



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3203

- METALURGIA DO PÓ -

2020.1



Metalurgia do pó



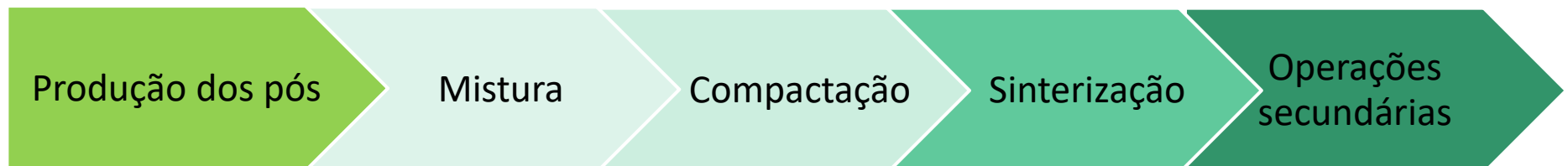


Metalurgia do pó

Definição

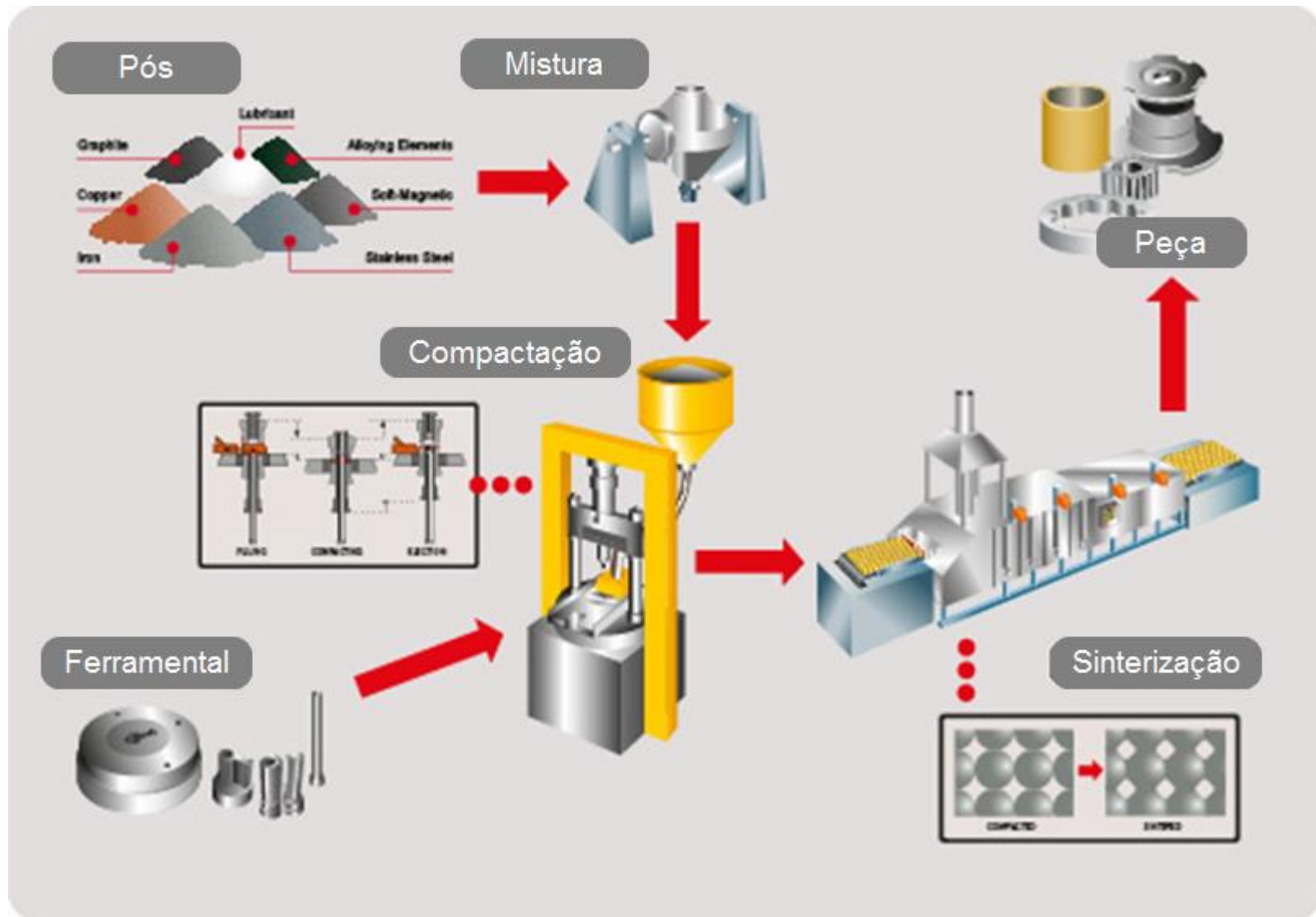
Ramo da engenharia voltado a produção de pós (metálicos, cerâmicos, entre outros) e a fabricação de peças acabadas ou semiacabadas (*near net shape*) através da mistura de pós para a obtenção de ligas ou compósitos.

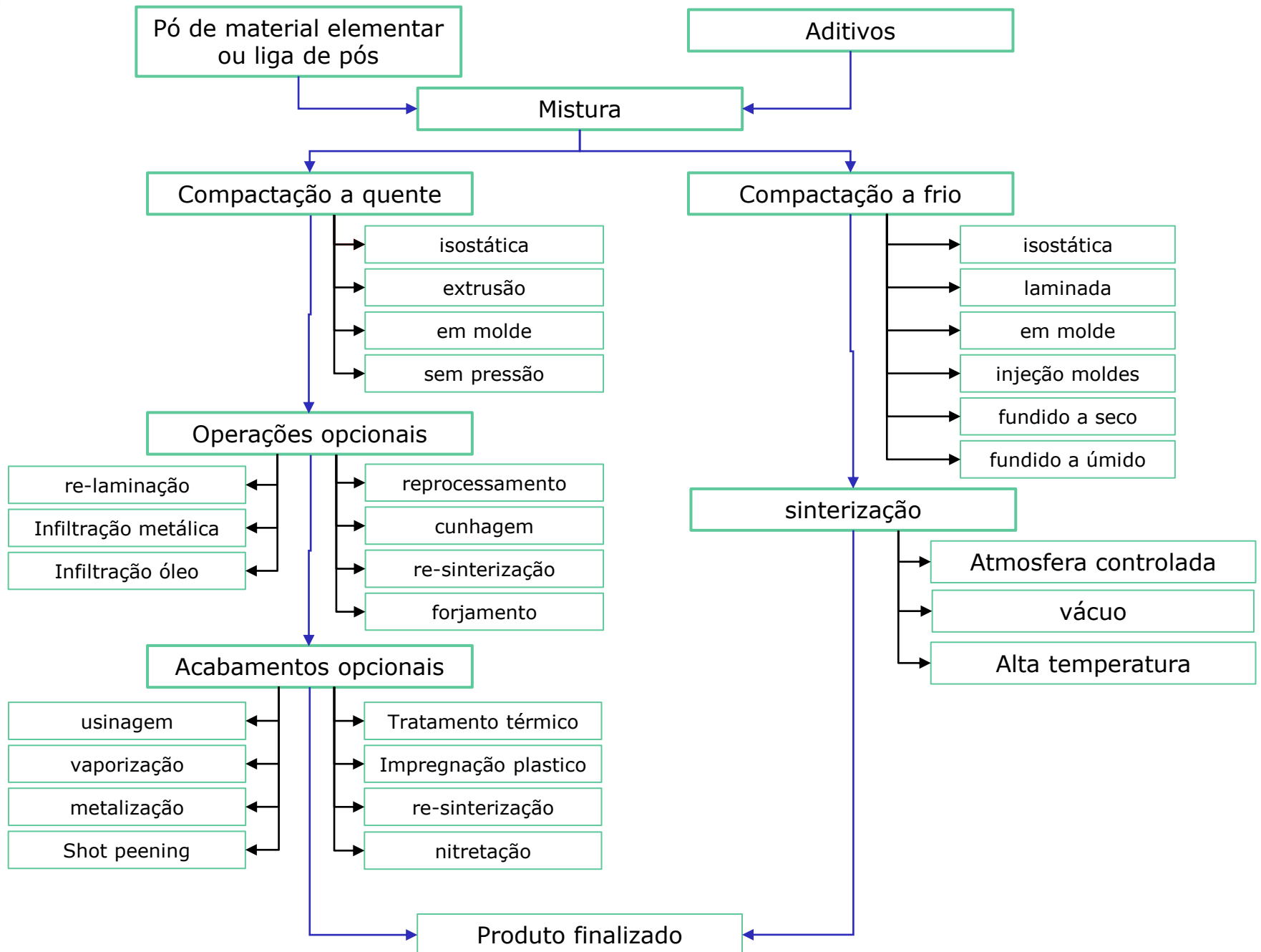
Fases





Metalurgia do pó







Onde a Metalurgia do Pó é empregada





Metalurgia do pó

Vantagens do processo

- Ideal para produzir peças com materiais de alto ponto de fusão
- Produção de grandes lotes de peças complexas, em uma condição *near net shape*.
- Usinagem (ferramentas de geometria definida)
- Baixo desperdício de material, sem produção de cavacos ou retalhos
- Grande versatilidade na composição de ligas, compósitos etc.
- Produção de propriedades específicas, exemplo: grau de porosidade, amortecimento, magnetismo, etc.



