

PMR3101 – INTRODUÇÃO À MANUFATURA MECÂNICA

Aula 7: METALURGIA DO PÓ (SINTERIZAÇÃO)



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.

A Metalurgia do pó (sinterização), vem a ser um processo de manufatura de peças metálicas ferrosas e não ferrosas.

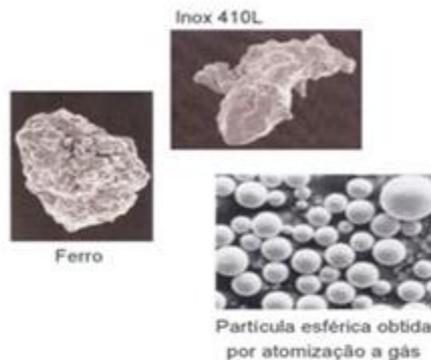
Basicamente, os pós metálicos são configurados (moldados) a frio em ferramental apropriado com posterior aquecimento sob condições controladas a temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal base para promover **ligação metalúrgica entre as partículas.**



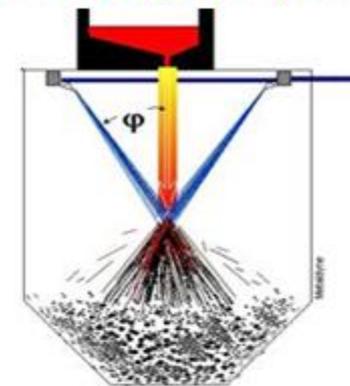
2-Mistura



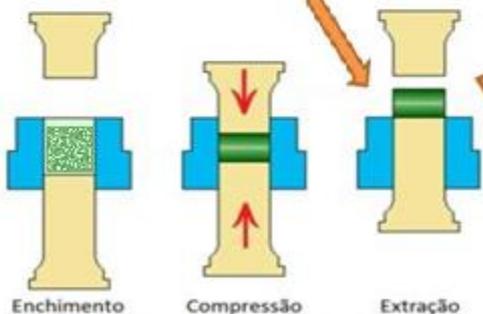
Processo Básico



1- Produção de pós

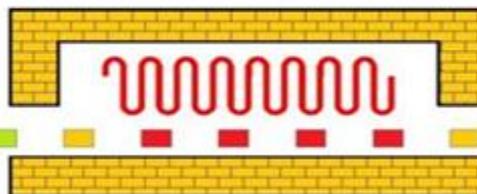


3-Compactação

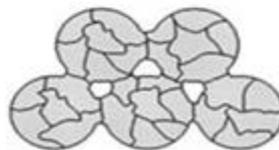


3-Compactação

4-Sinterização



Bronze: 780 - 840°C
Aço: 1050 - 1150°C
Ligação metalúrgica das partículas de pó



5- OPERAÇÕES COMPLEMENTARES

- Calibragem
- Cunhagem
- Usinagem
- Forjamento
- Tratamento térmico
- Tratamento de superfície
- Rebarbação
- Impregnação
- Infiltração
- Jateamento

5- Produto acabado





• **Etapas de Fabricação:**

- **Obtenção dos pós;**
- **Mistura;**
- **Compactação – moldagem;**
- **Sinterização;**
- **Calibração, e**
- **Operações complementares (limpeza, rebarbação, etc.).**



Características importantes dos pós metálicos:

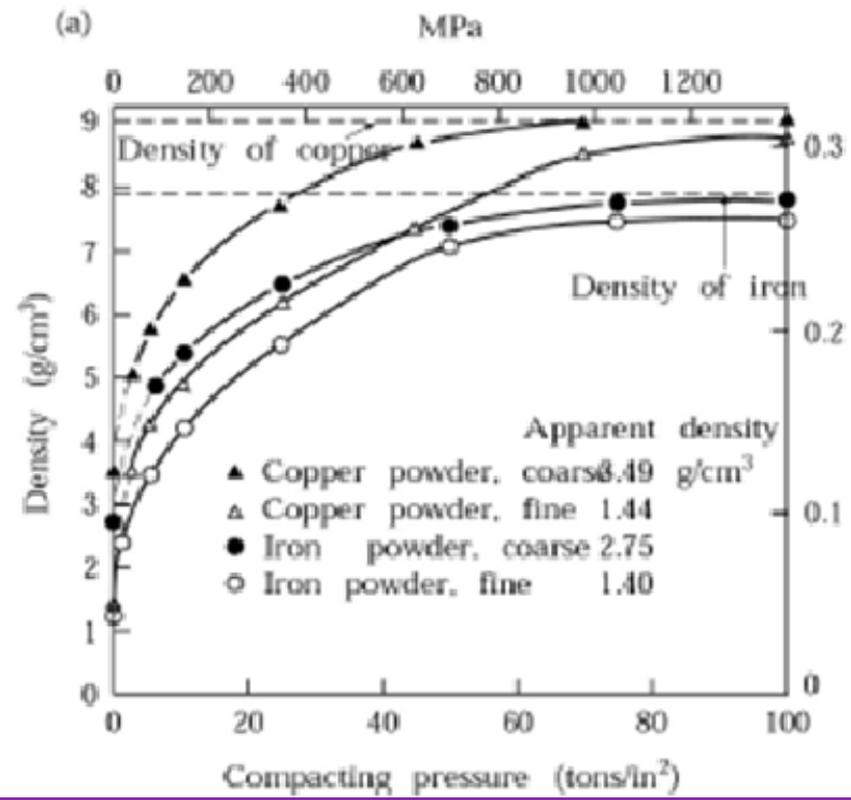
- **Forma e o tamanho das partículas individuais: esféricas, aciculares, dendríticas, etc.**
- **Distribuição granulométrica das partículas é outra informação importante.**
- **Os vários métodos de obtenção de pó metálicos conduzem a diversas formas, tamanhos, distribuição e outras características dos pós, sendo imprescindível o domínio do processo de obtenção e caracterização dos pós para se chegar a uma peça final que atenda os quesitos de engenharia.**



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.

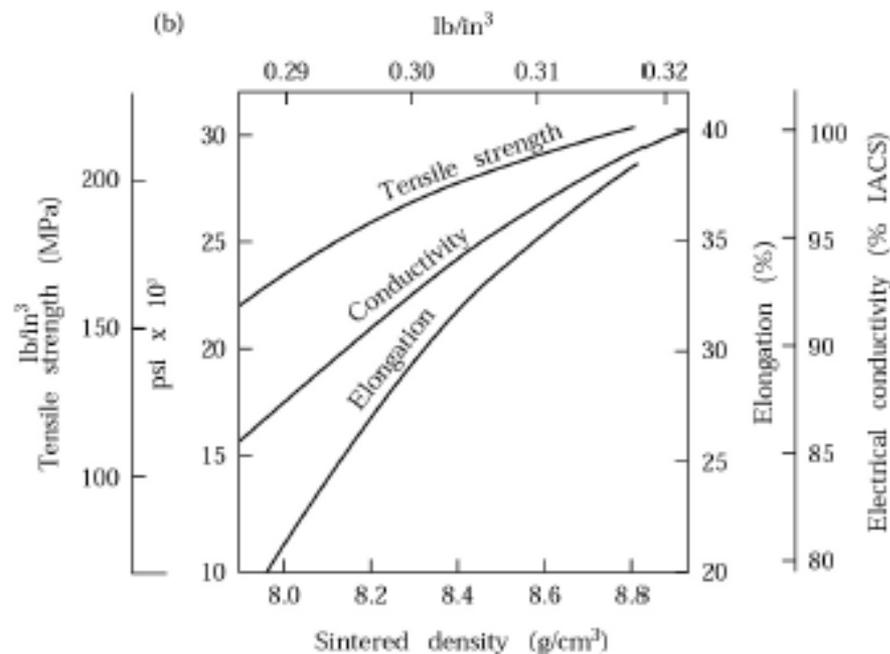


Metalurgia do pó

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.



