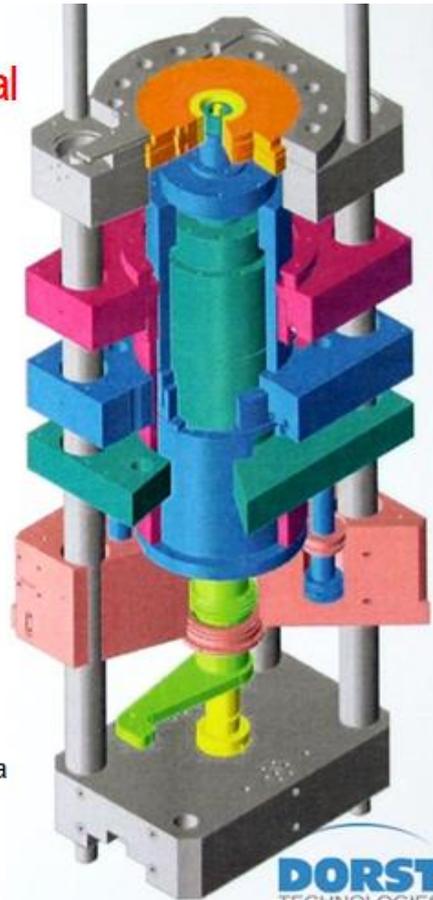
Ferramental

Ferramental



Peça a ser fabricada

Porta ferramenta
(Die-Set)



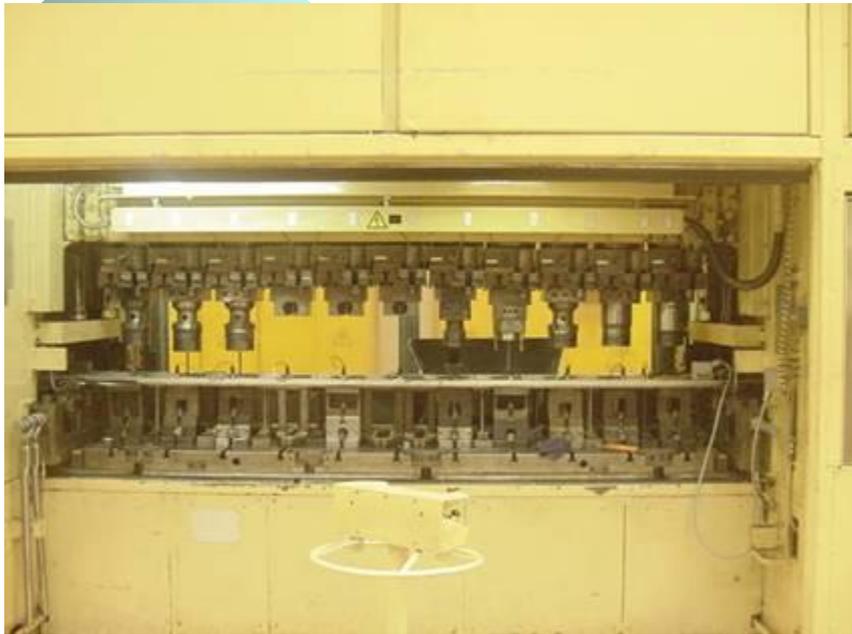
Metalurgia do Pó

Ferramental



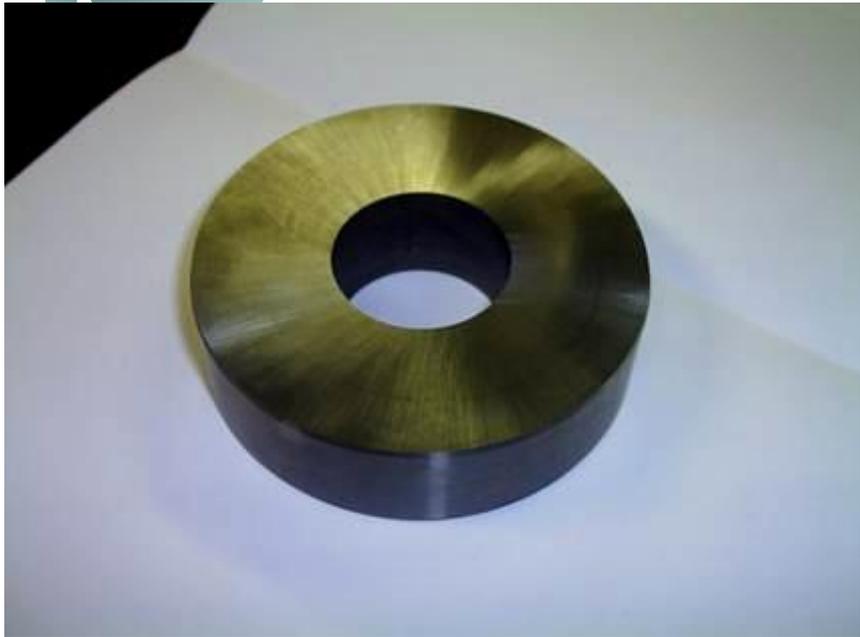
Metalurgia do Pó

Ferramental Transfer



TEMPO DE PREPARAÇÃO: DE 4 A 12 HORAS

Matriz de Metal Duro



BLANK



**ACABADA (torneada
retificada)**

Metalurgia do pó

- Pressão de compactação para diversos tipos de pós

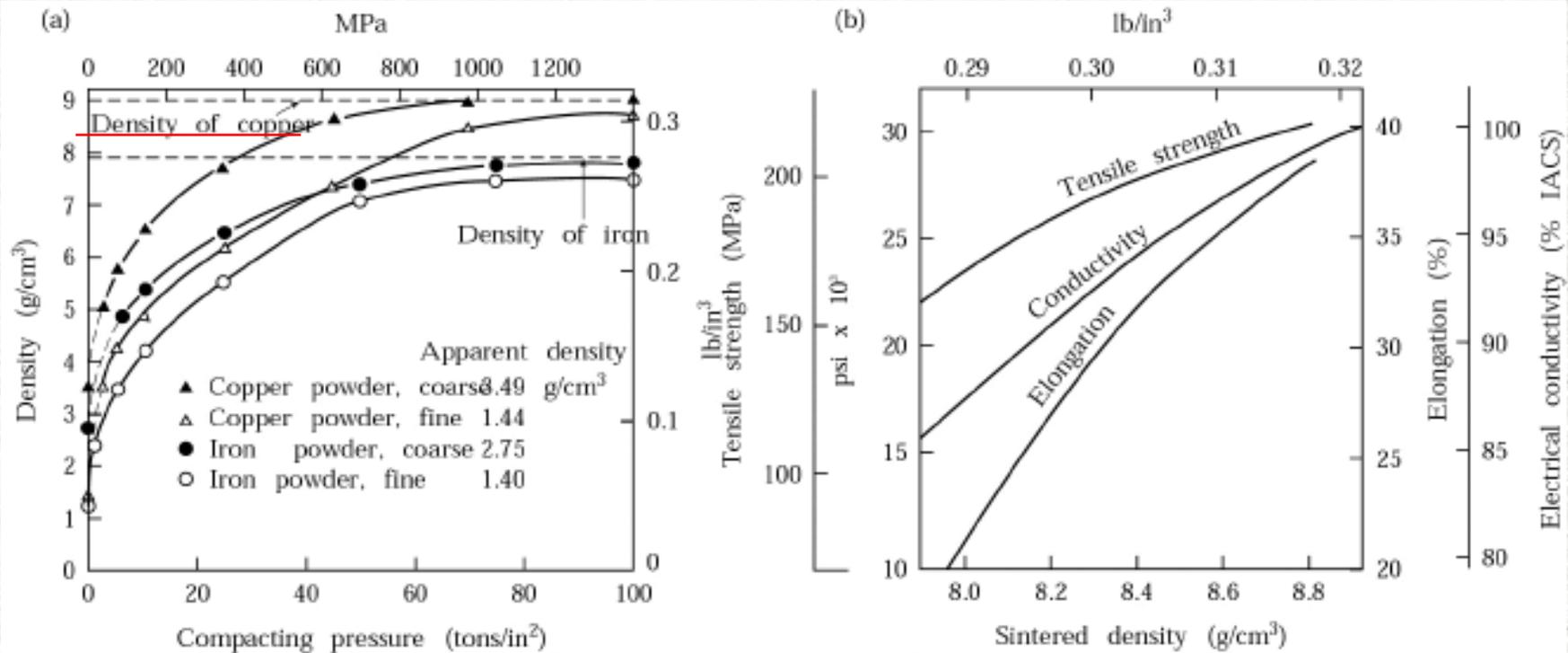
TABLE 17.2

Metal	Pressure (MPa)
Aluminum	70–275
Brass	400–700
Bronze	200–275
Iron	350–800
Tantalum	70–140
Tungsten	70–140
Other materials	
Aluminum oxide	110–140
Carbon	140–165
Cemented carbides	140–400
Ferrites	110–165

Metalurgia do Pó

• Efeito da densidade de compactação

Figure 17.9 (a) Density of copper- and iron-powder compacts as a function of compacting pressure. Density greatly influences the mechanical and physical properties of P/M parts. *Source: F. V. Lenel, Powder Metallurgy: Principles and Applications. Princeton, NJ; Metal Powder Industries Federation, 1980.* (b) Effects of density on tensile strength, elongation, and electrical conductivity of copper powder. IACS means International Annealed Copper Standard for electrical conductivity.