Metalurgia do pó

Vantagens do processo

- Bom acabamento superficial
- Amigável ambientalmente e energeticamente eficiente
- Produção de peças com porosidade controlada (ex.: filtros)
- Processo com alto grau de automatização
- Produtividade de cerca de 1.500 peças/hora são comuns, podendo chegar a 60.000 peças/horas para peças de baixa complexidade



Metalurgia do pó

Desvantagens do processo

Custos dos pós empregados

Custo de moldes e matrizes

Alto custo para pequenos lotes de produção.
Lotes a partir de 10.000 peças são justificados

Limitação quanto a forma e tamanho das peças

Propriedades mecânicas tais como resistência a tração e ductilidade são menores do que as forjadas

O custo das operações de acabamento é menor do que outros processos

Máquina e fornos especiais



Metalurgia do pó

Desvantagens do processo

- Toxidade dos gases do processo
- Toxidade de alguns pós empregados
- Manipulação e operação necessita de equipamentos protetivos
- Condições de estocagem de material
- Materiais podem ser inflamáveis, a reatividade deve ser informada
- Alguns materiais podem causar irritações respiratórias, oculares e na pele.
- Sinterização em condições controladas



Metalurgia do pó

Vídeos exemplos

<https://www.youtube.com/watch?v=4zXkn9iyC0c>

Compaction in Powder Metallurgy production processes

<https://www.youtube.com/watch?v=azGg68B-Glk>

Powdered Metal Process

https://www.youtube.com/watch?v=0QrynzJ_IZ4

How carbide inserts are made by Sandvik Coromant

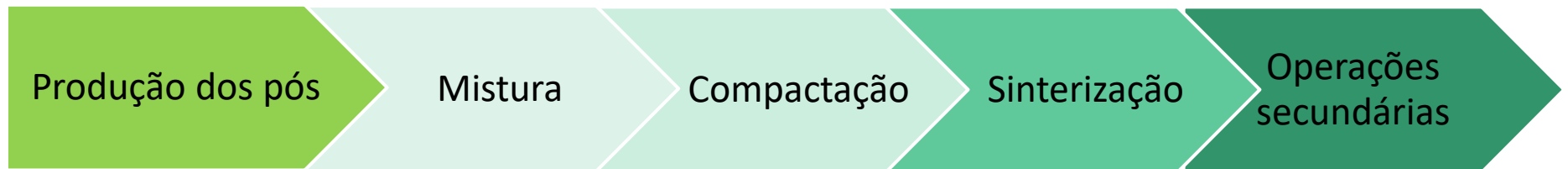
<https://www.youtube.com/watch?v=PetwxkqM-kQ>

Powder Metal 101

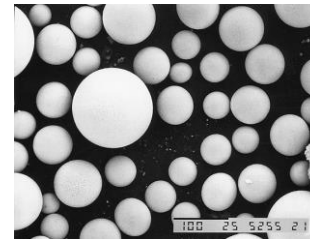


Metalurgia do pó

Fases

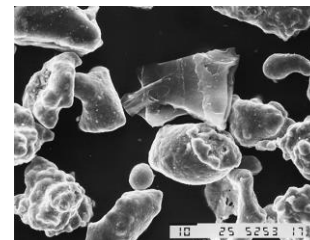


Atomização



→ Pós esféricos

Cominuição mecânica
ou pulverização



→ Pós angulados

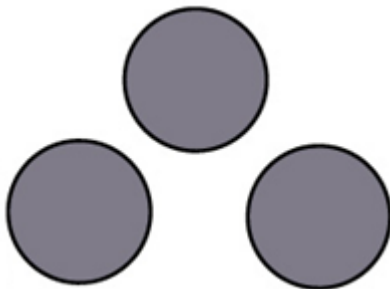
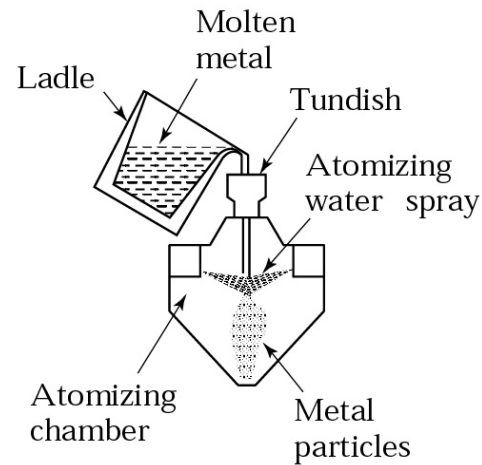


Metalurgia do pó

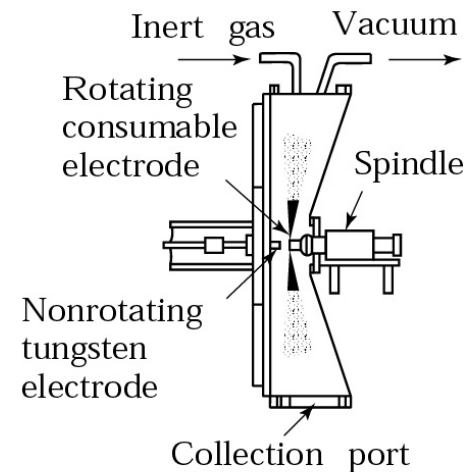
Produção dos pós



Atomização



Formas dos pós



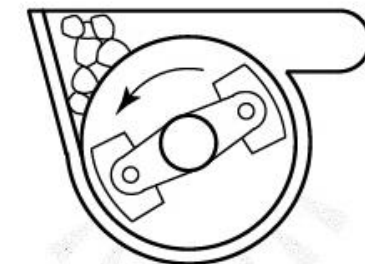
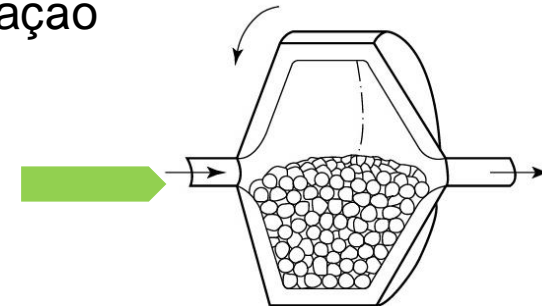
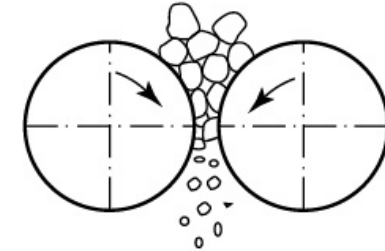


Metalurgia do pó

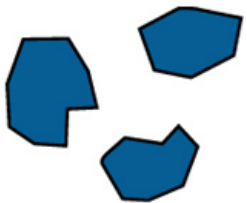
Produção dos pós

Cominuição mecânica ou pulverização

Processo de obtenção de pós que envolve o esmagamento por rolos, moinhos, moinhos de bolas. Para materiais frágeis ou de baixa ductilidade utiliza-se a retificação



Formas dos pós



irregular com cantos angulares



irregular com cantos arredondados



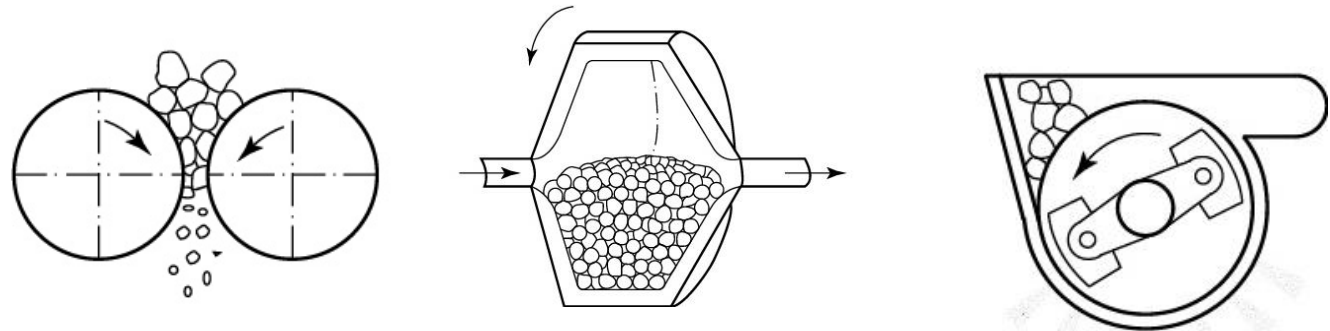
Flocos irregulares



Metalurgia do pó

Produção dos pós

Cominuição mecânica ou pulverização



Um processo semelhante ao de cominuição, mas que utiliza diferentes tipos de metais é o *mechanical alloying*. Durante a moagem os diferentes metais reagem, produzindo uma liga na forma de pó. Embora existam outros processos esses são dos mais importantes.