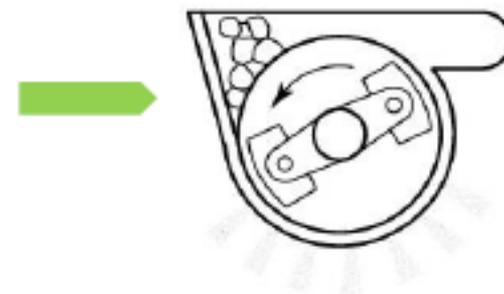
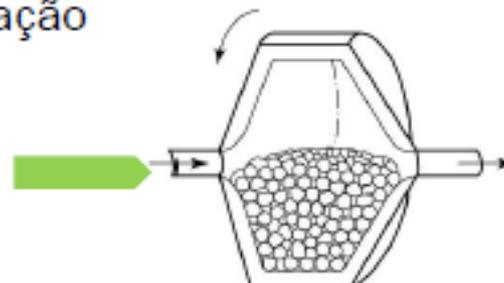
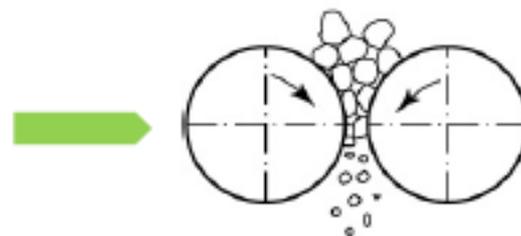


Metalurgia do pó

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



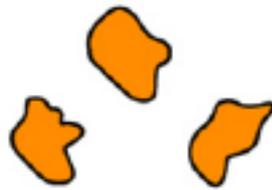
Formas dos pós



irregular com cantos angulares



irregular com cantos arredondados



Flocos irregulares

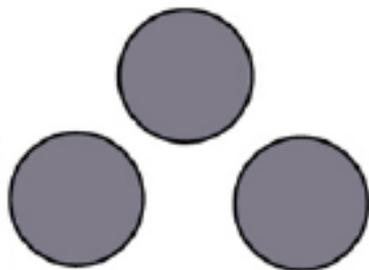
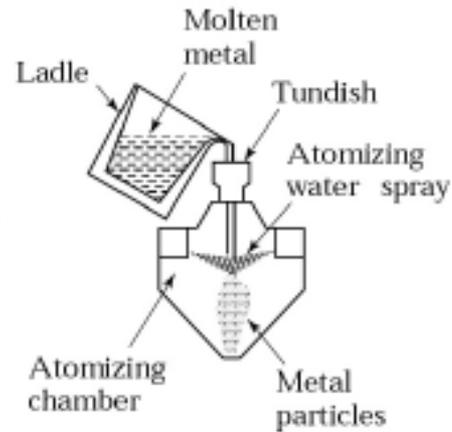


Metalurgia do pó

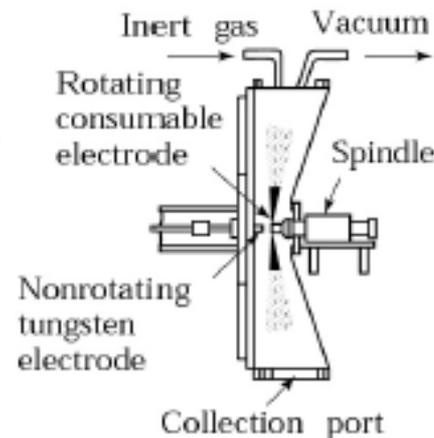
Produção dos pós



Atomização



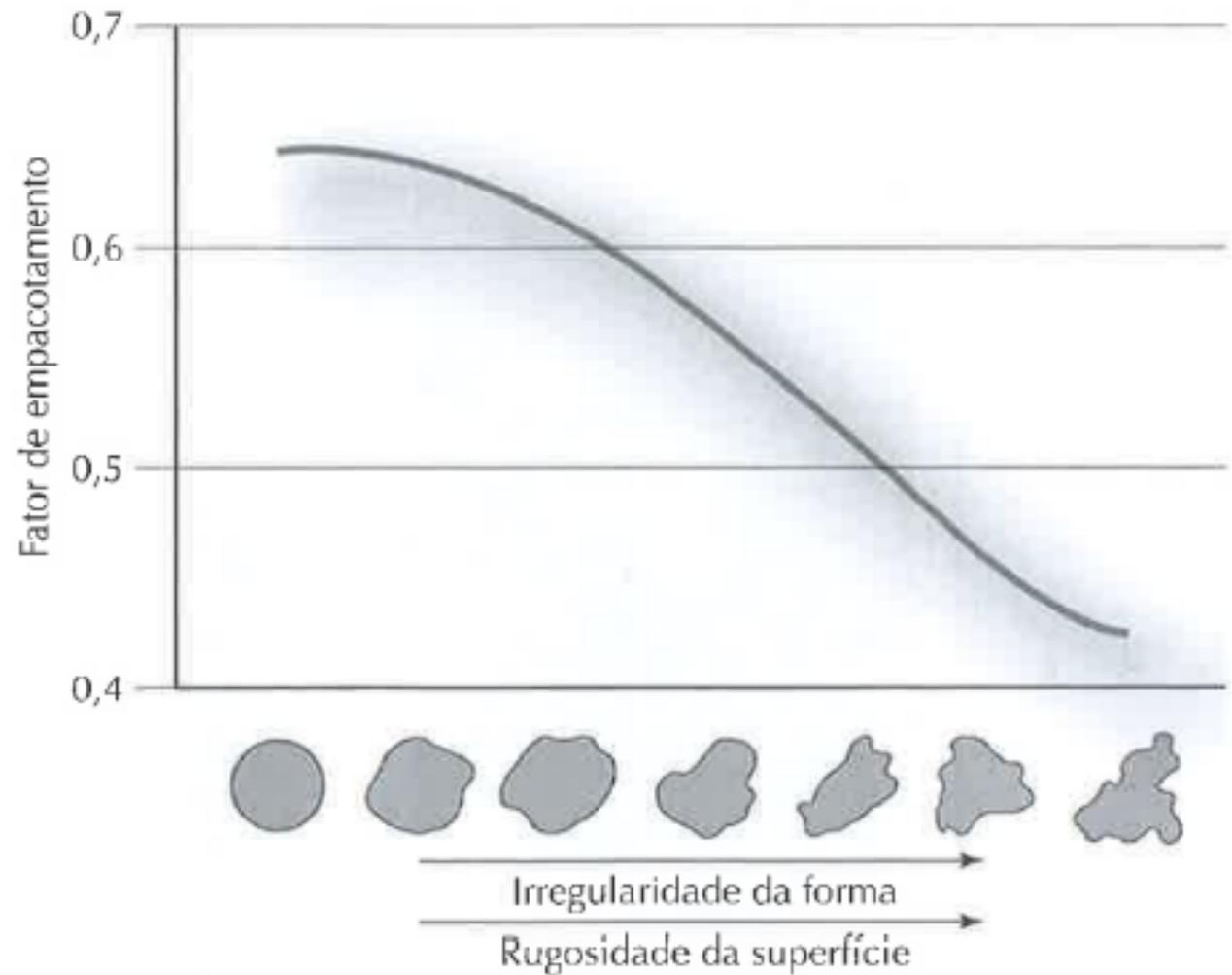
Formas dos pós





Compactação

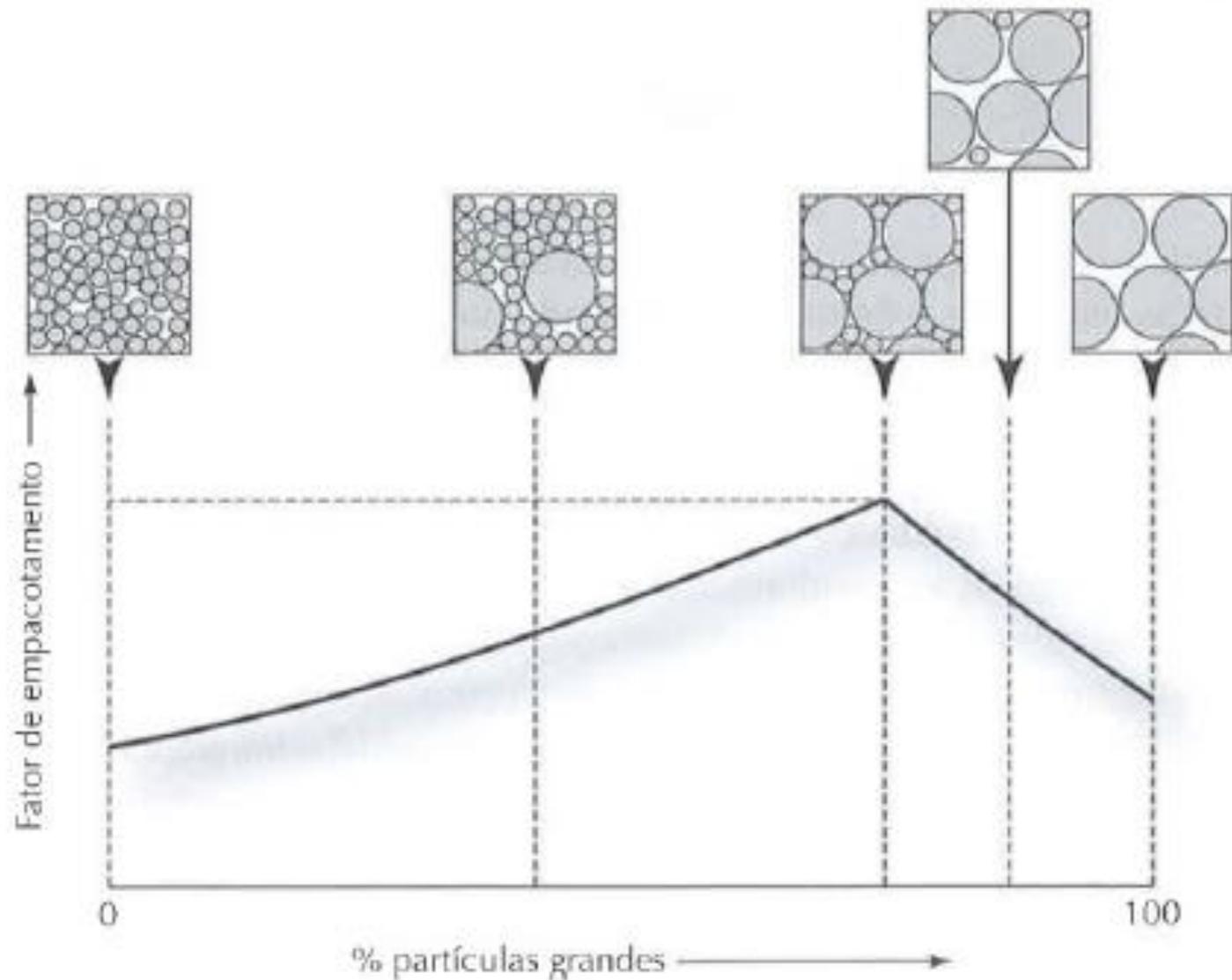
Fator de empacotamento de partículas de mesmo tamanho de acordo com a sua rugosidade superficial e irregularidade de forma.