Referência Cobre estado Recozido:

Lim. Res. Tração: 195-255 Mpa

Densidade Real Cobre: 8,96 g/cm³

Alongamento em 2": 50%

Metalurgia do Pó

- Efeito da variação da densidade em moldes

Figure 17.10 Density variation in compacting metal powders in various dies: (a) and (c) single-action press; (b) and (d) double-action press. Note in (d) the greater uniformity of density, from pressing with two punches with separate movements, compared with (c). (e) Pressure contours in compacted copper powder in a single-action press. *Source: P. Duwez and L. Zwell.*

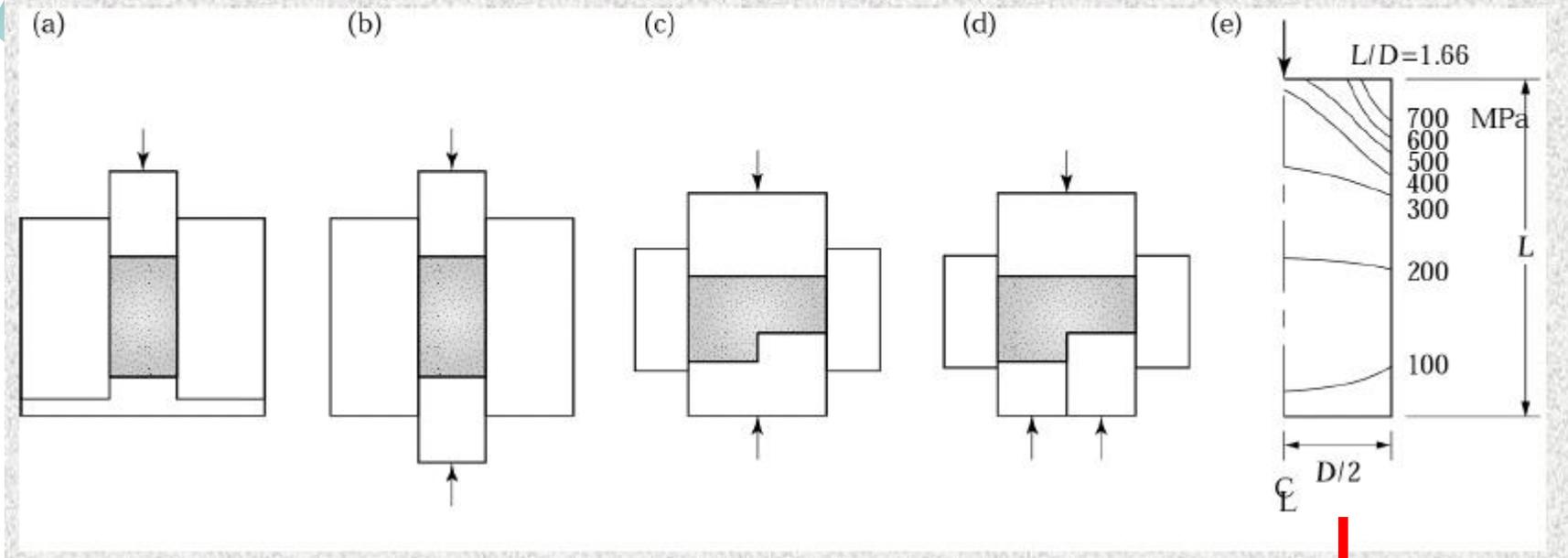
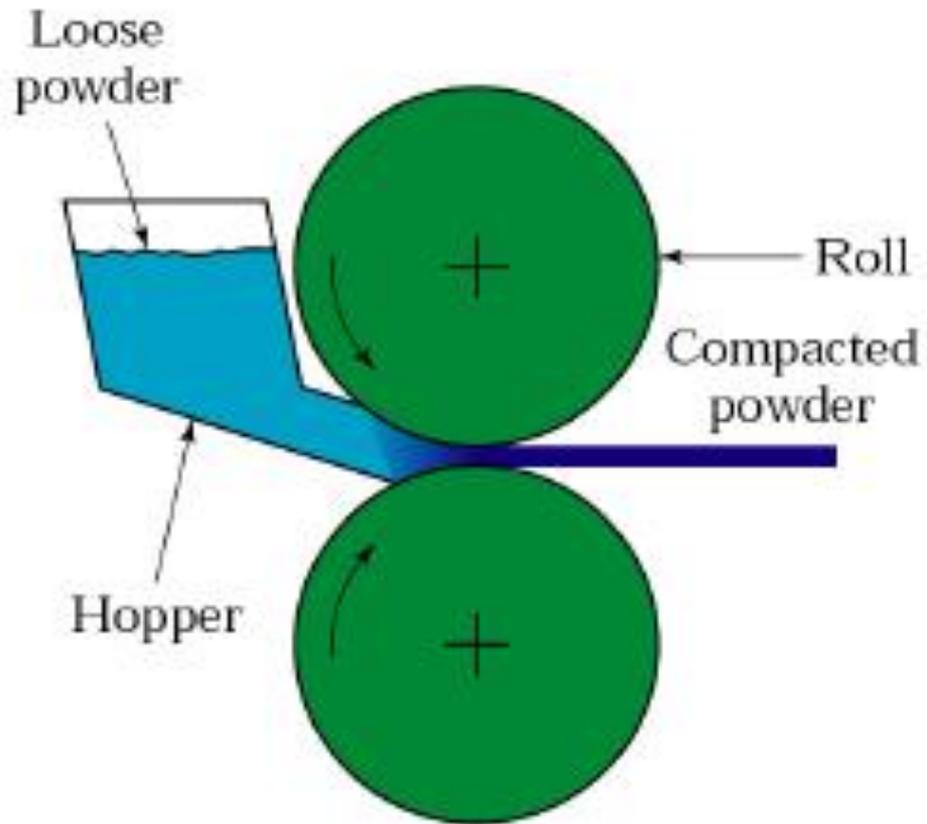


Diagrama de contorno das pressões em prensagem em única direção

Metalurgia do Pó

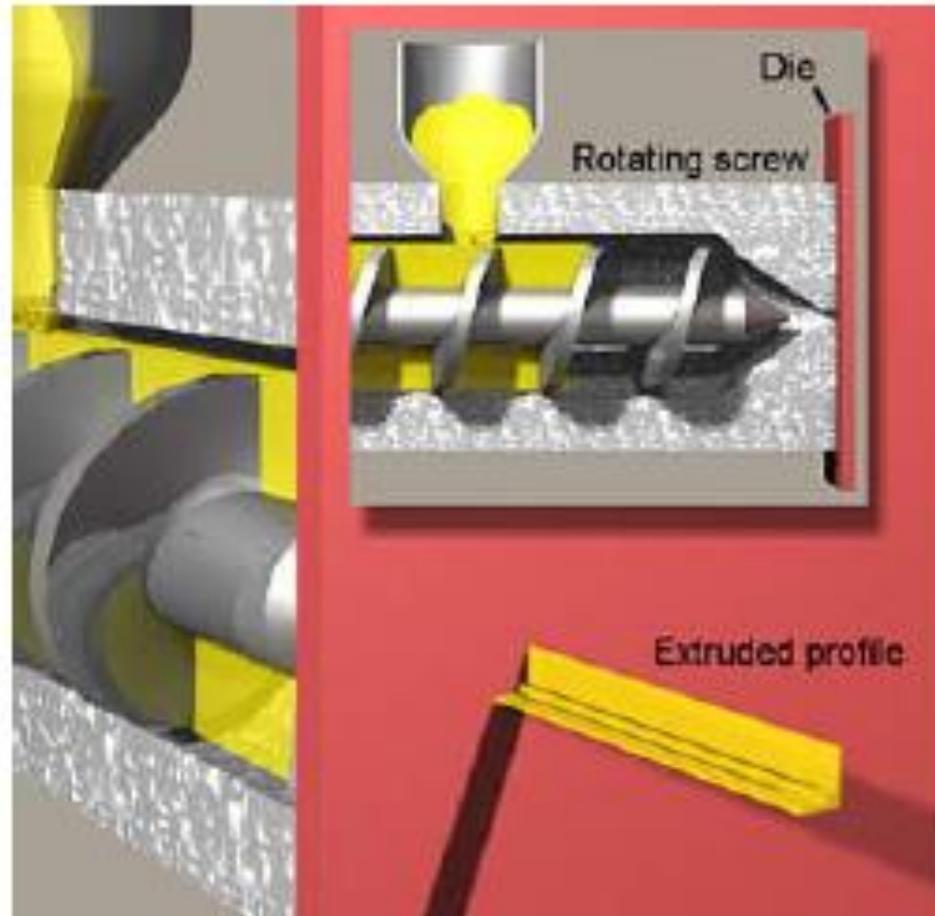


- Laminação de pó



Metalurgia do Pó

- Extrusão
de pó



Metalurgia do Pó

- Prensagem hidrostática a frio (CIP)