Metalurgia do pó

Produção dos pós

Redução de óxidos

Alguns tipos de pós podem ser também produzidos por redução de óxidos, utilizando gases como hidrogênio e monóxido de carbono. Os pós produzidos por esse método são porosos e de tamanho uniforme. Outro processo de produção de pós é o eletrolítico. Nesse processo há deposição do pó metálico em um dos eletrodos.



Metalurgia do pó

Produção dos pós

Tipos de pós

Nanopós

- São constituídos basicamente por pós de cobre, alumínio, ferro e titânio.
- São reativos (pegam fogo espontaneamente)
- Contaminam-se quando expostos ao AR
- Permitem a obtenção de peças sem poros
- Permitem melhores propriedades mecânicas

Pós micro encapsulados

- São completamente revestidos por um ligante
- Os ligantes agem como isolantes elétricos
- São compactados a morno
- O ligante permanece quando utilizados



Metalurgia do pó

Produção dos pós

Tamanhos, Formas e Distribuição

Tamanho

- O tamanho dos pós é definido através de peneiras
- O peneiramento é sequencial, com peneiras sucessivas com malhas (mesh) mais finas
- Outras formas de classificação de tamanho de pós são:
 - Sedimentação
 - Análise microscópica (MeV, scanning electron microscopy)
 - Ótica (com fotodetector)
 - Ótica com Laser
 - Ótica com sensor e partículas em suspensão em líquidos



Metalurgia do pó

Produção dos pós

Tamanhos, Formas e Distribuição

Forma da partícula e fator de forma

- A forma influencia nas características do processo
- Forma é caracterizada pela relação esbeltes e o fator de forma
- Relação de esbeltes é entre a maior e menor dimensão da partícula.
- Relação de esbeltes varia de 1 para partícula esféricas a 10 para flakes/needle-like.
- Fator de forma ou índice de forma, é a razão entre a medida da área superficial com relação ao volume
- O volume é normalizado pela esfera equivalente
- O Fator de forma é maior para flakes do que para esferas.



Metalurgia do pó

Produção dos pós

Tamanhos, Formas e Distribuição

Distribuição de forma

- A distribuição de forma é importante pois afeta as características de processamento do pó

Propriedade de fluxo, compressibilidade e densidade

- Propriedade de fluxo é importante para o enchimento da matriz
- Compressibilidade é importante para definir as forças de compressão para o pó.
- A densidade teórica, aparente e densidade pós shaking na cavidade da matriz. Quanto mais elevada a densidade do compactado melhor



Metalurgia do pó

Mistura

- A mistura de pós é o passo seguinte a fabricação e caracterização dos pós
- Deve ser feita em condições controladas para evitar contaminação e deterioração
- A mistura de pós é feita para:
 - Obtenção de propriedades específicas
 - A mistura é essencial para obter a uniformidade das propriedades
 - Um mesmo material pode ter pós de diferentes tamanhos e formas
 - A mistura ideal deve gerar um material com distribuição uniforme
 - Lubrificantes podem ser adicionados para melhorar o fluxo
 - Melhorar a resistência a verde (pré-sinterização)
 - Facilitar a sinterização (metalurgia do processo)



Metalurgia do pó

Mistura

Cuidados com os pós

- Pós metálicos devido a sua grande superfície são reativos e sujeitos a explosão espontânea
- Pós devem ser armazenados com muito cuidado
- Todos os equipamentos devem ser aterrados
- Deve-se evitar faíscas
- Deve-se evitar a geração de calor por atrito
- Deve-se evitar a formação de nuvens
- Deve-se evitar a exposição a chamas
- Deve-se evitar reações químicas



Metalurgia do pó

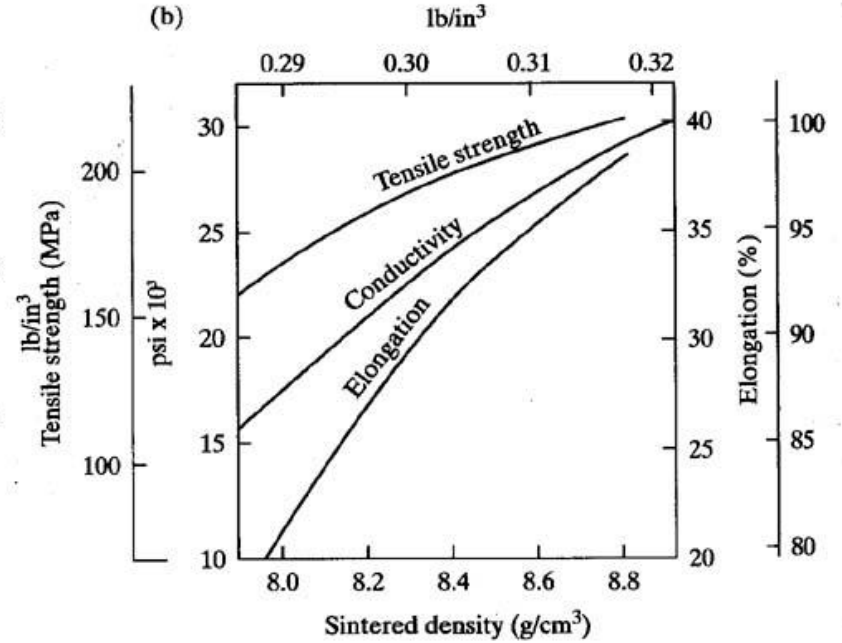
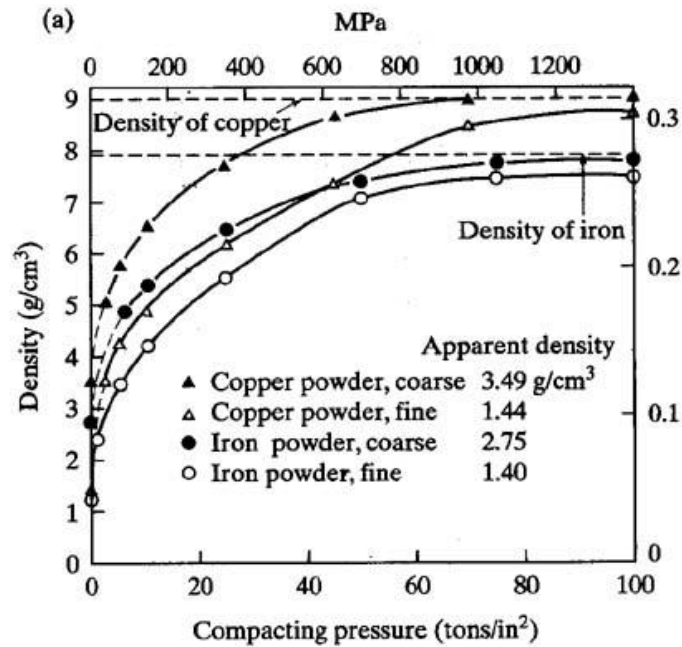
Compactação

Outra etapa do processo de metalurgia do pó a compactação. Os pós metálicos ou cerâmicos são compactados em matrizes, sendo prensados na forma desejada. Essa etapa é muito importante, pois além da forma, o prensado deve ter densidade alta, isto é, as partículas devem estar todas em contato umas com as outras. Quanto mais elevada a densidade do compactado melhor. Esse prensado é chamado de compactado verde.



Metalurgia do pó

Compactação





Metalurgia do pó

Compactação

Formas de compactação

Compactação isostática

➤ A quente

➤ A frio

A compactação pode ser feita de várias formas. Uma das maneiras de se obter homogeneidade no prensado é se fazer uma compactação isostática. Essa compactação pode ser feita a frio (CIP-cold isostatic pressure), utilizando água, ou a quente (HIP-hot isostatic pressure), utilizando um gás ou outro fluido.



Metalurgia do pó

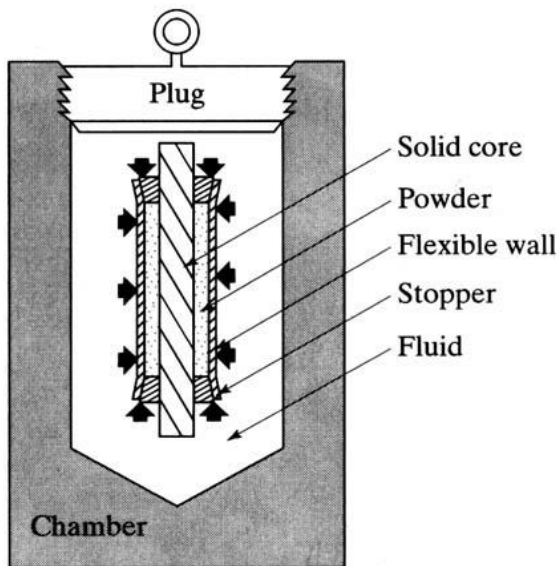
Compactação

Formas de compactação

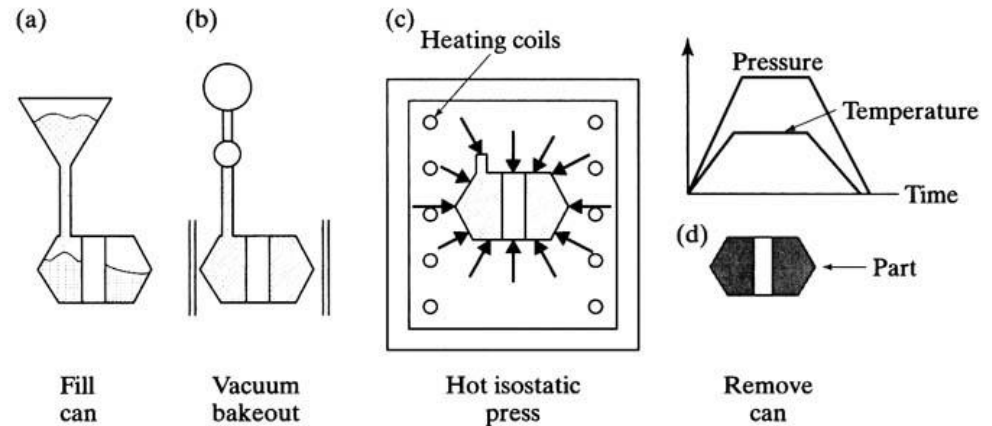
Compactação isostática

➤ A quente

➤ A frio



Compactação isostática a frio (CIP)