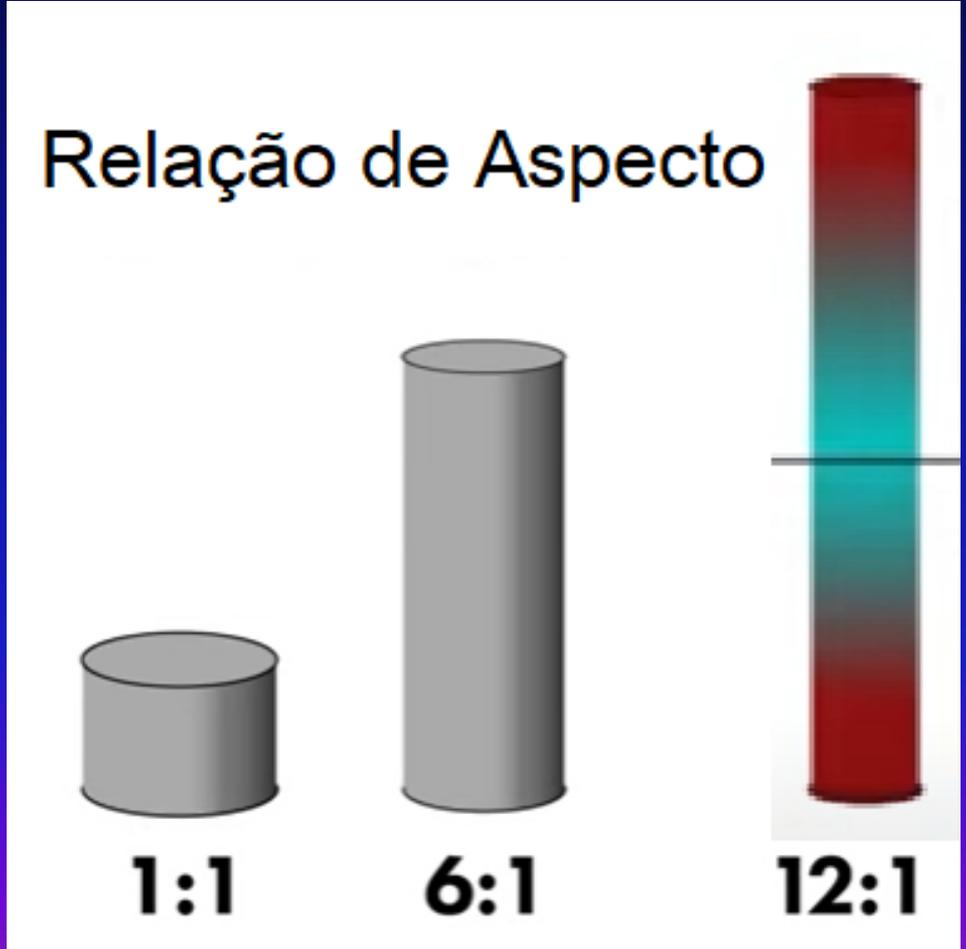
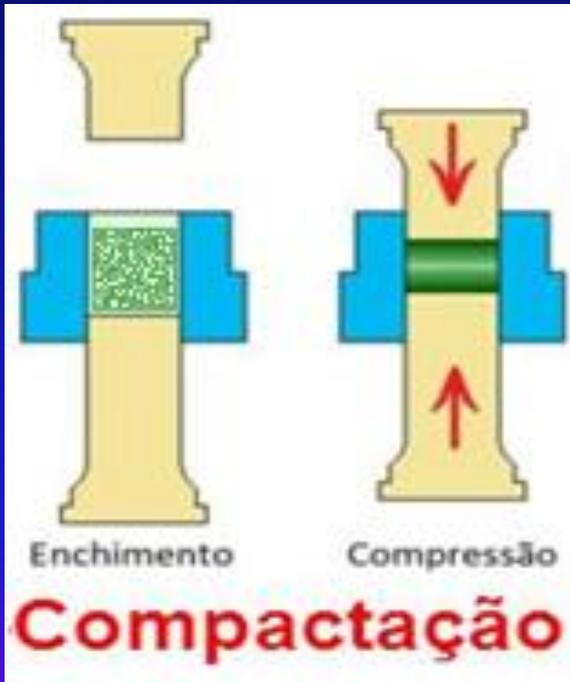




Compactação

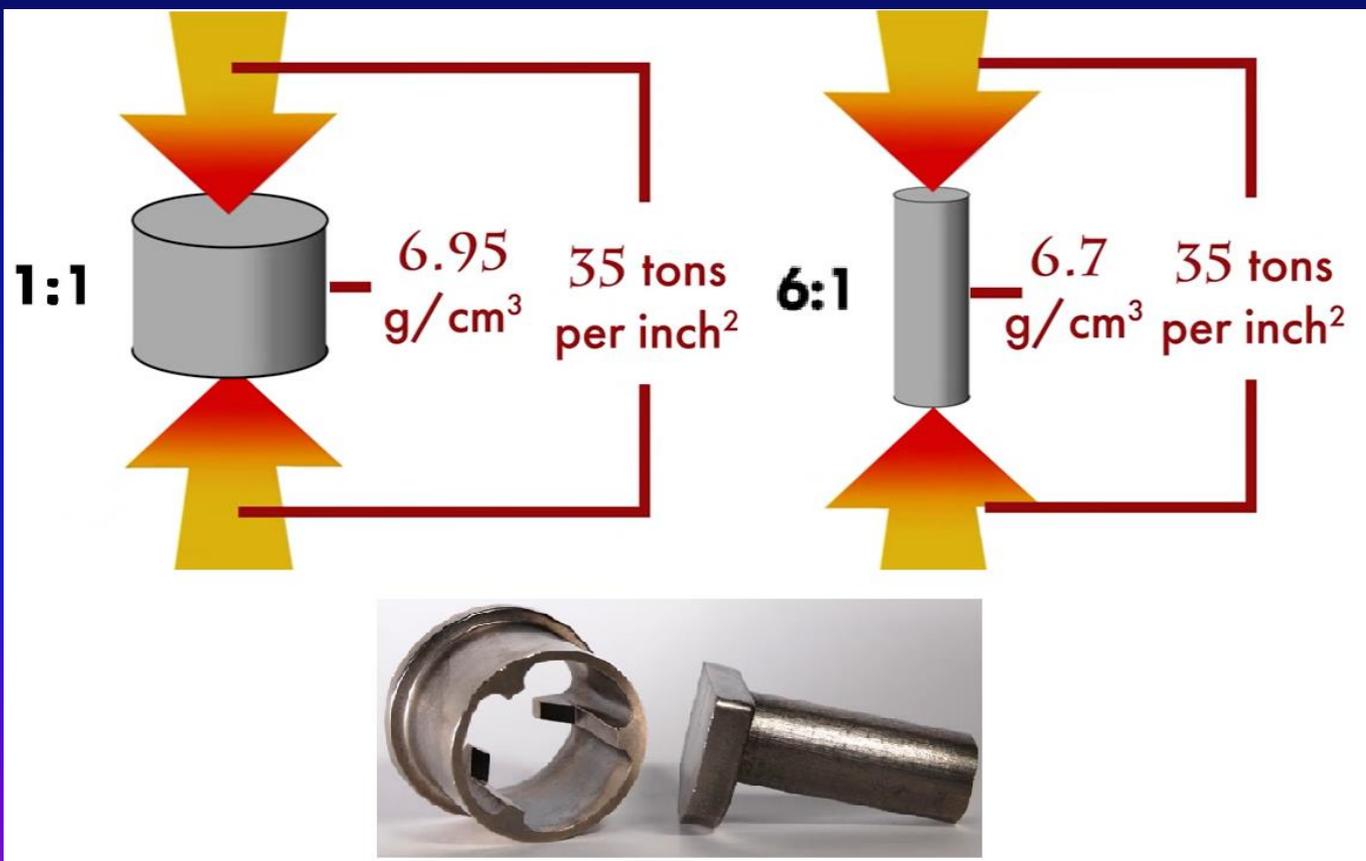
Fator de empacotamento de uma mistura homogênea entre partículas esféricas de tamanhos diferentes de acordo com a quantidade relativa entre elas.