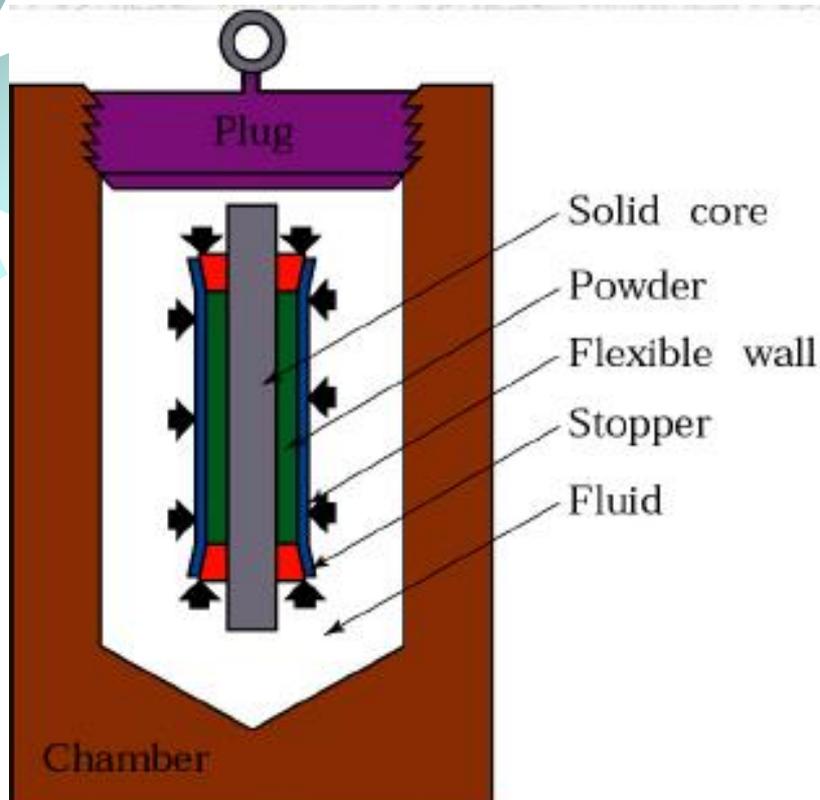


Figure 17.12 Schematic diagram of cold isostatic pressing, as applied to forming a tube. The powder is enclosed in a flexible container around a solid core rod. Pressure is applied isostatically to the assembly inside a high-pressure chamber. *Source:* Reprinted with permission from R.M. German, *Powder Metallurgy Science*. Princeton, NJ; Metal Powder Industries Federation, 1984.

Metalurgia do Pó

- Prensagem hidrostática a frio (CIP)



Metalurgia do Pó

- Prensagem hidrostática a quente (HIP)

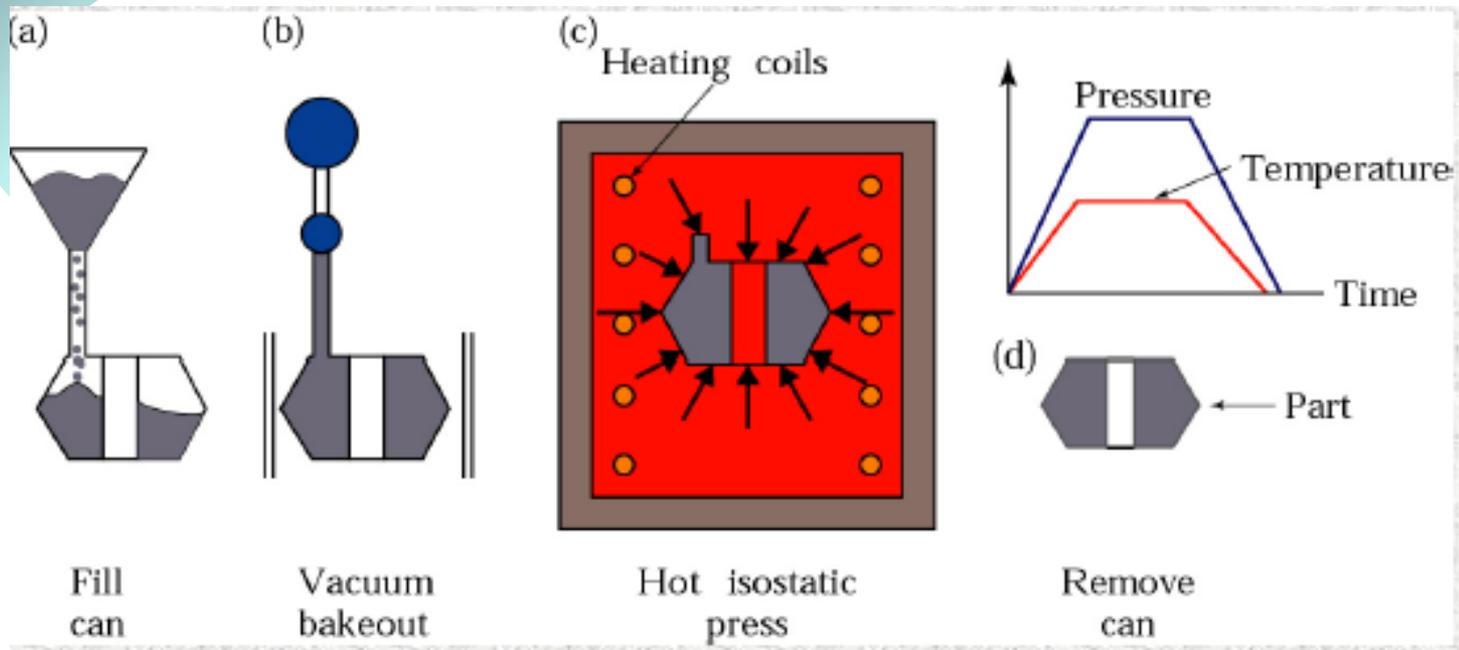


Figure 17.14 Schematic illustration of hot isostatic pressing. The pressure and temperature variation vs. time are shown in the diagram. *Source:* Preprinted with permission from R.M. German, *Powder Metallurgy Science*. Princeton, NJ; Metal Powder Industries Federation, 1984.

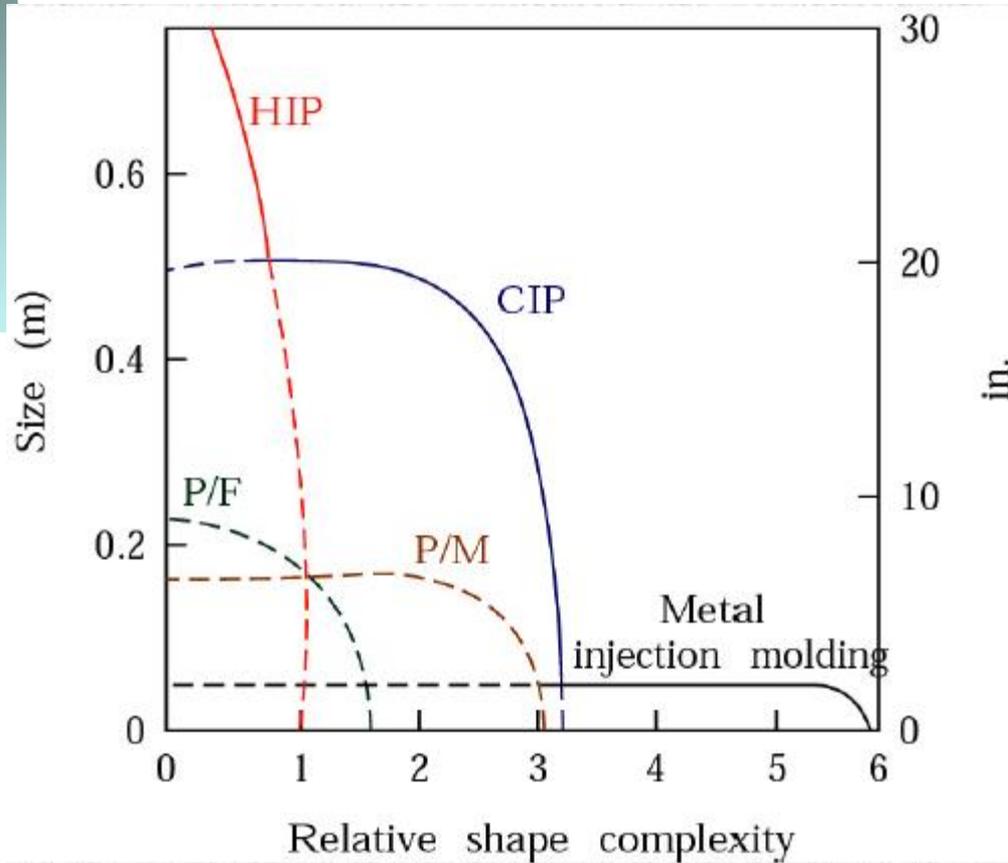
Metalurgia do Pó

- Prensa hidrostática a quente



Metalurgia do Pó

- Capacidade disponível para as operações de M/P



Capacidade, com relação ao tamanho e complexidade de forma, disponível a partir de diversas operações de M/P

HIP hot isostatic pressing

CIP cold isostatic pressing

P/F Powder Forging

P/M Powder Molding (Rolling and Extrusion)

Metalurgia do Pó

- | Comparação entre 4 processos de M/P

TABLE 18-6 Comparison of Four Powder Processing Methods

Characteristic	Conventional Press and Sinter	Metal Injection Molding (MIM)	Hot-Isostatic Pressing (HIP)	P/M Forging
Size of workpiece	Intermediate <5 pounds	Smallest <1/4 pounds	Largest 1–1000 pounds	Intermediate <5 pounds
Shape complexity	Good	Excellent	Very good	Good
Production rate	Excellent	Good	Poor	Excellent
Production quantity	>5000	>5000	1–1000	>10,000
Dimensional precision	Excellent ± 0.001 in./in.	Good ± 0.003 in./in.	Poor ± 0.020 in./in.	Very good ± 0.0015 in./in.
Density	Fair	Very good	Excellent	Excellent
Mechanical properties	80–90% of wrought	90–95% of wrought	Greater than wrought	Equal to wrought
Cost	Low \$0.50–5.00/lb	Intermediate \$1.00–10.00/lb	High >\$100.00/lb	Somewhat low \$1.00–5.00/lb



Metalurgia do Pó

- A principais vantagens da prensagem isostática
 - a) Por causa da pressão uniforme em todas as direções e ausência de atrito com a parede do molde, ela produz compactações totalmente densas com uniformidade estrutural de grãos e densidade (além de propriedades isotrópicas), independente da forma.
 - b) É capaz de manusear peças muito maiores do que nos outros processos.