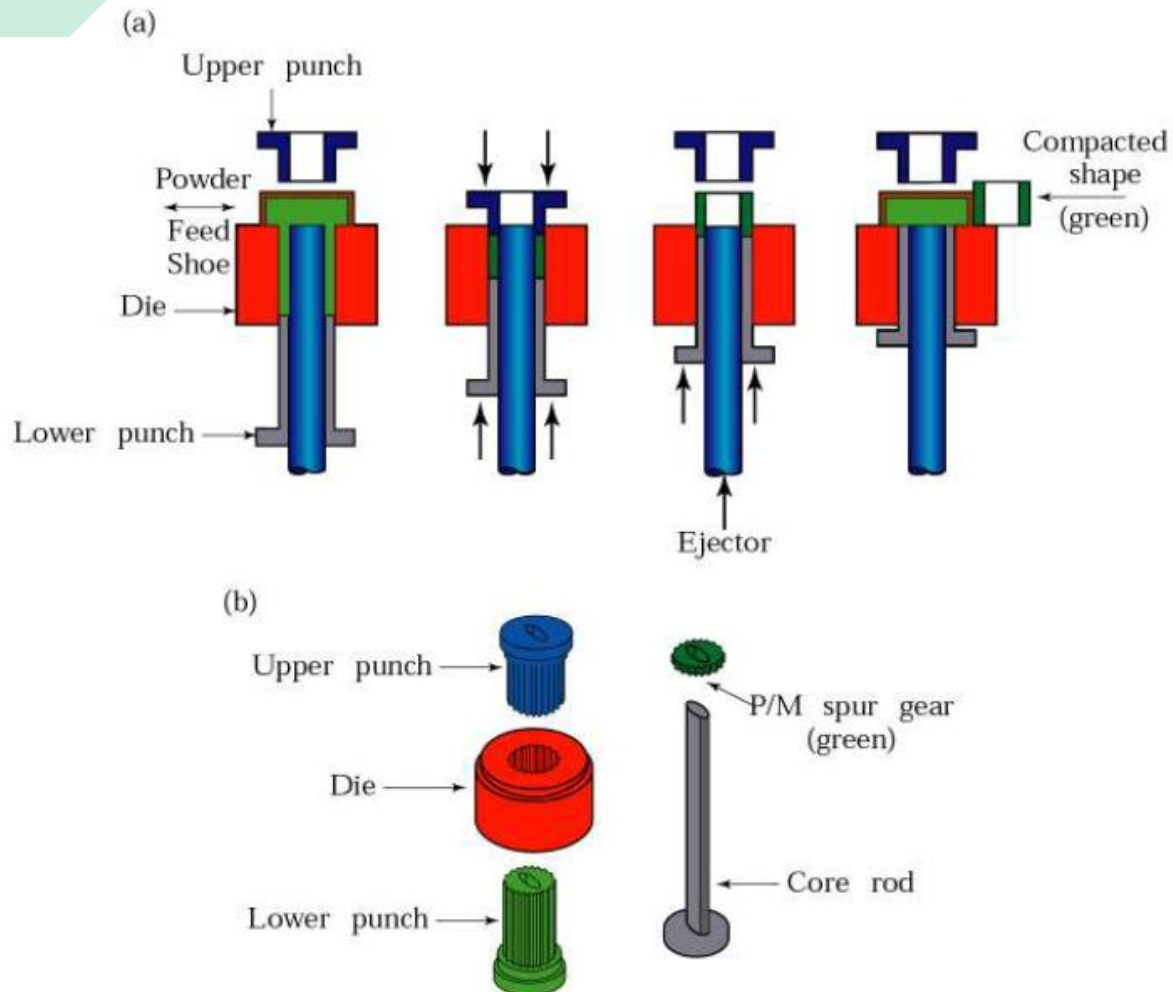
Compactação isostática a quente (HIP)



Metalurgia do pó

Compactação

Etapas da compactação

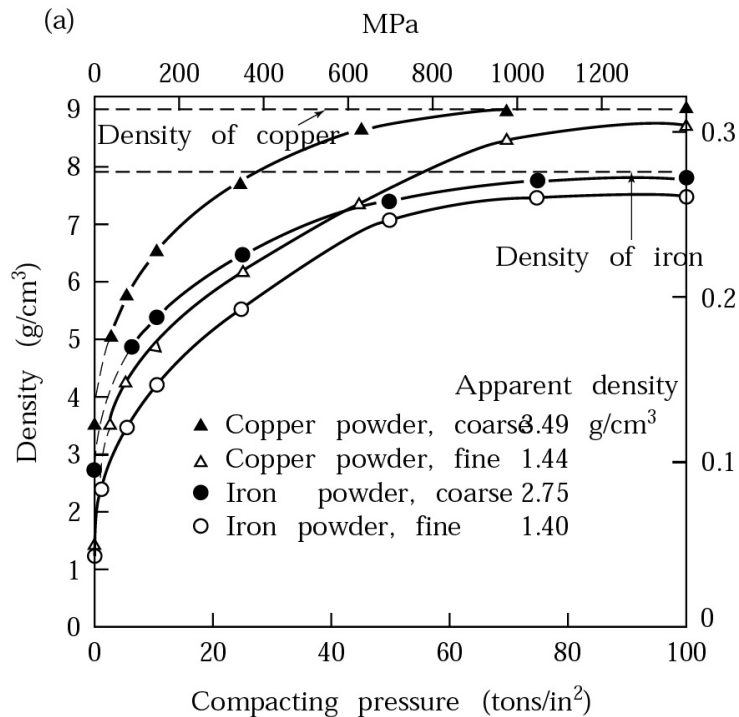




Metalurgia do pó

Compactação

Densidade a verde



- A densidade a verde depende da pressão aplicada
- Um fator importante são o tamanho e a forma das partículas
- Se todas as partículas forem do mesmo tamanho, então a porosidade sempre será maior.

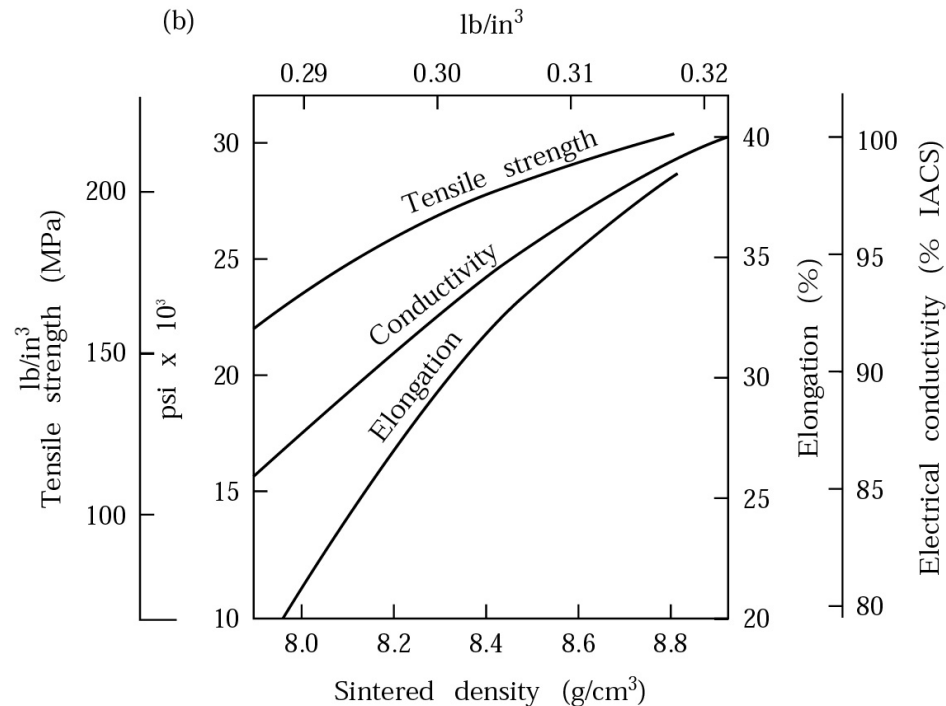


Metalurgia do pó

Compactação

Densidade, resistência e Módulo de Elasticidade

Quanto maior a densidade, maior a quantidade de material no mesmo volume maior a resistência e o Módulo de Elasticidade.