Relação ou Razão de Aspecto



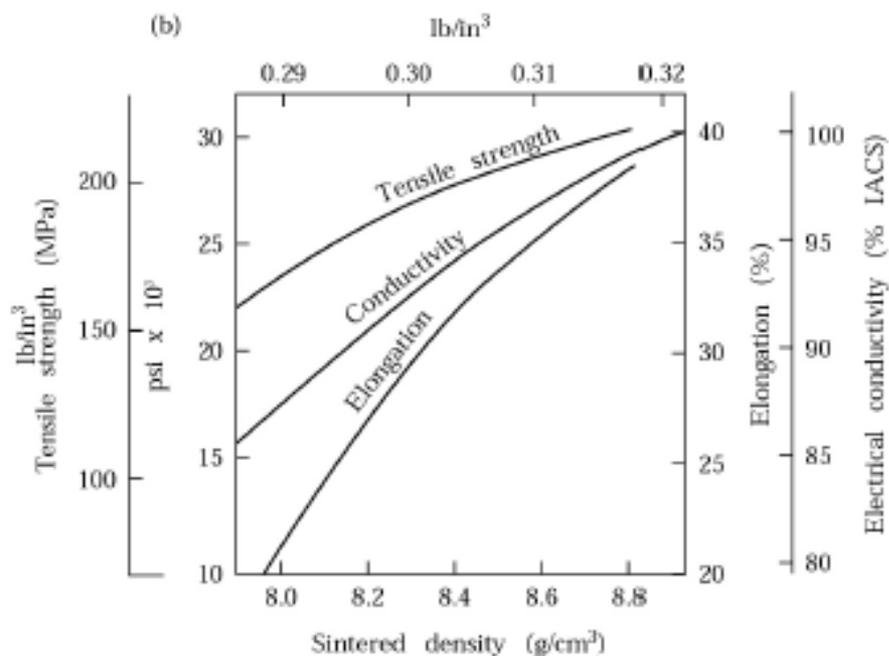


Metalurgia do pó

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.

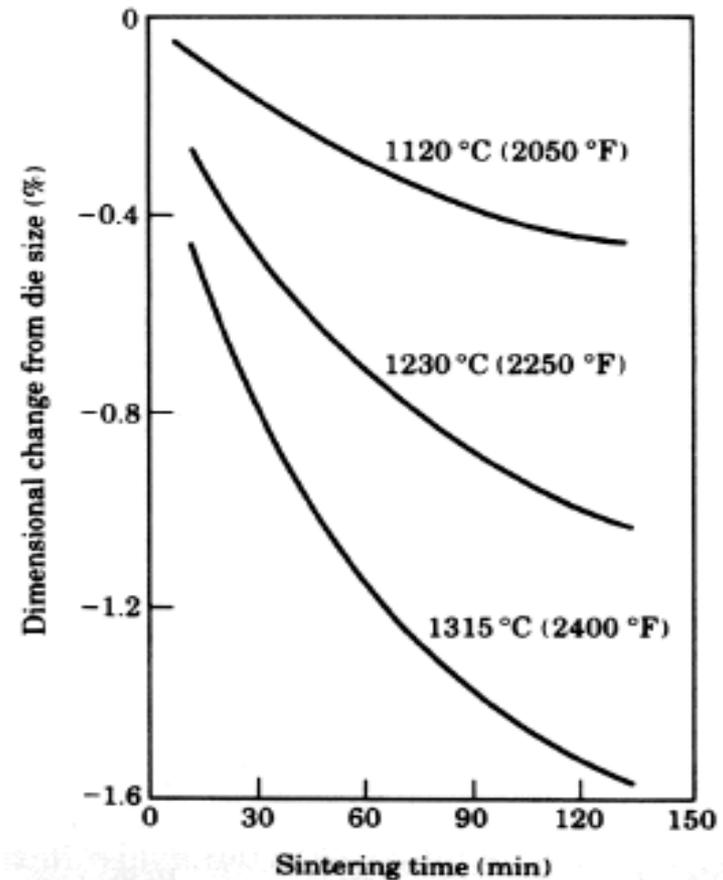
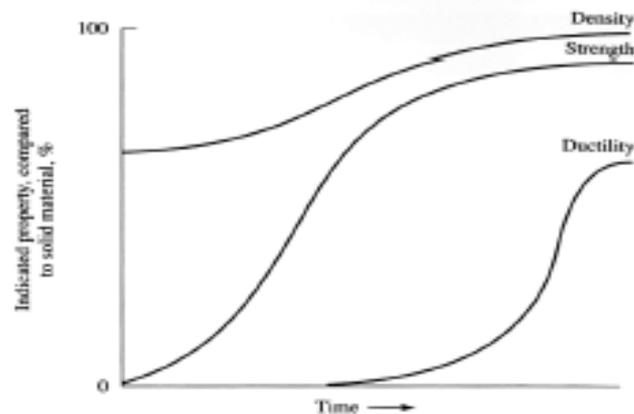
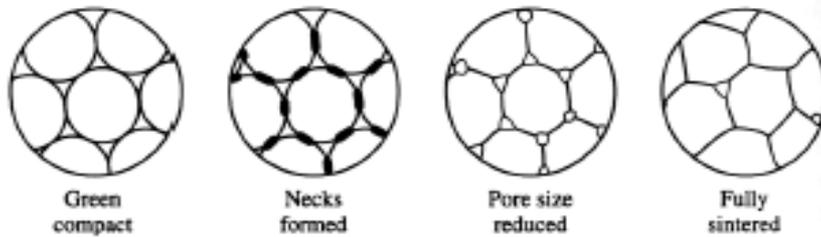




Metalurgia do pó

Sinterização

Variações dimensionais, contração do material durante a sinterização





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.

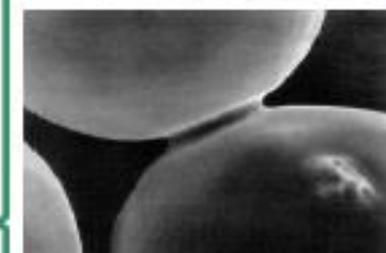
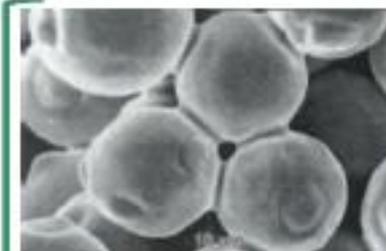
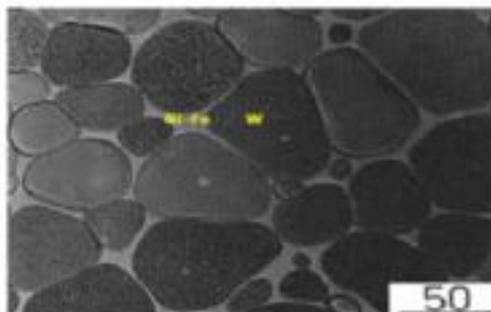


FIGURE 5. Electron micrograph showing a bimetallic powder through sintering to increase porosity strength and dimensions. Source: Lecture Notes/YouTube, 2003.



50



A composição química desejada para o produto final é bastante controlável na metalurgia do pó:

Pós de diferentes metais podem ser misturados nas proporções especificadas, pode-se partir diretamente de pós pré-ligados ou pode-se, ainda, misturar pós pré-ligados a pós de metais, para se chegar à composição desejada.

Essa grande versatilidade no manuseio e combinação de pós diferentes é uma das grandes vantagens de metalurgia do pó, visto que uma gama enorme de composições químicas pode ser obtida industrialmente através dessa técnica.