Metalurgia do Pó

Limitações da prensagem isostática:

- a) Amplas tolerâncias dimensionais comparada às geradas por outros processos de compactação.
- b) Maiores custos e tempo comparada aos exigidos por outros processos.
- c) Aplicabilidade somente para pequenas quantidades de produção
(< 10.000 peças/ano)

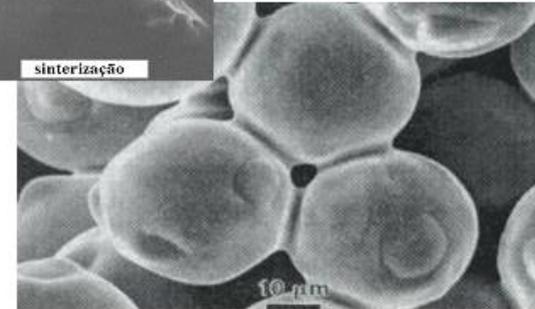
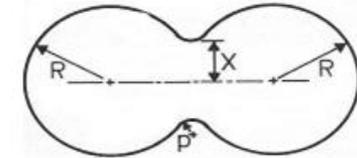
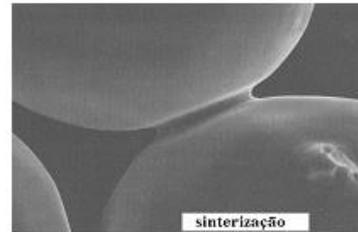
Metalurgia do Pó

- Sinterização – *Aquecimento sem fundir o material*

SINTERIZAÇÃO

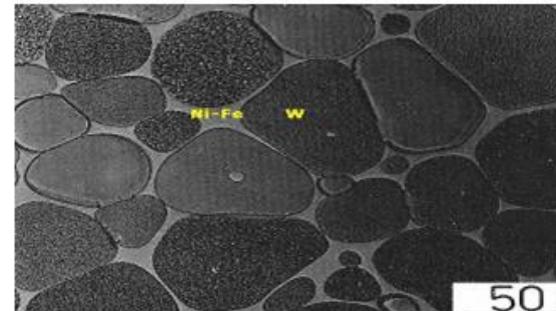
SINTERIZAÇÃO POR FASE SÓLIDA:

“Pescoço” de ligação entre as partículas de Pó



SINTERIZAÇÃO POR FASE LÍQUIDA:

O material com menor ponto de fusão se liquefaz e interconecta a partícula do outro Pó.



Metalurgia do Pó

- Sinterização – *Aquecimento sem fundir o material*
- A sinterização ocorre em temperaturas entre 70-90% da temperatura de fusão do metal (em escala absoluta)
- A principal força acionadora para a sinterização é a redução da energia superficial.
- Sob influência do calor, a área superficial é reduzida através da formação e crescimento de ligações entre as partículas, com a redução associada da energia superficial
- Quanto menor o tamanho inicial da partícula de pó, maior será a área de superfície total e maior será a força acionadora por trás do processo. **Figura**

Metalurgia do Pó

- Sinterização – *Seqüência*

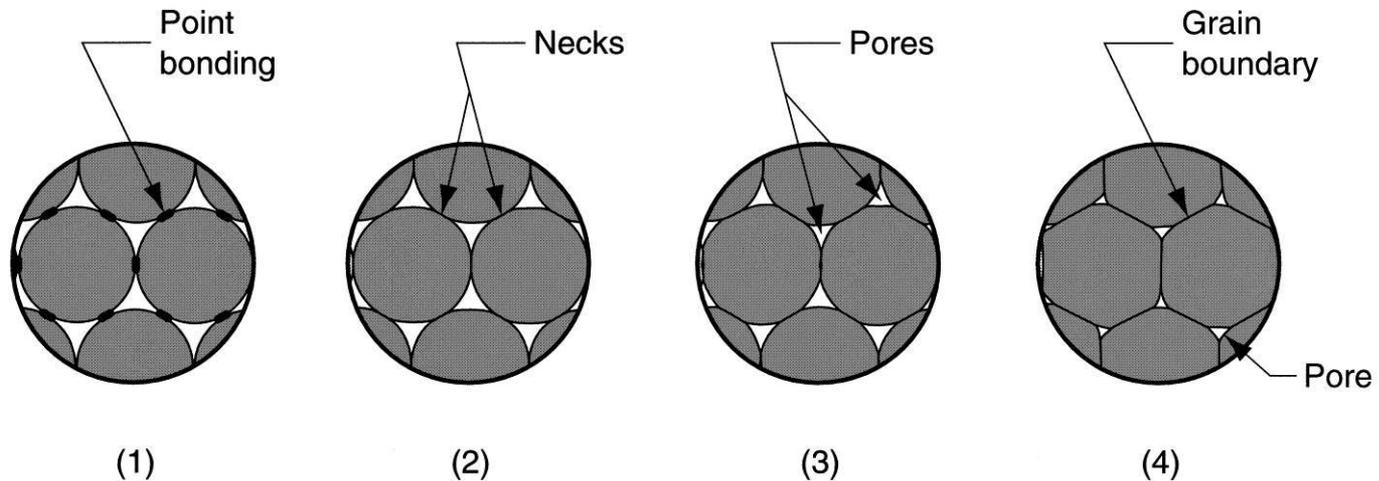
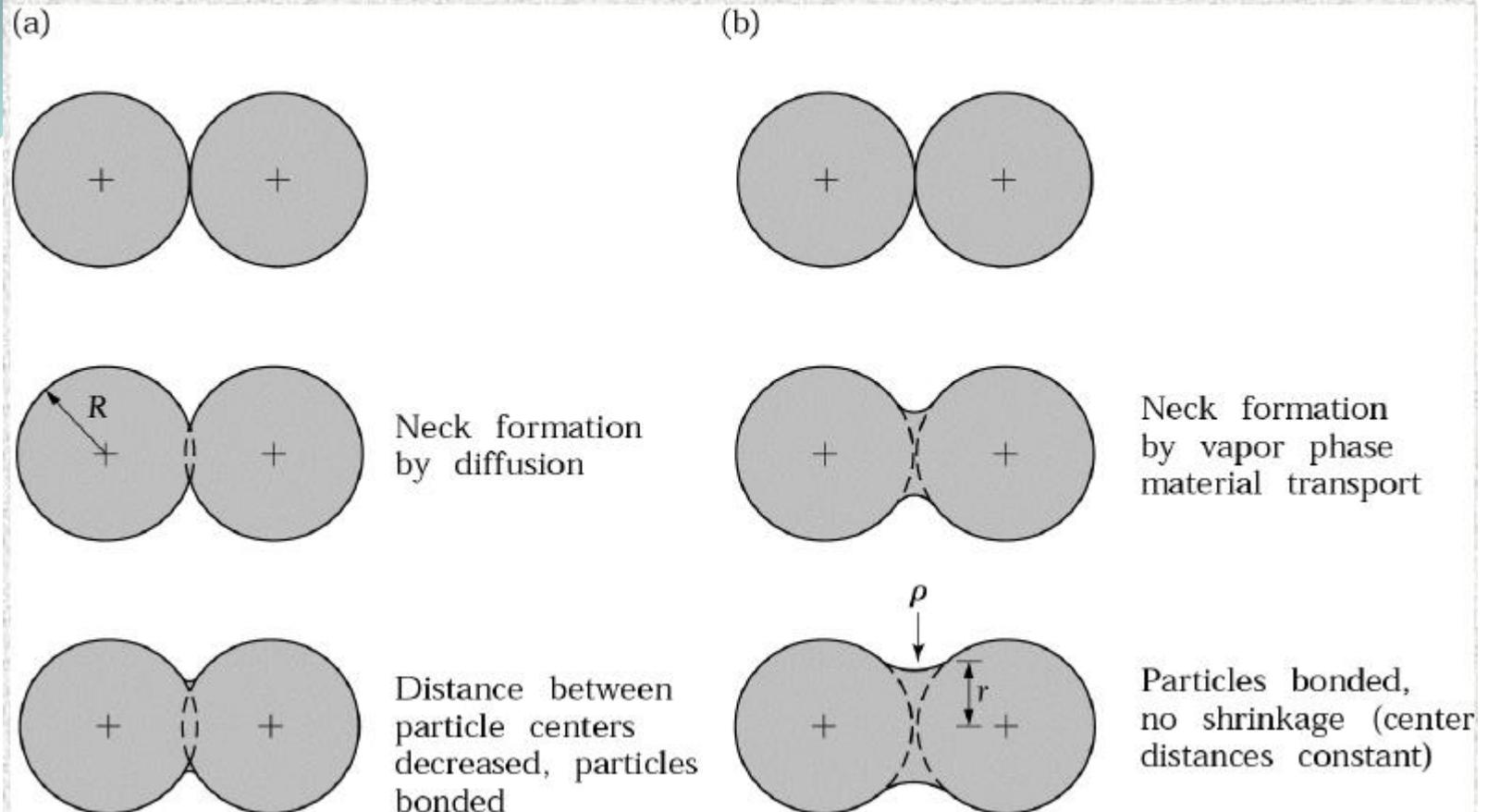


Figure. Sinterização em escala microscópica: (1) ligação entre partículas é iniciada por pontos de contato; (2) os pontos de contato aumentam e se transformam em "necks"; (3) os poros entre as partículas são reduzidos de tamanho; e (4) os contornos de grãos se desenvolvem entre as partículas no lugar das regiões de "necks".