Metalurgia do pó

Compactação

Temperaturas, tempos de sinterização e pressão de compactação para vários materiais

Material	Temperature (° C)	Time (Min)	Material	Pressão (Mpa)
Copper, brass, and bronze	760-900	10-45	Alumínio	70-275
Iron and iron-graphite	1000-1150	8-45	Latão	400-700
Nickel	1000-1150	30-45	Bronze	200-275
Stainless steels	1100-1290	30-60	Ferro	350-800
Alnico alloys (for permanent magnets)	1200-1300	120-150	Tântalo	70-140
Ferrites	1200-1500	10-600	Tungstênio	70-140
Tungsten carbide	1430-1500	20-30	Óxido de alumínio	110-140
Molybdenum	2050	120	Carbono	140-165
Tungsten	2350	480	Metal-Duro (Wc/Co)	140-400
Tantalum	2400	480	Ferrita	110-165

A pressão de compactação depende das características e forma das partículas, do método de aglutinação e do uso, ou não, de lubrificante



Metalurgia do pó

Compactação

Prensas de compactação

- Prensas com capacidade de até 300 ton.
- A maioria dos projeto necessita de pressões de compactação menores do que 100 toneladas.
- Para baixas pressão pensas excêntricas podem ser utilizadas.
- Para capacidade maiores prensas do tipo knucklejoint (duplo excentrico) são recomendadas.
- Prensas hidráulicas somente para peças grandes, devido a capacidade elevada destas (até 5.000 ton).
- A seleção do tipo de prensa depende do tamanho, forma, volume de produção, e densidade de compactação.





Metalurgia do pó

Compactação

Tipos de compactação

- isostática
- Isostática a frio
- Isostática a quente
- Injeção de pós (pó + ligante)
- Spray
- Laminação de pós
- Extrusão de pós (pós + ligante)
- Compactação sem pressão
- Moldes cerâmicos

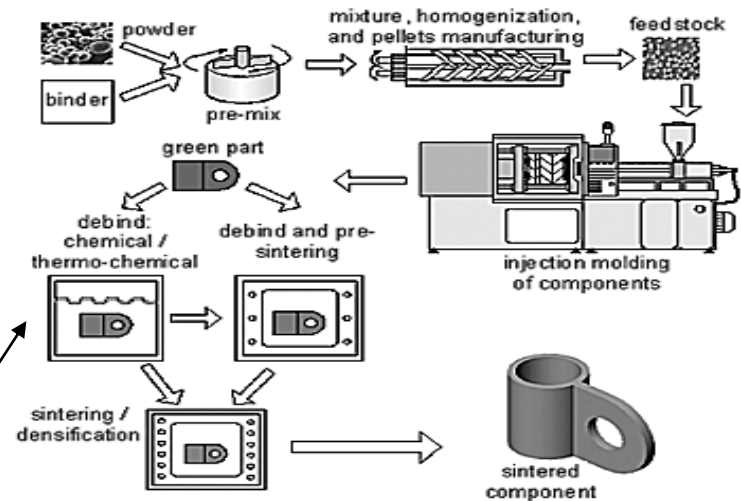
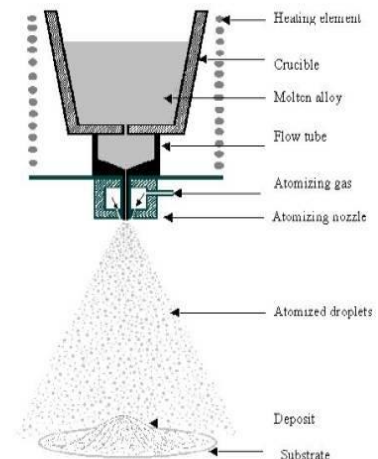


Figure 3. Sketch of the PIM process (adapted from German & Bose, 1997).

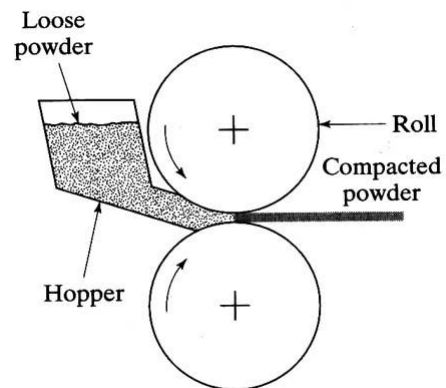
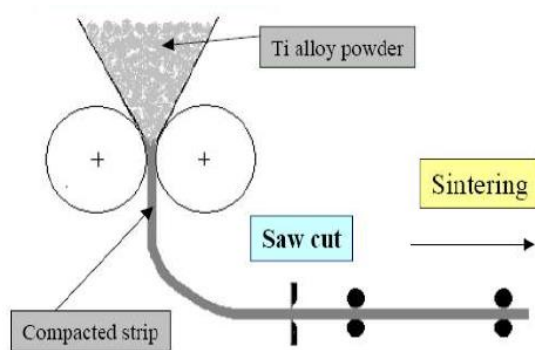




Metalurgia do pó

Compactação

Laminação de pós



12" wide Ti-6Al-4V strip



Metalurgia do pó

Sinterização

A sinterização consiste em aquecer o material compactado a temperaturas entre 70 e 90% do ponto de fusão, em fornos com atmosfera controlada

O tempo de sinterização varia de 10 minutos a 8 horas dependendo do material e das características que se deseja obter da peça

A sinterização gera gases hydrogen, burned ammonia, partially combusted hydrocarbon gases, nitrogen





Metalurgia do pó

Sinterização

Tipos

Sinterização por fase sólida

A temperatura promove a união das partículas do pó. Isto ocorre a temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, porém suficiente para criar um "pescoço" de ligação entre as partículas de pó.

Sinterização por fase líquida

Outra maneira de sinterizar-se o material é utilizando-se dois materiais com ponto de fusão diferentes. O material com menor ponto de fusão se funde e interconecta as partículas do outro pó.

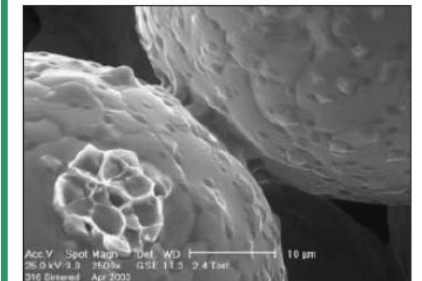
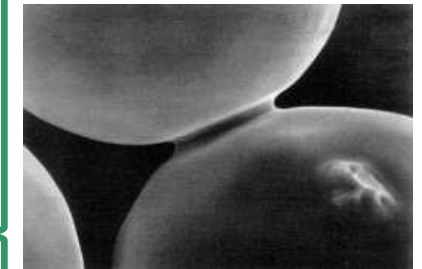
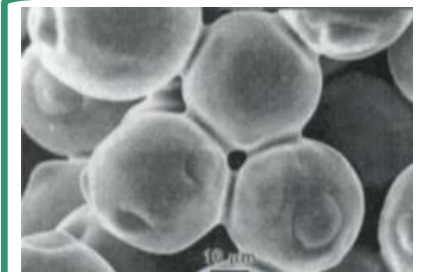
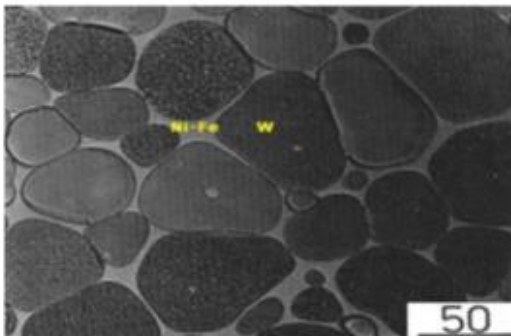


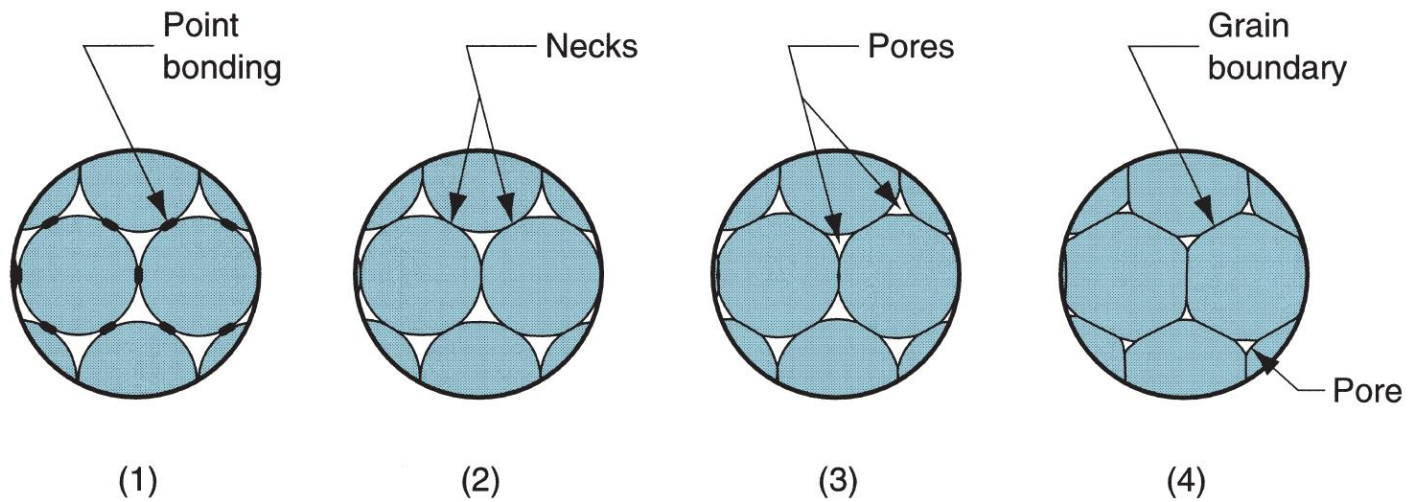
FIGURE 5 Electron micrograph showing a thermal bond produced through sintering to ensure predictable strength and dimensions. Source: Extrude Hone/ProMetid, 2003.