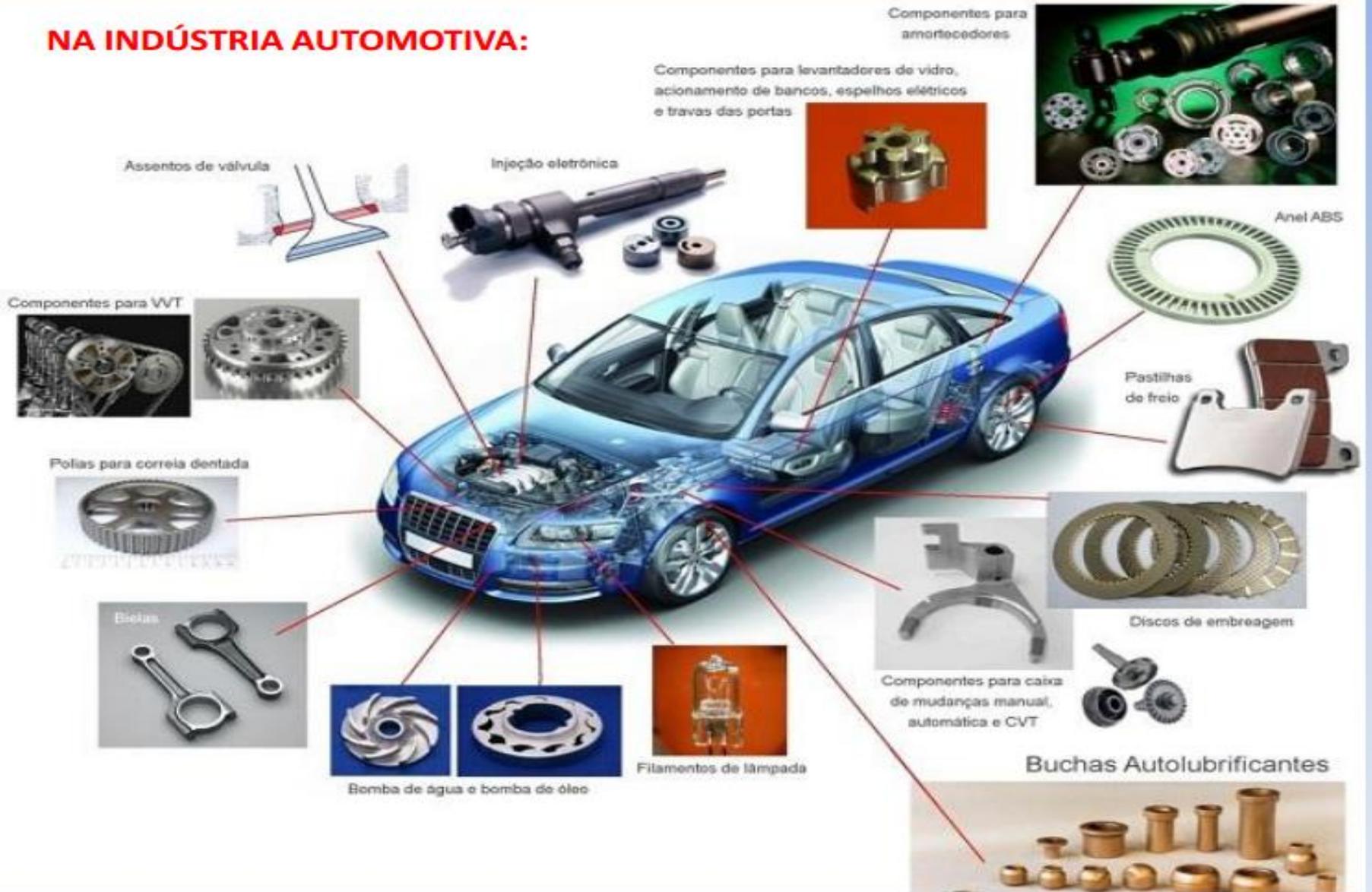
Fabricação por Metalurgia do Pó

A Metalurgia do Pó é um processo de conformação metálica que possui um vasto campo de aplicações que inclui, por exemplo, a fabricação de peças para componentes automotivos, eletrodomésticos, ferramentas de corte, ferramentas elétricas, fabricação de braquets para aparelhos dentários entre outros.





NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA:





Vantagens da Metalurgia do Pó

- Baixo custo para produção de peças em larga escala e um baixo impacto ambiental quando comparada com as tecnologias concorrentes, pois exige um menor consumo de energia de transformação.
- Alto aproveitamento da matéria prima, geralmente acima de 95%.
- Permite a fabricação de peças com formas complexas
- Obtenção de peças com as tolerâncias finais necessárias para aplicação direta no produto do cliente.
- Vantagens associadas à sua porosidade intrínseca são muito bem exploradas como lubrificação e filtragem, mas é seu custo menor a sua grande vantagem quando comparada a outros processos.



Comparativo: consumo energético e aproveitamento da matéria-prima.





TOLERÂNCIA GEOMÉTRICA

1- Warm Compaction; 2P2S ; Sinterforjado ; HIP
2- Sinterizado usinado / retificado

Resistência





RESISTÊNCIA MECÂNICA

Aço Sinterizado
(7,3 a 7,86 g/cm³)

Aço
Usinado

Aço Sinterizado
(5,6 a 7,2 g/cm³)

Ferro-fundido
Nodular

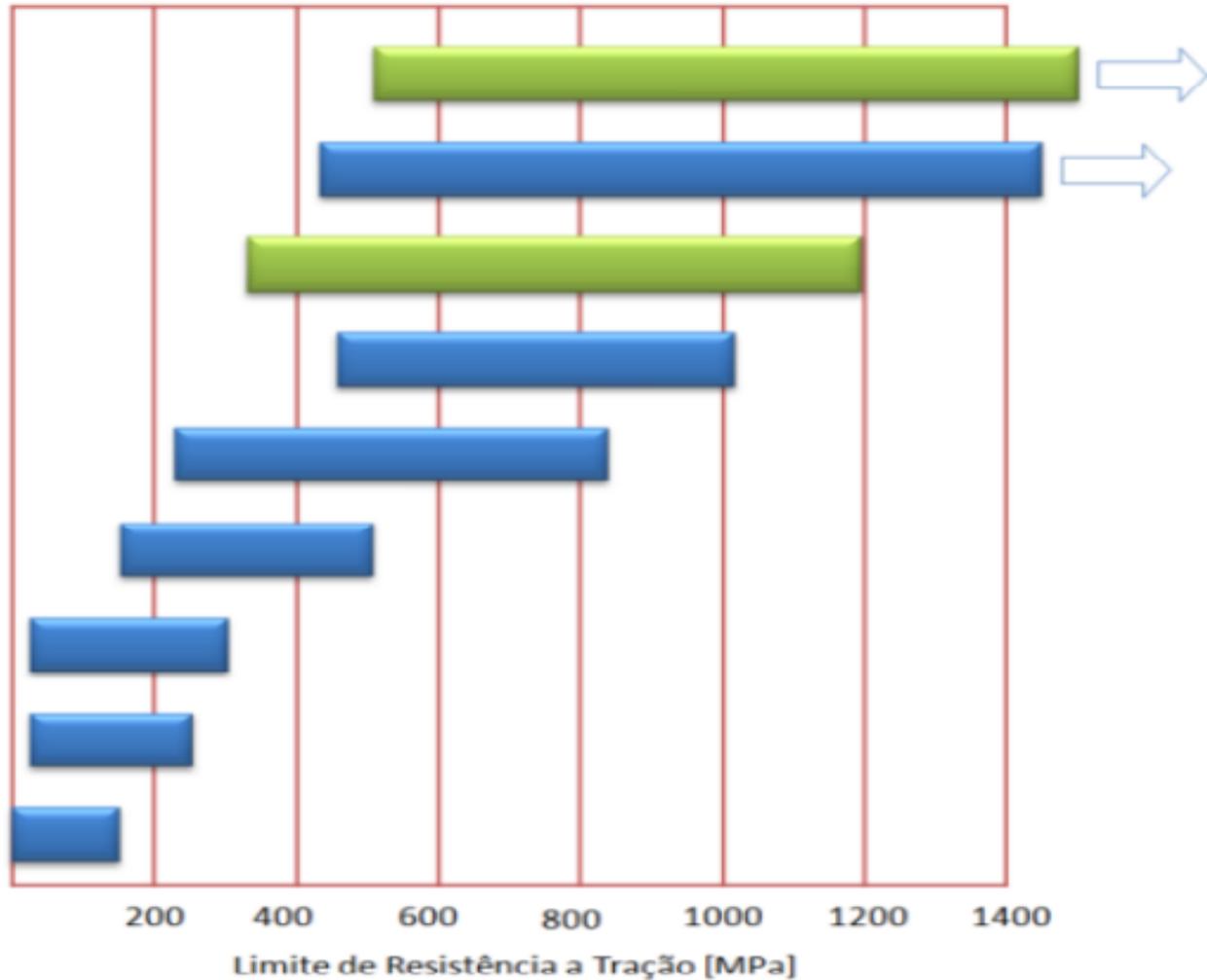
Fundidos de
ligas de Cobre

Ferro-fundido
Cinzento

Fundidos de
Alumínio

Fundidos de
ligas de Zinco

Plástico
injetado





Exemplos de mercados e produtos que utilizam a Metalurgia do Pó

- Metal duro.
- Aços ferramenta e aços rápidos.
- Inserto para assentos de válvula.
- Filtros metálicos sinterizados.
- Materiais de fricção.
- Materiais Cerâmicos.
- Filamentos de tungstênio para lâmpadas.
- Contatos Elétricos.
- Escovas Elétricas de Metal-Grafite.
- Eletrodos de solda à resistência.
- Eletrodos para solda a arco.
- Materiais Supercondutores.
- Imãs.
- Aplicações médicas e dentárias.
- Alimentícia e Farmacêutica