Metalurgia do Pó

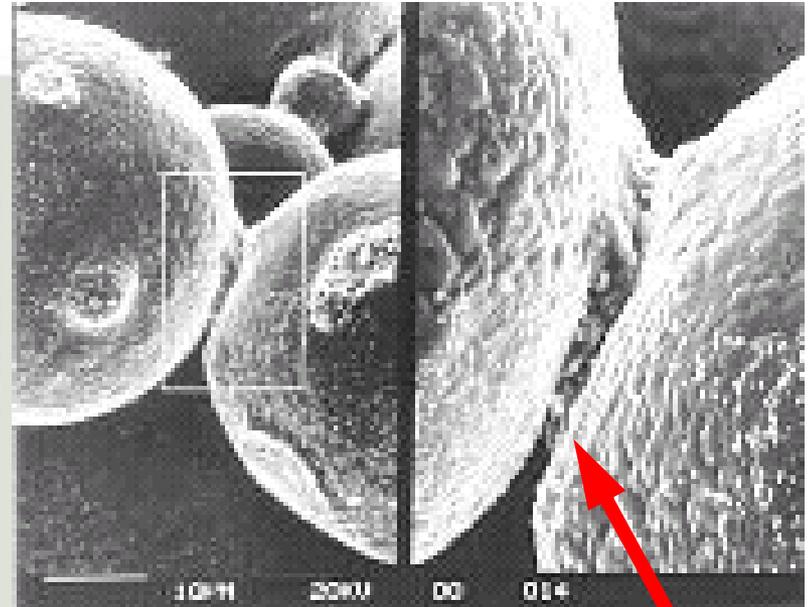
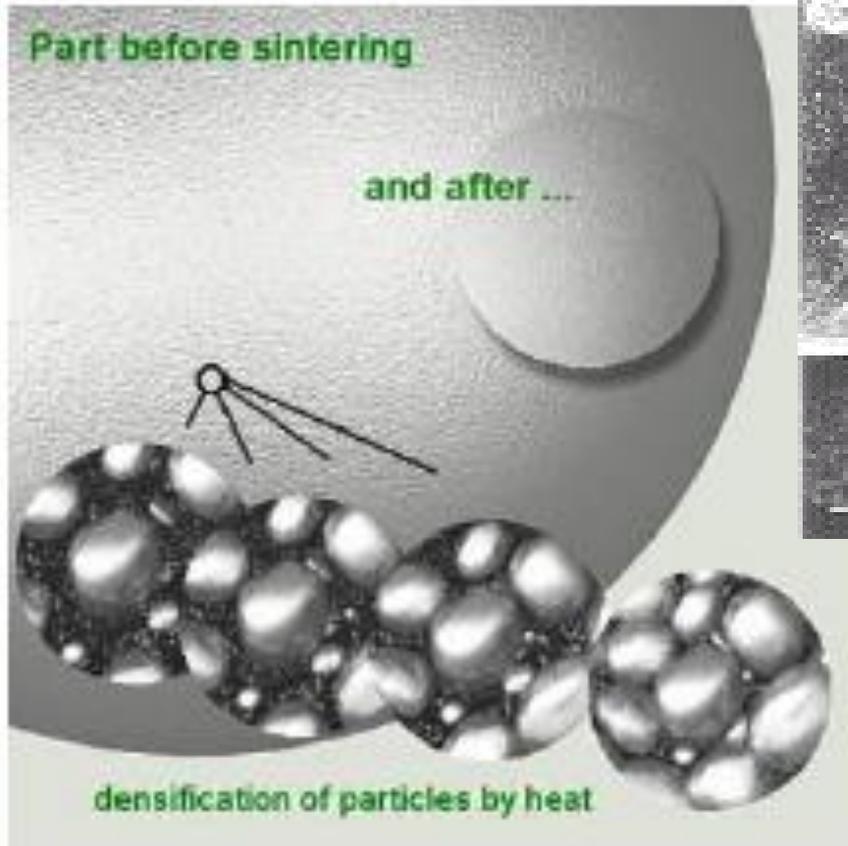
• Sinterização – Seqüência

Figure 17.16 Schematic illustration of two mechanisms for sintering metal powders: (a) solid-state material transport; (b) liquid-phase material transport. R = particle radius, r = neck radius, and ρ = neck profile radius.



Metalurgia do Pó

- Sinterização – *Fenômeno*



“necks”.



Ciclo de sinterização e fornos

Três etapas fazem parte do ciclo de sinterização:

- 1) Pré-aquecimento, lubrificantes e ligantes são evaporados;
- 2) Sinterização;
- 3) Resfriamento.



Ciclo de sinterização e fornos

A atmosfera dos fornos podem e em alguns caso devem ser controladas. ***Isso ocorre pois:***

- 1) Ajudar na remoção de lubrificantes e ligantes usados durante a prensagem,
- 2) Oferecer uma atmosfera redutora para remover óxidos existentes,
- 3) Proteção contra oxidação,
- 4) Oferecer uma atmosfera carburizantes,

A atmosfera dos fornos são geralmente inertes, a base de: ***nitrogênio, amônia dissociada, hidrogênio e gás natural***. Atmosfera com vácuo é usada somente em alguns metais como W e aço inox.

Metalurgia do Pó

Ciclo de sinterização e fornos

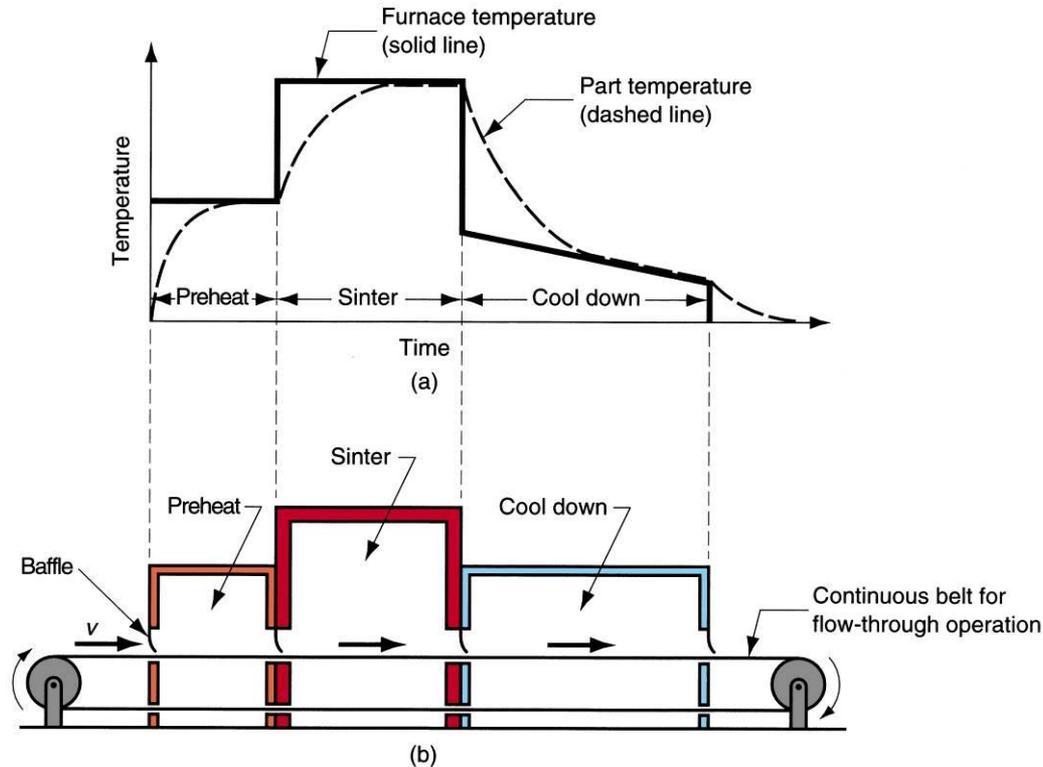


Figura (a) Típico ciclo de tratamento térmico na sinterização; e (b) Seção transversal em corte de um forno de sinterização contínua.

Metalurgia do Pó

- Tempo e temperatura de Sinterização para diversos materiais metálicos

TABLE 17.3

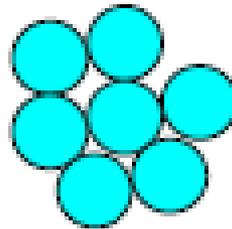
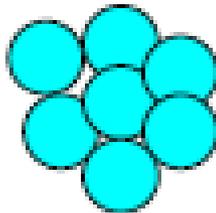
Material	Temperature (° C)	Time (Min)
Copper, brass, and bronze	760–900	10–45
Iron and iron-graphite	1000–1150	8–45
Nickel	1000–1150	30–45
Stainless steels	1100–1290	30–60
Alnico alloys (for permanent magnets)	1200–1300	120–150
Ferrites	1200–1500	10–600
Tungsten carbide	1430–1500	20–30
Molybdenum	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantalum	2400	480

Metalurgia do Pó

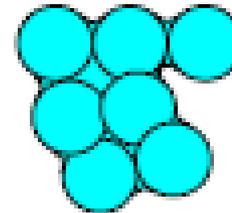
- Problemas decorrentes da sinterização

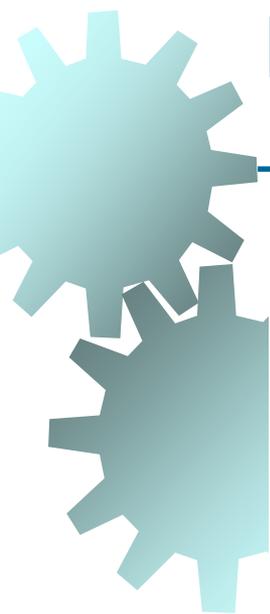
Vazios

fusão incompleta



vs.