Metalurgia do pó

Sinterização

Sequencia da sinterização em escala microscópica

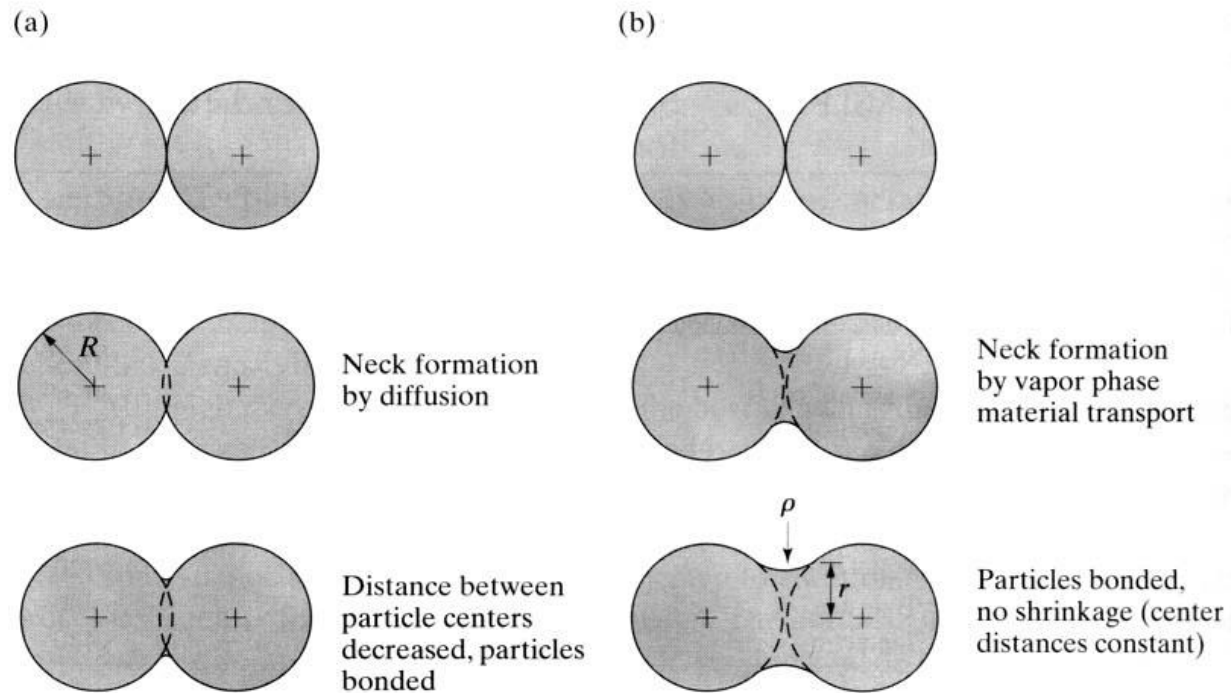




Metalurgia do pó

Sinterização

Ilustração do que pode ocorrer durante o processo de sinterização e que causa a união entre as partículas de pó.