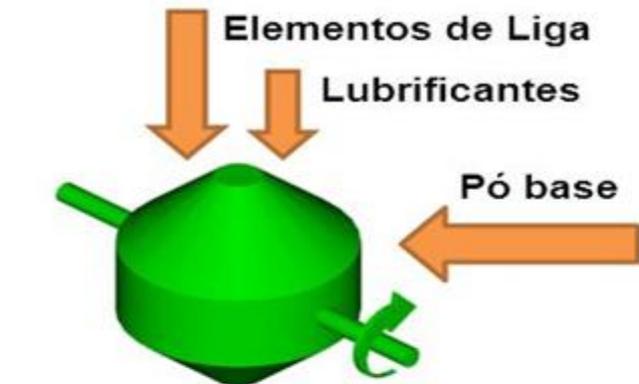
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Peças típicas produzidas por sinterização

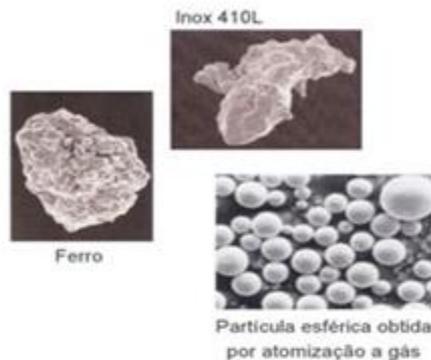




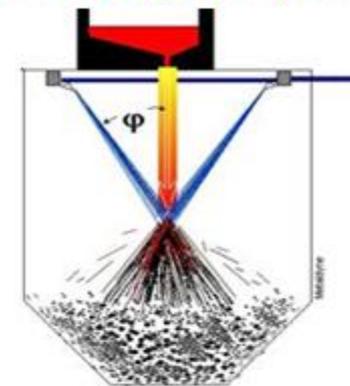
2-Mistura



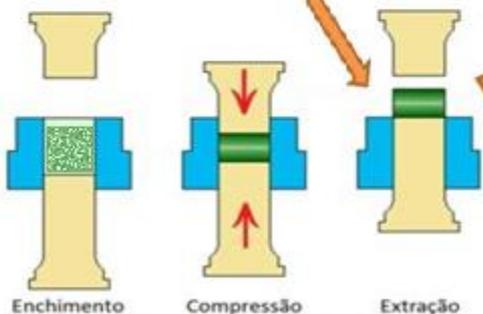
Processo Básico



1- Produção de pós

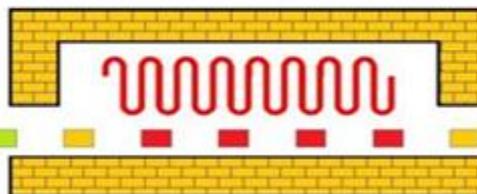


3-Compactação

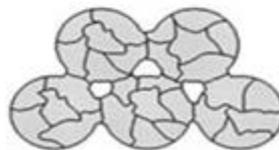


3-Compactação

4-Sinterização



Bronze: 780 - 840°C
Aço: 1050 - 1150°C
Ligação metalúrgica das partículas de pó



5- OPERAÇÕES COMPLEMENTARES

- Calibragem
- Cunhagem
- Usinagem
- Forjamento
- Tratamento térmico
- Tratamento de superfície
- Rebarbação
- Impregnação
- Infiltração
- Jateamento

5- Produto acabado





ESTUDOS DE CASOS

Exemplos de casos de conversão para a metalurgia do pó de peças estruturais que eram antes fabricadas por outros processos tais como usinagem, fundição, microfusão, forjamento, estampagem, trefilação ou laminação, dentre outros. (site www.metalurgiadopo.com.br.)

De forma resumida, os benefícios obtidos nestas conversões foram:

- Melhora no desempenho do produto final
- Maior precisão dimensional
- Melhora da resistência mecânica
- Melhora das propriedades tribológicas
- Propriedades autolubrificantes
- Eliminação de processos poluentes
- Redução do ruído
- Redução do número de etapas de fabricação
- Redução do número de componentes na peça
- Redução do tempo de fabricação
- Redução do peso final e Redução de custos



Caso 1: Anel para freio ABS

Aplicação: Automobilística - Sistema de freio ABS.

Projeto original: Material: aço SAE 1020

Peça fabricada a partir de dois componentes estampados.

Processo: estampagem, montagem com rebites, usinagem e cromatização.

Conversão para o sinterizado:

Material: aço sinterizado DIN D35

Processo: Compactação, sinterização, usinagem, rebarbação, ferrox e zincagem.

Comentários: Vantagens em redução de peso e melhor precisão dimensional, importante na montagem do conjunto.





Caso 2: Anel sincronizador

Aplicação: Automobilística - Caixa de transmissão.

Projeto original: Material: latão

Processo: forjado e usinado (2 operações).

Conversão para o sinterizado:

Material: aço sinterizado MPIF FN-0208-35

Processo: compactação, pré-sinterização, recompactação, sinterização, usinagem (1 operação) e carbonitreção.

Comentários: Vantagem no aumento da resistência mecânica do componente.





Caso 3: Tampa da polia

Aplicação: Automobilística

- Tampa da polia do alternador

Projeto original: Material:
aço SAE 1020.

Peça fabricada a partir de dois
componentes usinados.

Processo: porca – usinagem (2 operações), recartilagem.
corpo – usinagem (5 operações), montagem da porca por
interferência.

Conversão para o sinterizado:

Material: aço sinterizado MPIF F-0005-20

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

Comentários: O componente foi reprojetoado para adaptação ao sinterizado. Originalmente feito em duas peças e com várias operações de usinagem, em sinterizado é feito em uma só peça com ganho da operação de montagem e da qualidade do conjunto.





Caso 4: Engrenagem

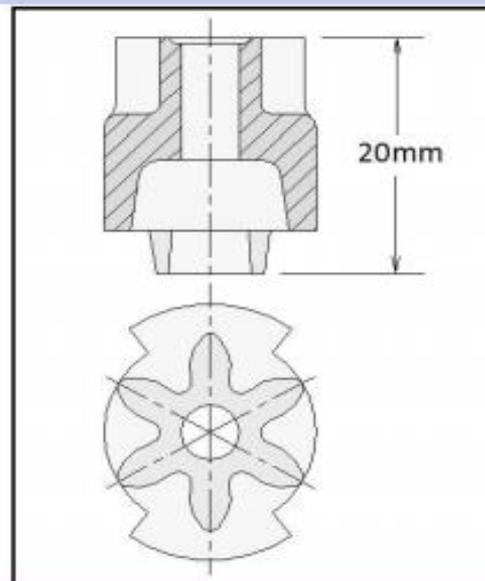
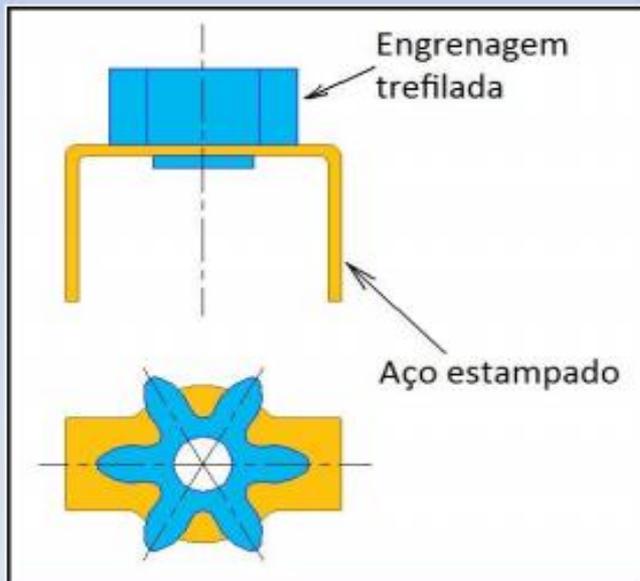
Aplicação: Automobilística - Engrenagem

Projeto original: - Chapa estampada: Estampado, cromatizado.

-Aço trefilado: Trefilado, usinado, cementado e

-tratado térmicamente.

As duas peças são montadas por interferência.





Vídeo complementar sobre o processo de sinterização:

https://www.youtube.com/watch?v=I39m28NZ7_s

<https://youtu.be/n-2oOq3Ao9U>



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



Telecurso2000 Profissionalizante - Metalurgia do pó.mp4

https://youtu.be/T1K_KJICf2w

PMR3203 – INTRODUÇÃO À MANUFATURA MECÂNICA

Aula 8: TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE SUPERFÍCIES



Tópicos

- Tratamentos térmicos
- Tratamentos termoquímicos
- Outros tratamentos superficiais



Tratamentos térmicos

Porque usar tratamentos térmicos ou termoquímicos?