Regras para projeto de peças para M/P

- *Lotes econômicos* geralmente exigem grandes quantidades para justificar custos de equipamentos e ferramental especial.
- *Quantidades mínimas* de 10,000 un. É o sugerido!
- *M/P é singular* em sua capacidade de fabricar peças com nível controlado de porosidade.
 - *Porosidades até 50% são possíveis*
- *M/P pode ser usada para fazer peças a partir de metais e ligas não convencionais* - materiais que são difíceis senão impossíveis de produzir por outros meios

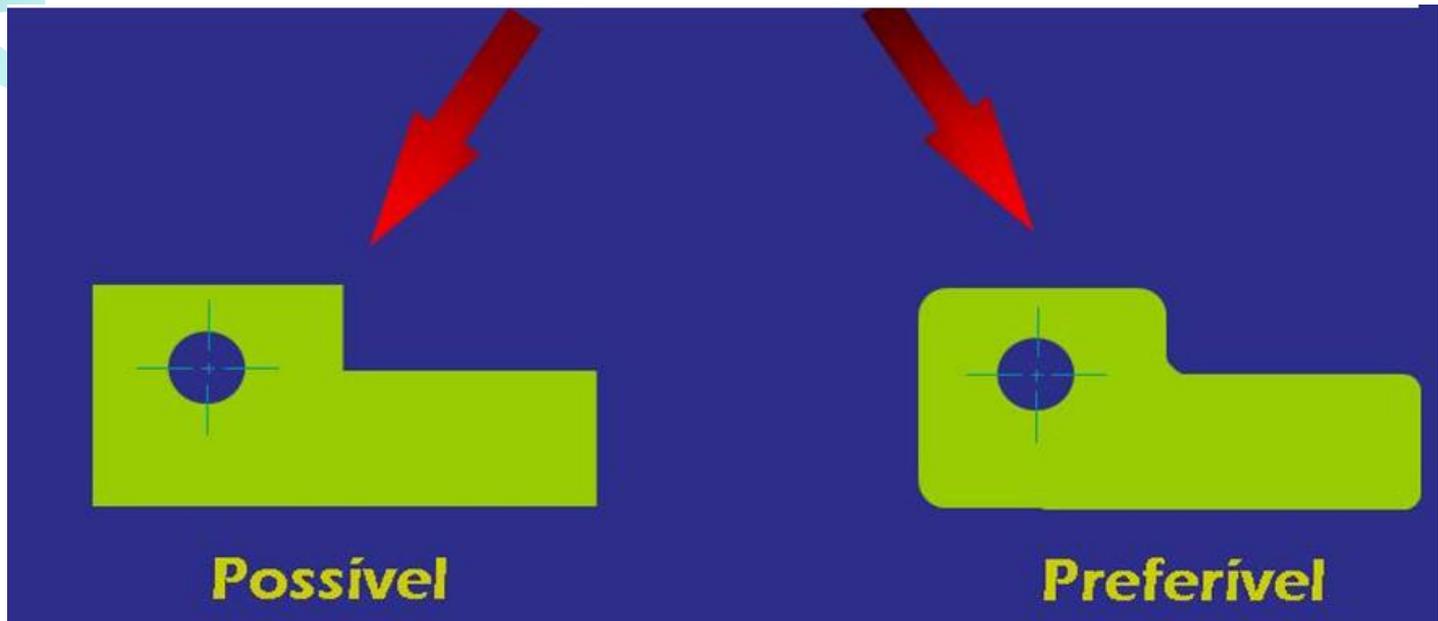


Regras para projeto de peças para M/P

1. Peça deve ter lados verticais ou próximos a verticais, embora degraus sejam permitidos
2. Geometria de peça deve permitir a ejeção da matriz
3. Características de projeto como furos e canais nas laterais das peças devem ser evitados
4. Canais e furos verticais são admissíveis porque eles não interferem na ejeção
5. Furos verticais podem ter formas de seção transversal com formas diferentes de circular

Metalurgia do Pó

- Regras para projeto de peças para M/P



- Regras para projeto de peças para M/P

Furos e canais laterais

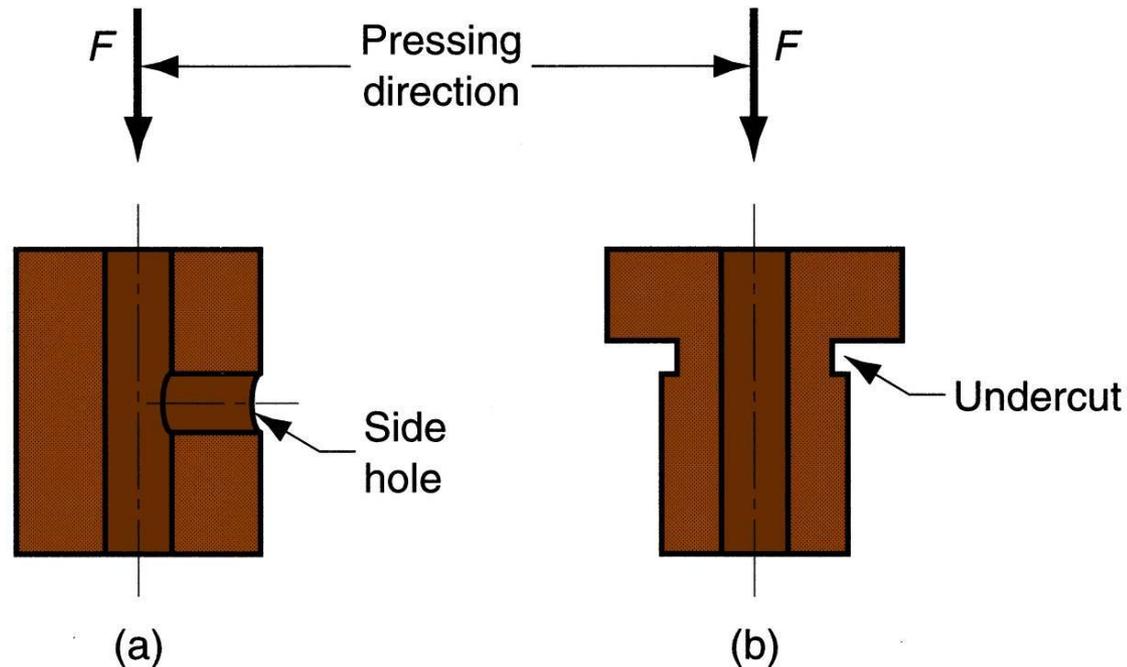


Figura Características da peça a serem evitadas em M/P: furos laterais e (b) canais laterais pois torna impossível a ejeção das peças.