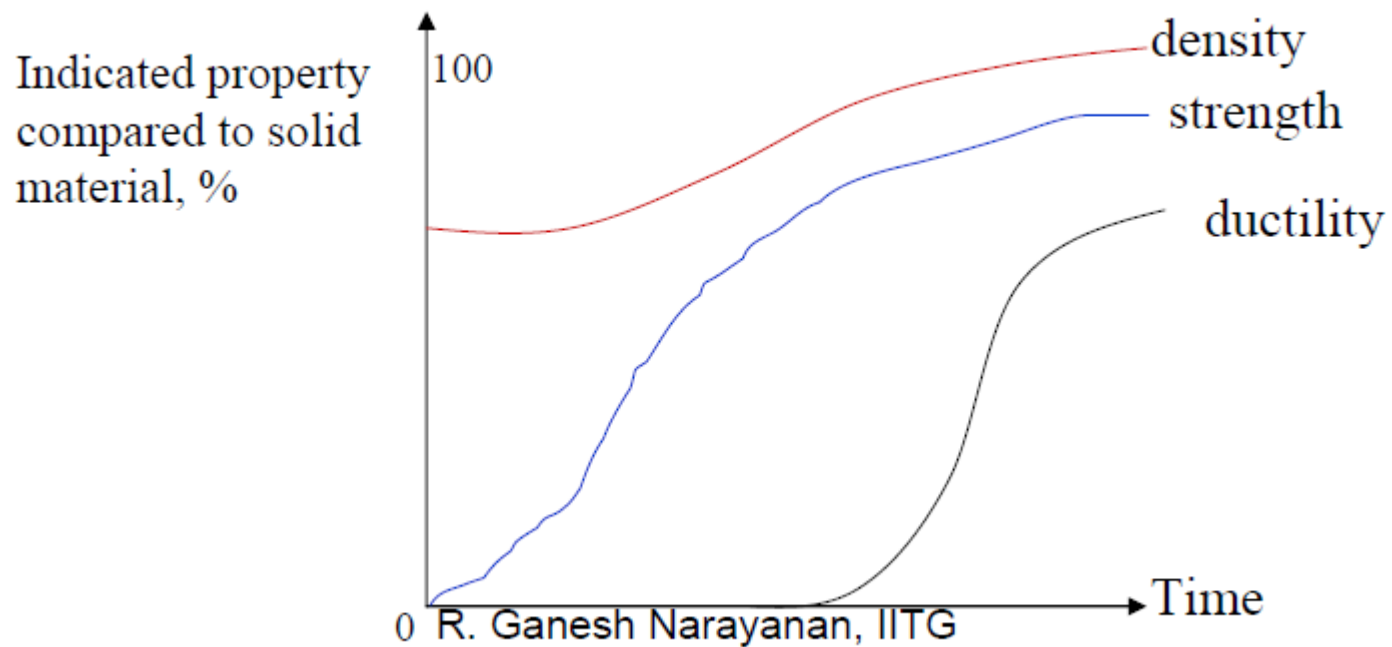




Metalurgia do pó

Sinterização

Variações das propriedades

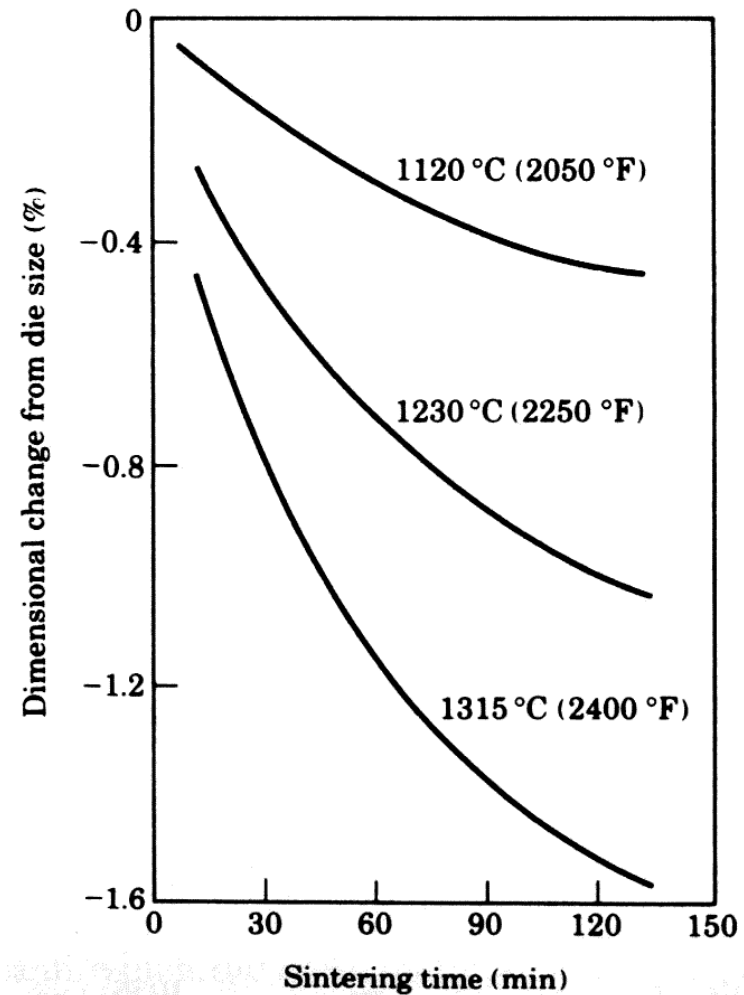
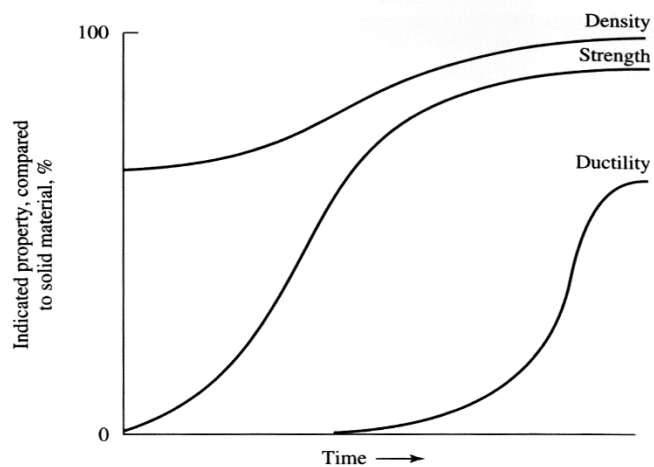
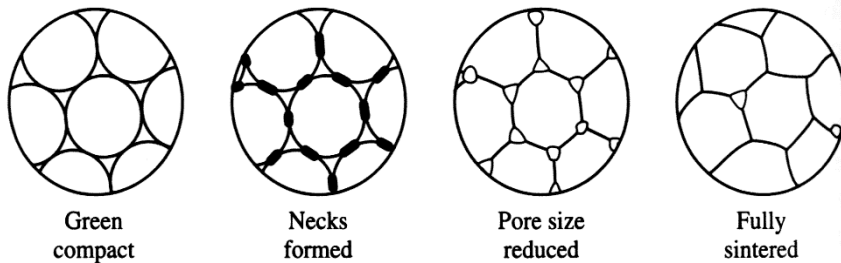




Metalurgia do pó

Sinterização

Variações dimensionais, contração do material durante a sinterização





Metalurgia do pó

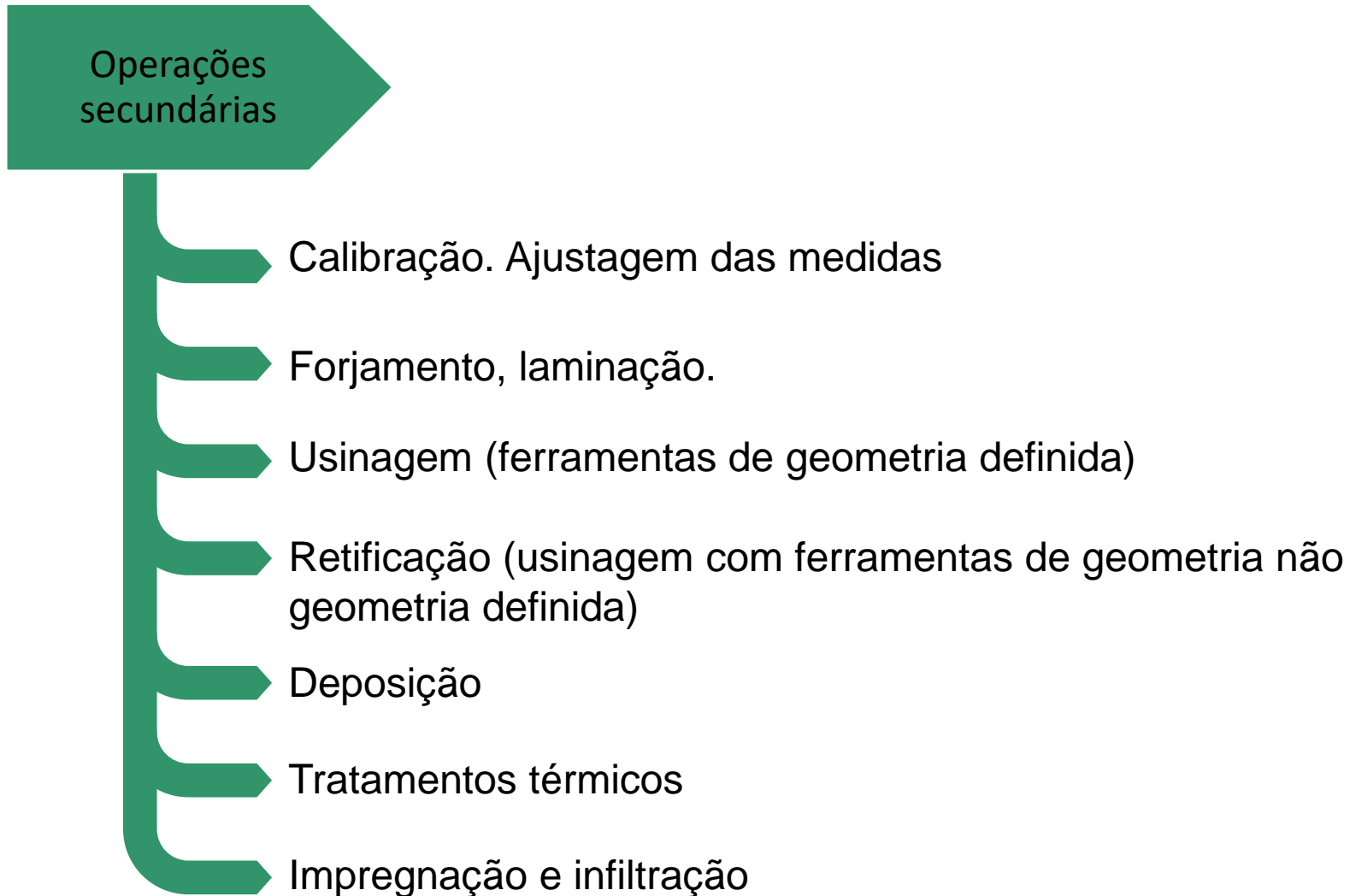
Propriedades mecânicas de alguns materiais produzidos por metalurgia do pó

Designation	MPIF type	Condition	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness	Elongation in 25 mm (%)	Elastic modulus (GPa)
Ferrous							
FC-0208	N	AS	225	205	45 HRB	<0.5	70
		HT	295	—	95 HRB	<0.5	70
	R	AS	415	330	70 HRB	1	110
		HT	550	—	35 HRC	<0.5	110
	S	AS	550	395	80 HRB	1.5	130
FN-0405	S	HT	690	655	40 HRC	<0.5	130
		AS	425	240	72 HRB	4.5	145
	T	HT	1060	880	39 HRC	1	145
		AS	510	295	80 HRB	6	160
	HT	1240	1060	44 HRC	1.5	160	
Aluminum							
601 AB, pressed bar		AS	110	48	60 HRH	6	—
		HT	252	241	75 HRH	2	—
Brass							
CZP-0220	T	—	165	76	55 HRH	13	—
	U	—	193	89	68 HRH	19	—
	W	—	221	103	75 HRH	23	—
Titanium							
Ti-6Al-4V		HIP	917	827	—	13	—
Superalloys							
Stellite 19		—	1035	—	49 HRC	<1	—

MPIF: Metal Powder Industries Federation. AS: as sintered, HT: heat treated, HIP: hot isostatically pressed.



Metalurgia do pó





Metalurgia do pó

Consideração de projeto

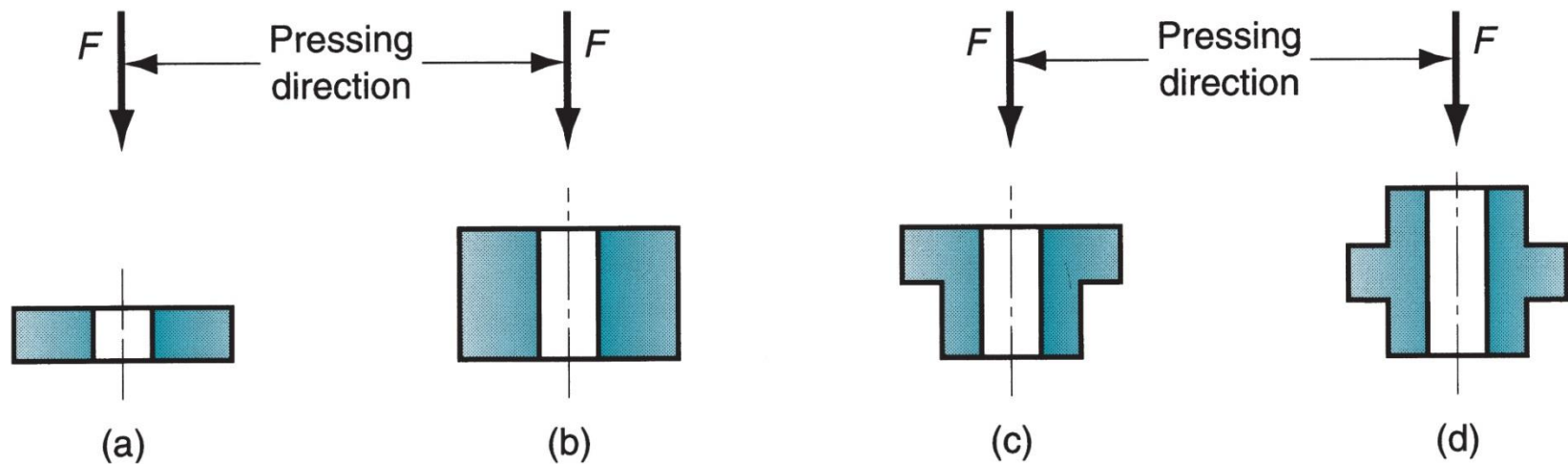
- Mantenha as formas simples. Evite seções finas, variações de espessura, razões entre altura e diâmetro elevadas
- Evite tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, lembre-se que a sinterização sempre promove contração de volume
- Peças não devem ter espessuras menores do que 1,5mm
- Detalhes tais como letras e marcas devem ser colocadas nas faces paralelas a do estampo, para facilitar a extração do molde
- Evite raios de curvatura ou concordância pequenos
- Furos e rebaixos podem ser colocados desde que nas faces paralelas a do estampo, para facilitar a extração do molde