- As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento mecânico e termomecânico e dos **tratamentos térmicos** realizados



Tratamentos térmicos

- os tratamentos térmicos podem ser descritos por ciclos de aquecimento e resfriamento controlados no material puro ou liga, que causam modificações na microestrutura dos mesmos





Tratamentos térmicos

Definição

São um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos determinados materiais, em especial aços, sob condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento, com os objetivos de alterar as suas propriedades e conferir-lhes características determinadas.



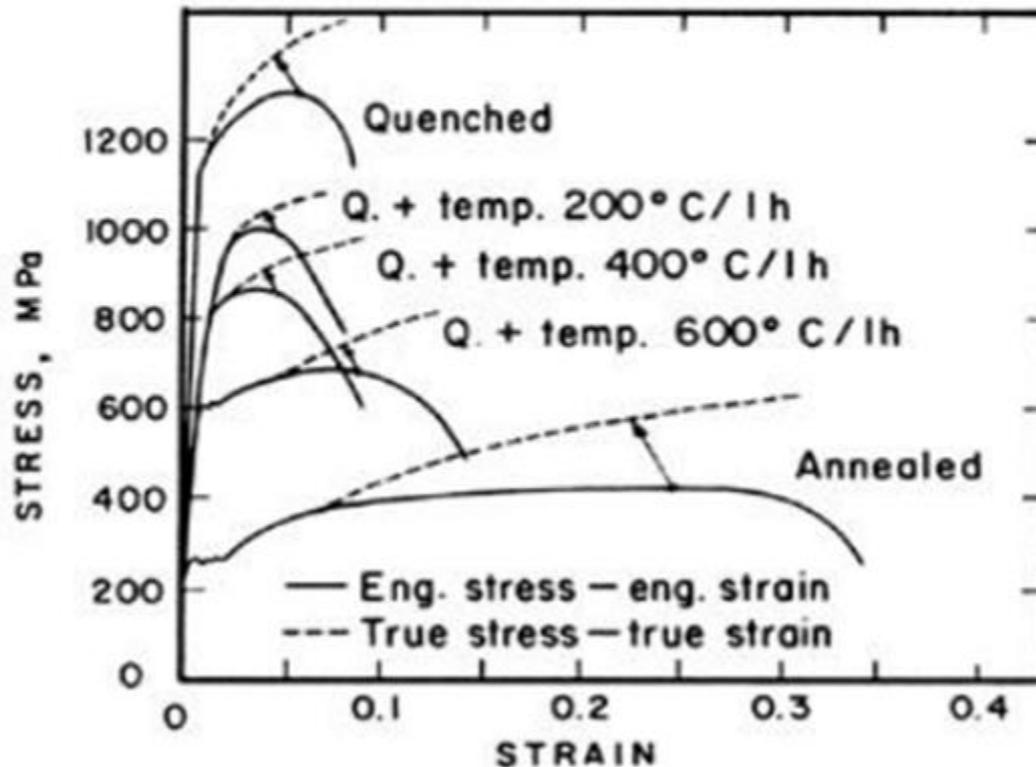
Tratamentos térmicos em aços

As propriedades dos aços dependem de sua estrutura (e grau de encruamento – deformação a frio).

Os tratamentos térmicos modificam em maior ou menor grau as estruturas dos aços alterando suas propriedades.



Tratamentos térmicos em aços : Temperatura Vs Velocidade de resfriamento



Aço 1040 submetido a diferentes tratamentos térmicos: Quenched (têmpera), tempered (revenimento), annealed (recozimento).



Tratamentos Térmicos de Aços

Para cada liga de aço diferente existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e o resfriamento. Endurecibilidade é um termo usado para descrever a habilidade de uma liga de ser endurecida pela formação de martensita como resultado de um tratamento térmico.



Composição química (porcentagem em peso) Aço 4140

C	Mn	P, max	S, max	Si	Ni	Cr	Mo	Outros elementos
0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,040	0,20-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-

Normalizado



500X

Temperado



750X



Principais objetivos

- Remoção de tensões internas: (que vem de deformação plástica, soldagem usinagem etc...)
- Aumento ou diminuição da dureza
- Aumento ou redução da resistência mecânica
- Melhora da ductilidade
- Melhora da usinabilidade
- Melhora da resistência ao desgaste
- Melhora da resistência a corrosão

Obs. Para cada efeito é necessário um tratamento específico



Fatores de influencia

Composição química:

- Temperatura final de aquecimento
- Tempo de permanência na temperatura final de aquecimento (1 polegada por hora ou 1,5 minuto por mm). Deve ser o suficiente para homogeneizar a peça,
- Forma e dimensões da peça (quanto mais intrincado o formato da peça maior possibilidade de empenamentos ou fissuras)
- Meio de resfriamento: (de uma maneira geral quanto mais rápido o resfriamento maior a resistência e dureza e menor a deformabilidade e usinabilidade.

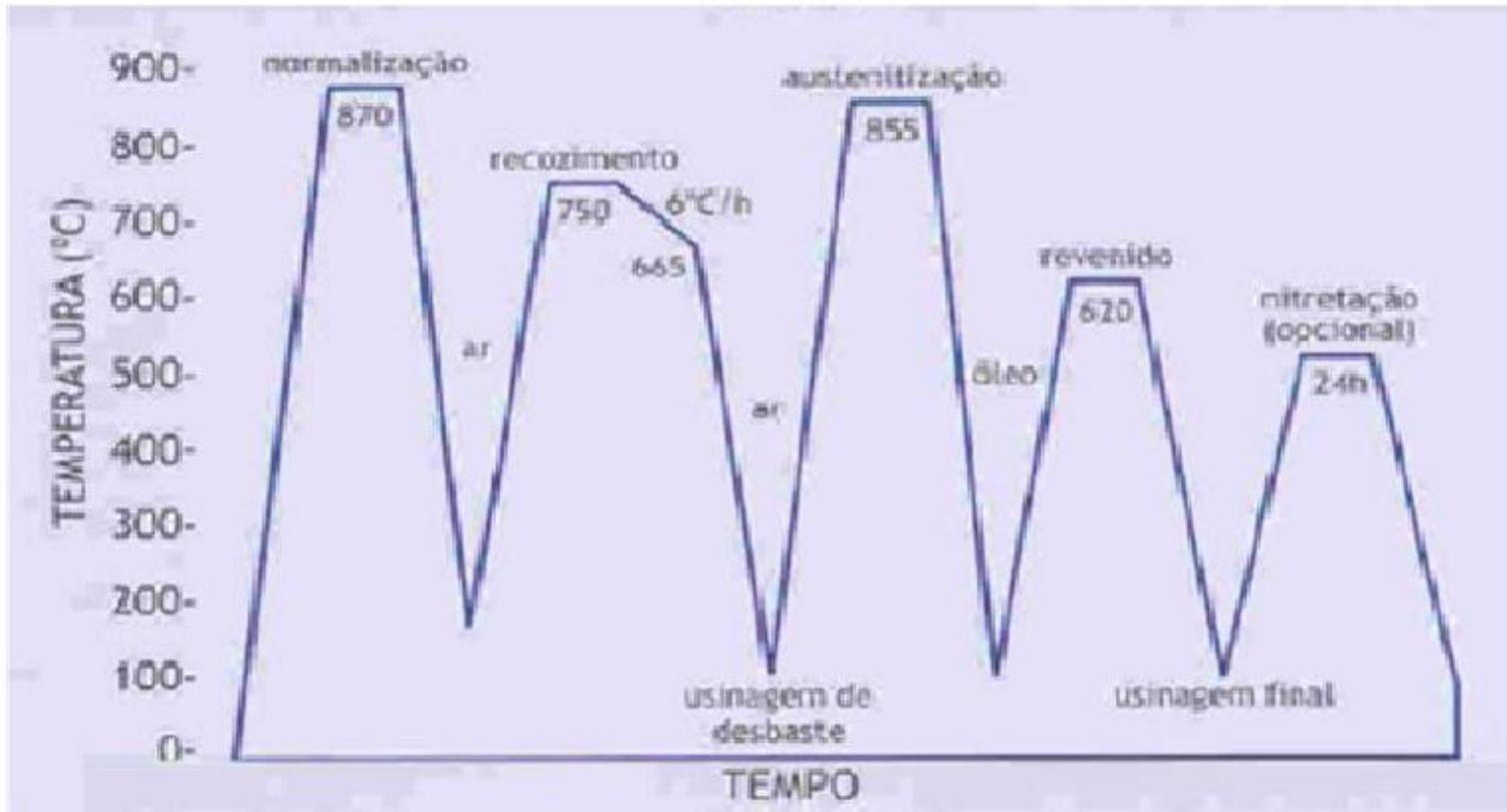


Principais Tipos de Tratamentos Térmicos:

- Normalização
- Reozimento
- Têmpera
- Revenimento
- Recuperação/recristalização



Tratamentos térmicos em aços



Representação esquemática de ciclos de tratamentos térmicos para o aço ABNT ANSI 4140.