• Regras para projeto de peças para M/P

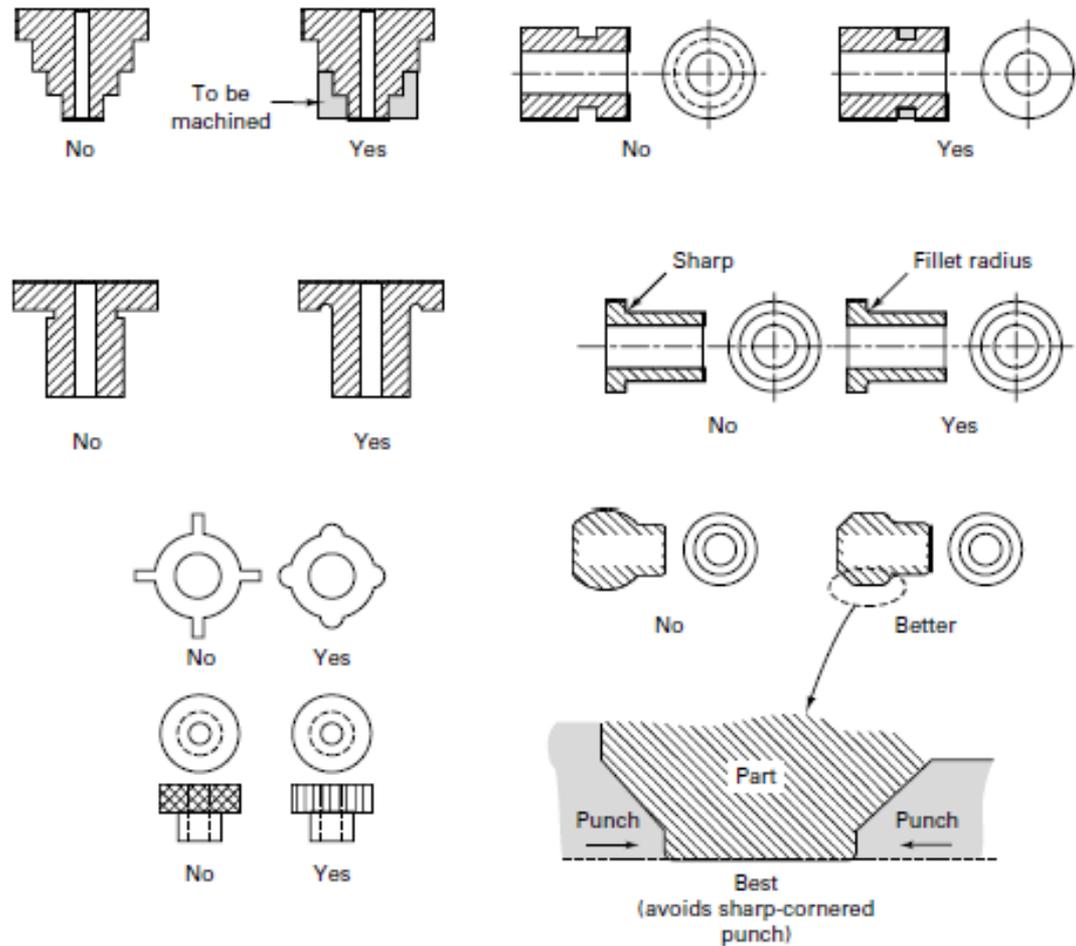
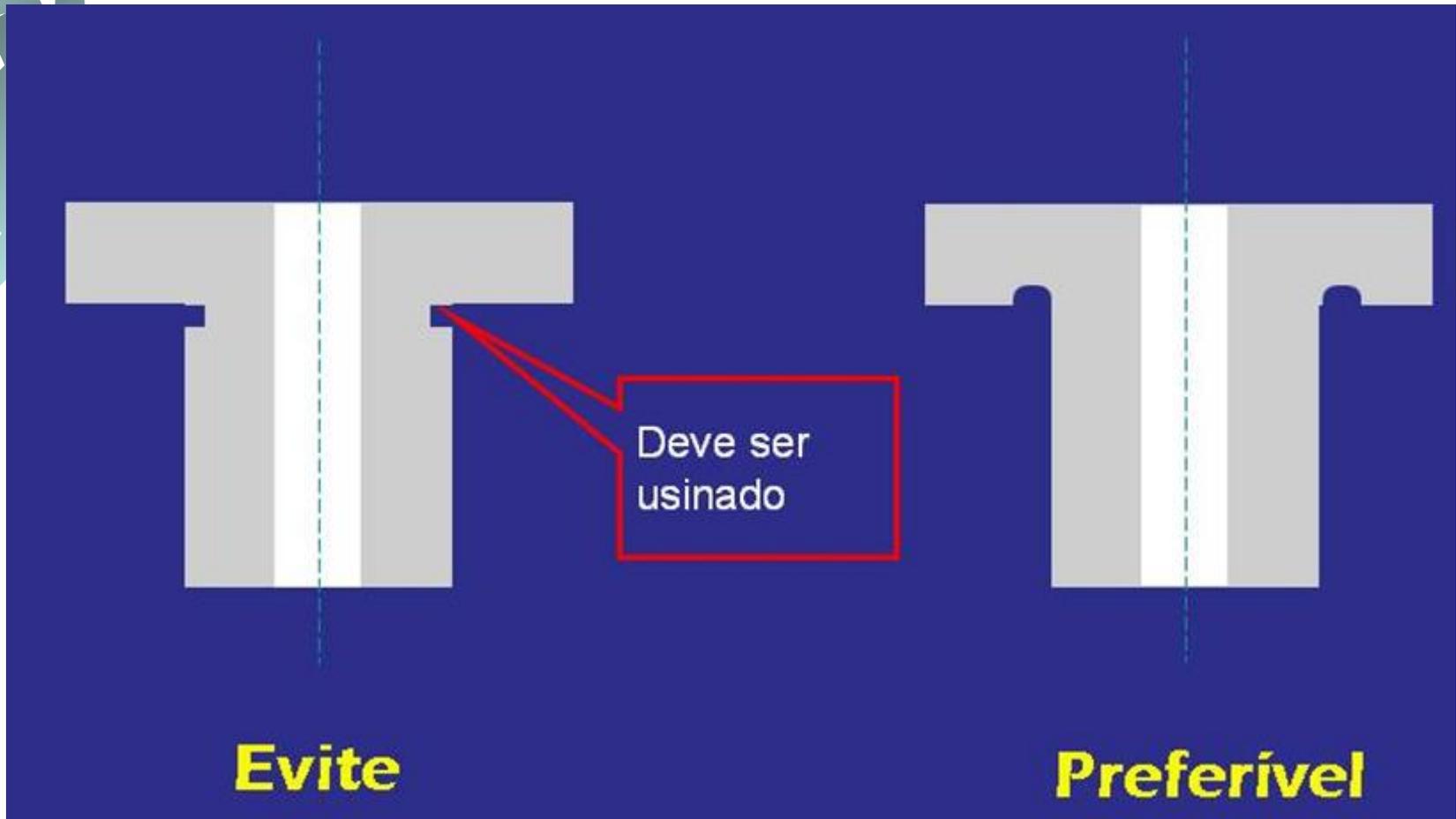
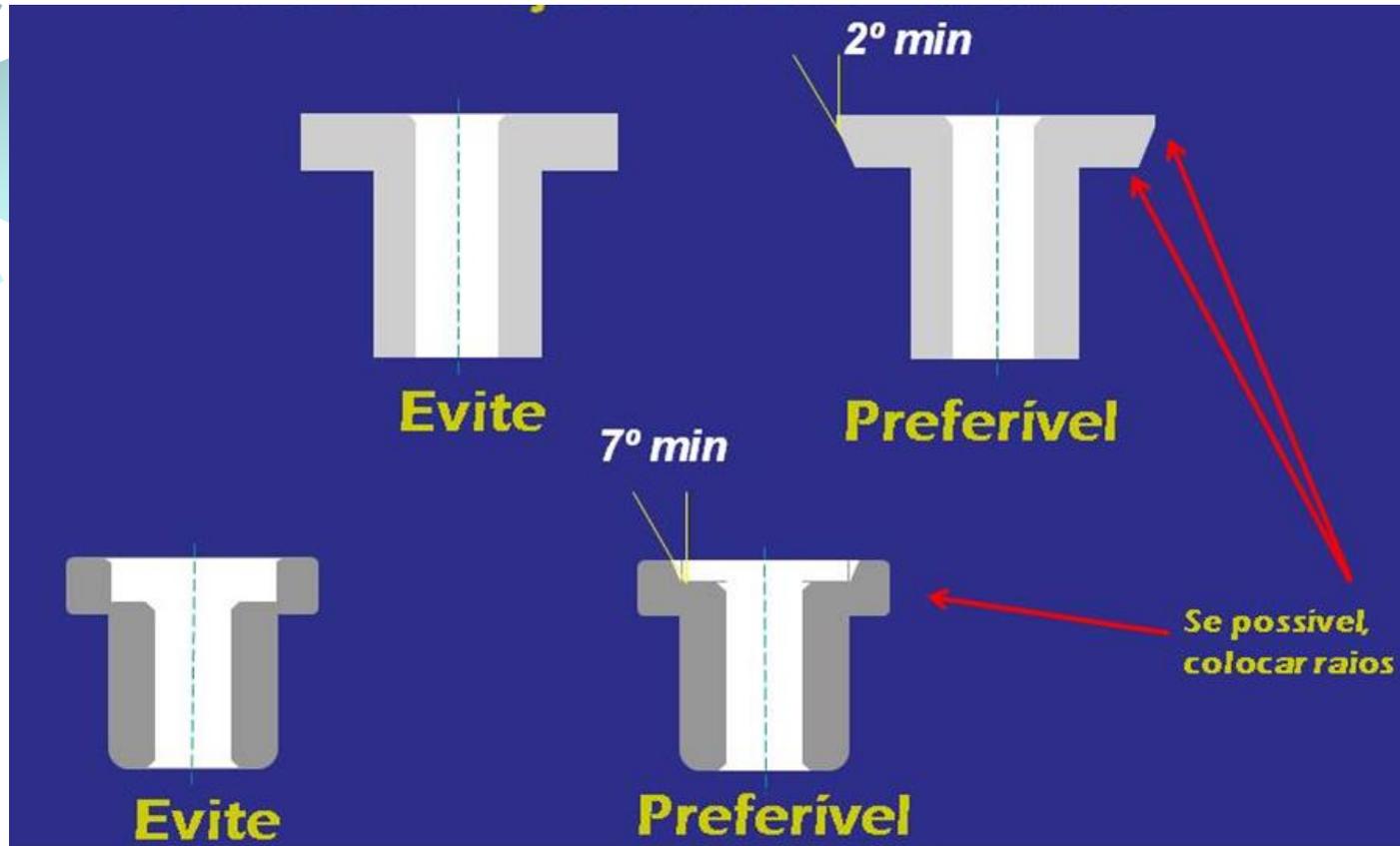


FIGURE 18-17 Examples of poor and good design features for powder metallurgy products. Recommendations are based on ease of pressing, design of tooling, uniformity of properties, and ultimate performance.