Metalurgia do pó

Consideração de projeto

➤ Classes de peças produzidas pro metalurgia do pó



(a) Class I Simple thin shapes; (b) Class II Simple but thicker;

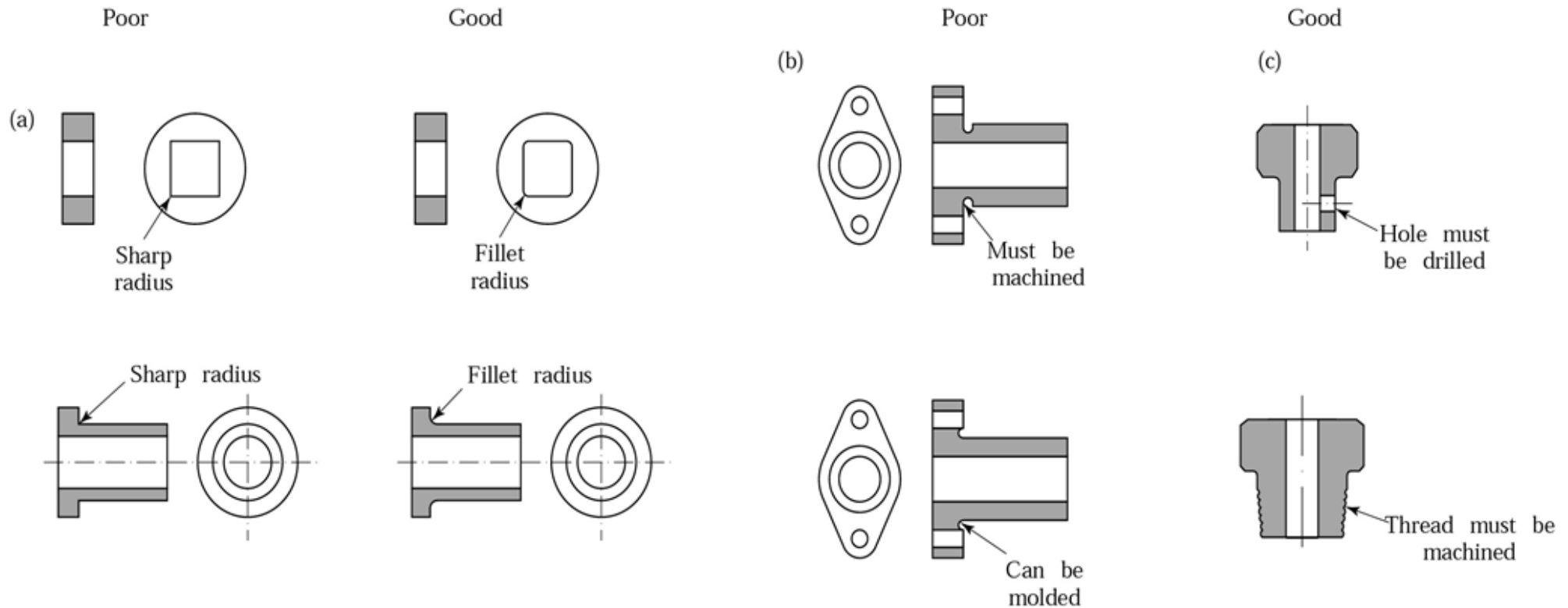
(c) Class III Two levels of thickness; and (d) Class IV Multiple levels of thickness



Metalurgia do pó

Consideração de projeto

➤ Exemplos de projeto de peças bons e ruins

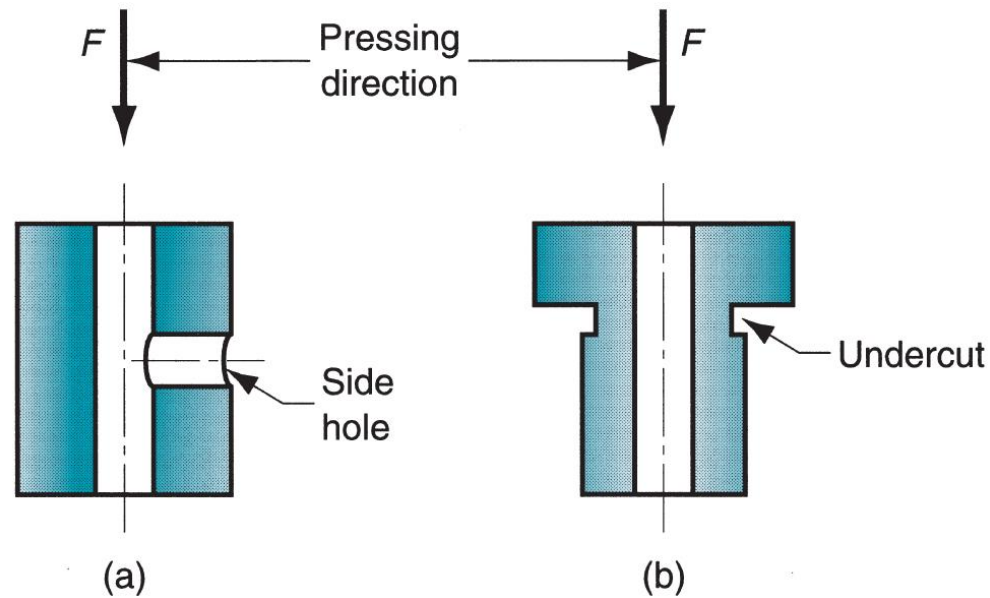




Metalurgia do pó

Consideração de projeto

➤ Exemplos de detalhes de projeto que devem ser evitados

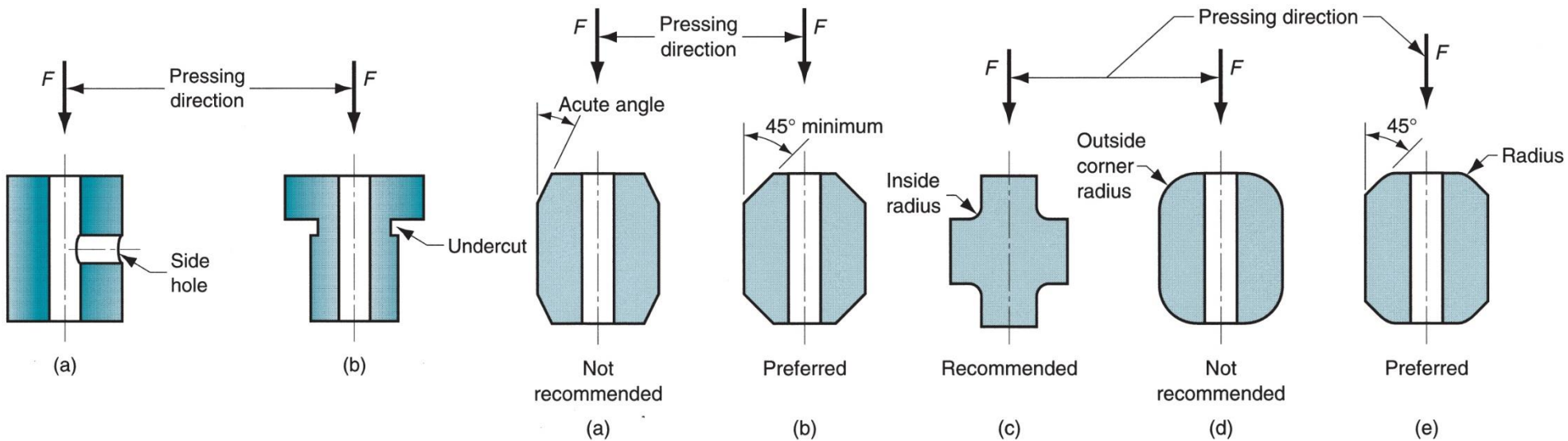




Metalurgia do pó

Consideração de projeto

➤ Exemplos de detalhes de projeto que devem ser evitados





- Fim da Aula 06 -