- Regras para projeto de peças para M/P

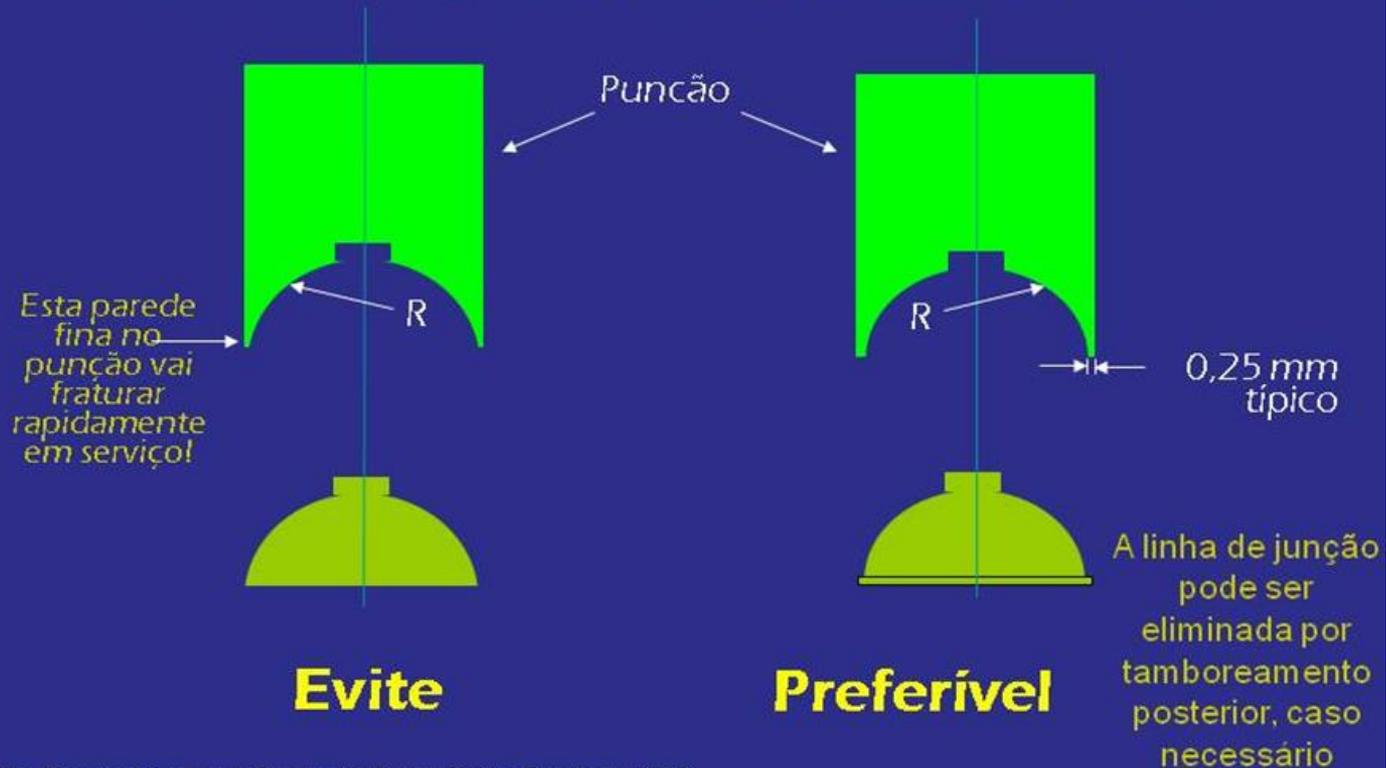


- Regras para projeto de peças para M/P

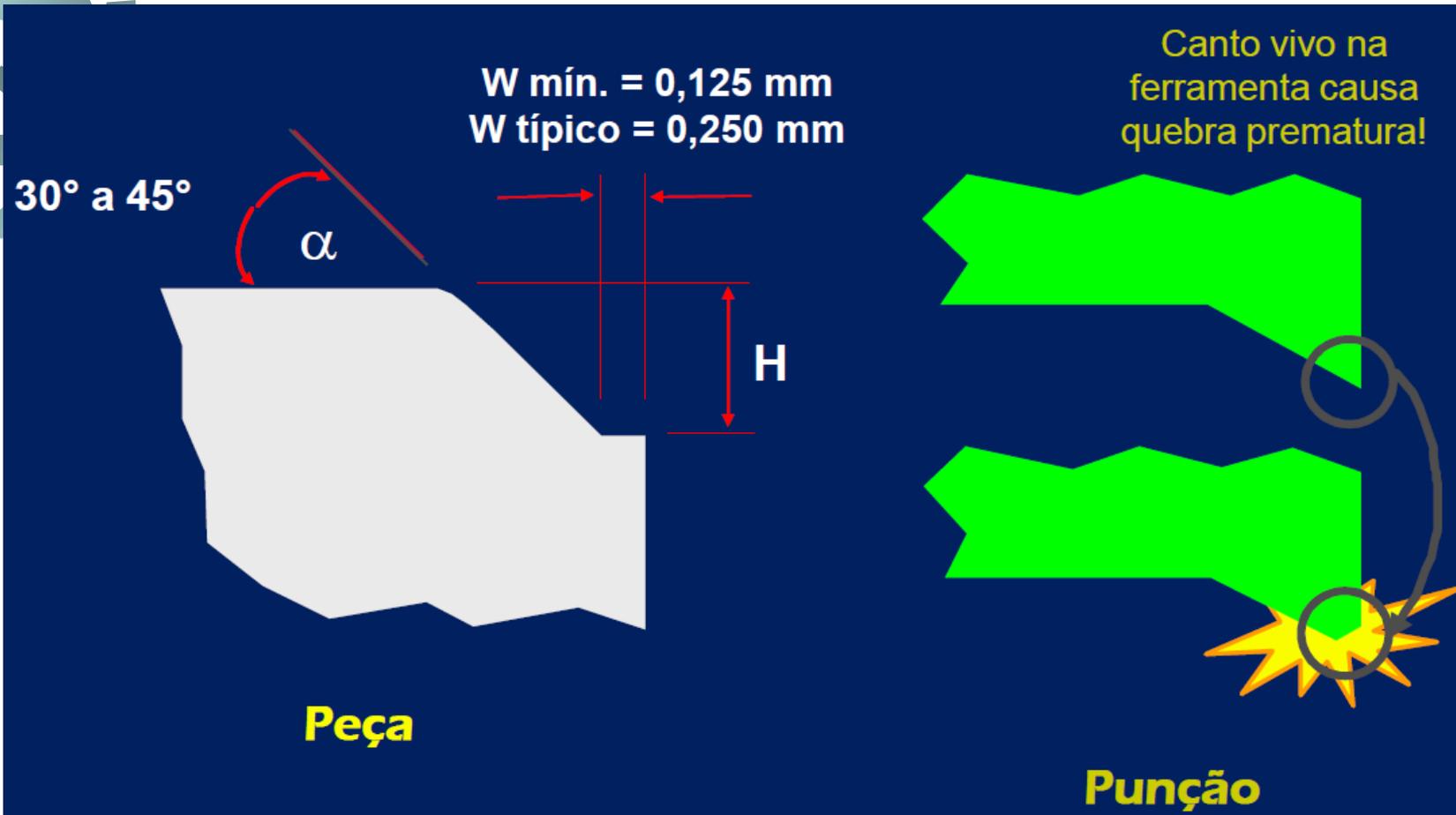


Regras para projeto de peças para M/P

Dicas de Projeto: Raios / Acabamentos



Regras para projeto de peças para M/P





Regras para projeto de peças para M/P

Roscas não podem ser fabricadas através de M/P; têm que ser posteriormente usinados na peça

Chanfros e cantos vivos com raio são admissíveis na M/P

Porém problemas podem ocorrer devido a rigidez do punção quando os ângulos são muito agudos

Espessura de paredes devem ser de no mínimo 1,5 mm (0.060 pol.) entre furos

Mínimo recomendado para diâmetros do furo é de 1,5 mm

Metalurgia do Pó

- Peças em Titânio ou ligas de Titânio***** forjadas e M/P e potencial para redução de custo

TABLE 17.6

Part	Weight (kg)			Potential cost saving (%)
	Forged billet	P/M	Final part	
F-14 Fuselage brace	2.8	1.1	0.8	50
F-18 Engine mount support	7.7	2.5	0.5	20
F-18 Arrestor hook support fitting	79.4	25.0	12.9	25
F-14 Nacelle frame	143	82	24.2	50

*****M/P pode ser usada para fazer peças a partir de metais e ligas não convencionais - materiais que são difíceis senão impossíveis de produzir por outros meios

Metalurgia do Pó

- Comparação das propriedades mecânicas para Ti-6Al-4V

TABLE 17.5

Process(*)	Density (%)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Cast	100	840	930	7	15
Cast and forged	100	875	965	14 40	14
Blended elemental (P+S)	98	786	875	8	17
Blended elemental (HIP)	> 99	805	875	9	26
Prealloyed (HIP)	100	880	975	14	

(*) P+S = pressed and sintered, HIP = hotisostatically pressed.

Source: R.M. German.

Metalurgia do Pó

Exemplos de conversão

Aplicação:

Automobilística - Caixa de mudanças (câmbio).

Projeto original:

Ferro fundido.

Usinado.

Conversão para o sinterizado:

Aço sinterizado DIN 30910 Sint D39

Compactado, sinterizado, calibrado, usinado.

Comentários:

Redução de custo em função da eliminação de operações de usinagem. Menor variabilidade das propriedades mecânicas e tribológicas.



Garfo de engate do reverso

Metalurgia do Pó

Exemplos de conversão

Aplicação:

Automobilística – Amortecedor de suspensão.

Projeto original:

Material: aço ABNT 12L14

Processo: usinagem em 4 operações a partir de barra.

Conversão para o sinterizado:

Material: aço sinterizado MPIF F-0005-15

Processo: compactação, sinterização, usinagem (1 operação), ferrox.

Comentários:

Vantagens na maior precisão dimensional e eliminação da operação de lavagem antes da montagem da peça.



Arruela suporte



Metalurgia do Pó

- Capacidades do processo

Sumarizando:

- a) M/P é um processo para fabricação de peças a partir de metais refratários com alto ponto de fusão, peças as quais podem ser difíceis de serem produzidas ou economicamente inviáveis por outros métodos.
- b) M/P oferecem altas taxas de produção com peças relativamente complexas, através do uso de equipamentos automatizados que exigem pouca M.O.
- c) M/P oferece bom controle dimensional e, em muitos casos, resulta na eliminação de processos de usinagem e operações de acabamento; dessa forma, reduz-se refugos e re-trabalho e economiza energia.
- d) A disponibilidade de ampla faixa de composições torna possível obter propriedade mecânicas e físicas, tais como rigidez, amortecimento, dureza, densidade, tenacidade, e propriedade elétricas e magnéticas específicas.
- e) Oferece capacidade de impregnação e infiltração para aplicações especiais.