Normalização

Tratamento térmico de recozimento usado para refinar os grãos (diminuir o tamanho médio dos grãos) e produzir uma distribuição de tamanhos mais uniforme e desejável. Aços perlíticos com grãos mais finos são mais tenazes que aços com grãos mais grosseiros.

A normalização é obtida por aquecimento a uma temperatura aproximadamente de 55 a 85°C, acima da temperatura crítica superior. Após de passado o tempo de austenização, resfria-se o material ao ar.



Recozimento

O recozimento é um tratamento térmico no qual um material é aquecido até uma temperatura elevada por um período prolongado e em seguida resfriado lentamente.

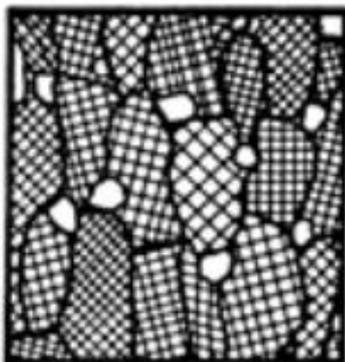
Objetivos do recozimento:

- 1- Aliviar tensões;
- 2- Tornar o material mais mole, dúctil e tenaz;
- 3- Produzir uma microestrutura específica.

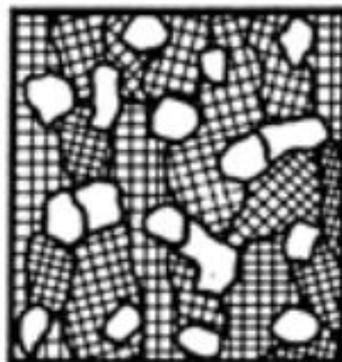


Tratamento térmico de recozimento

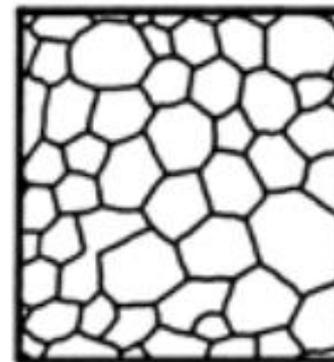
Recuperação e a recristalização - Estático



a

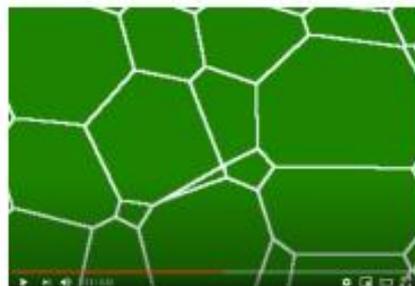
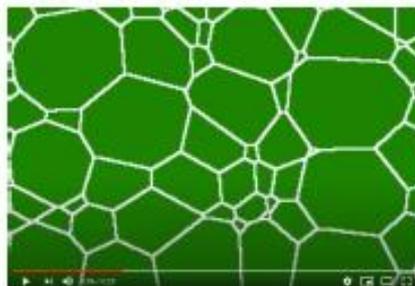


b



c

Crescimento de Grão - Estático





Recozimento

Recozimento intermediário:

- O recozimento intermediário é um tratamento utilizado para anular os efeitos da deformação plástica a frio.
- Torna o material mais mole e aumenta a ductilidade de um metal que tenha sido submetido a um processo de encruamento com alto grau de deformação



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

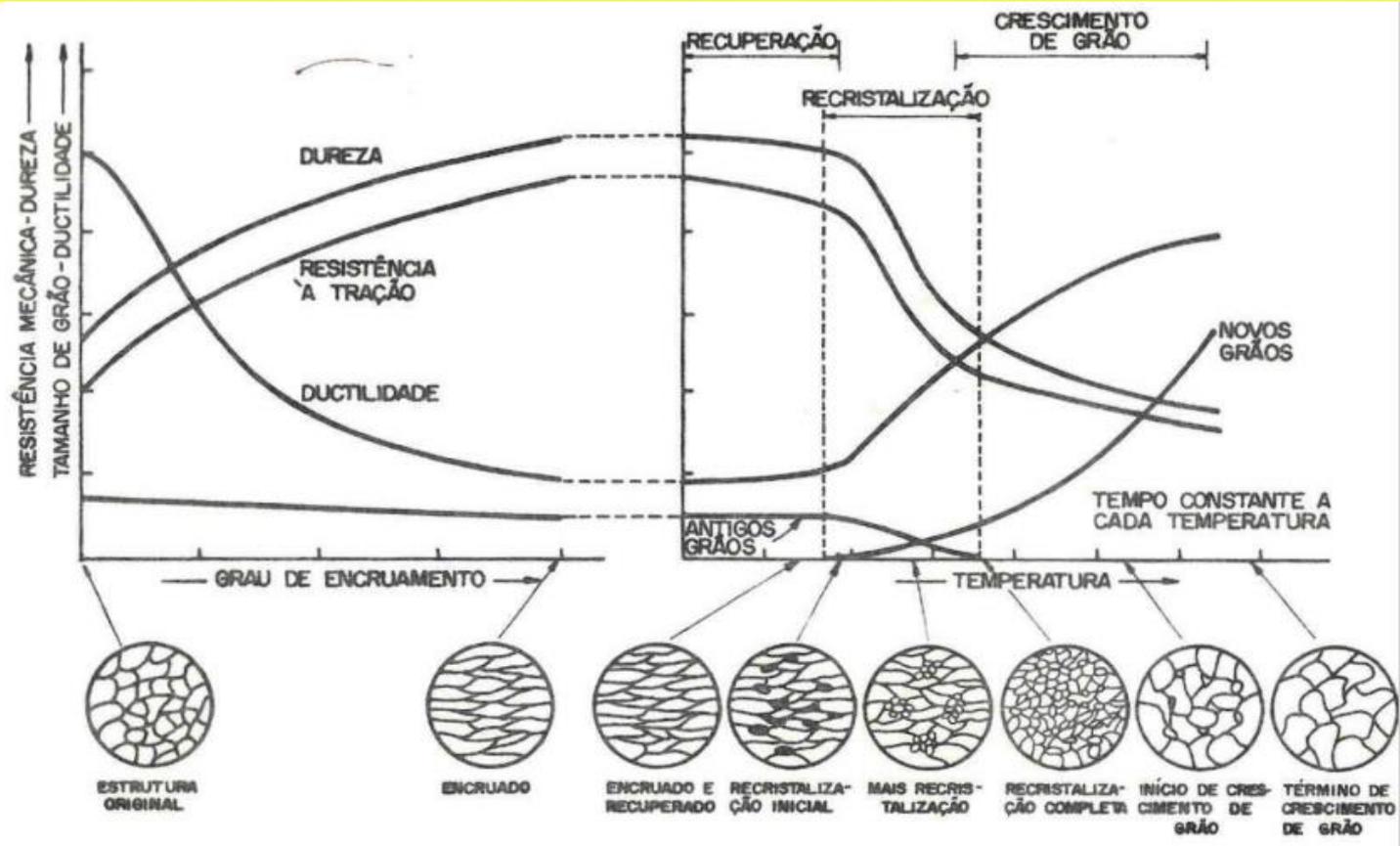
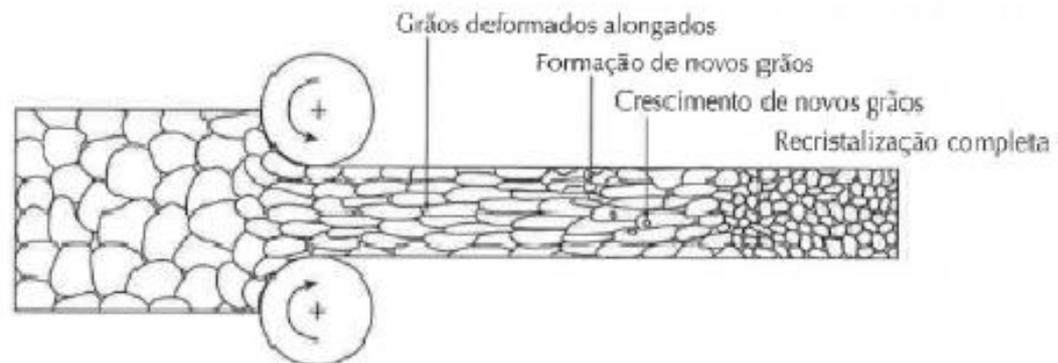


Ilustração esquemática das mudanças na morfologia e no tamanho dos grãos do metal durante a laminação a quente.





Alívio de tensões

Distorções e empenamento podem ocorrer em um material se não forem removidas as tensões residuais causadas pelos seguintes processos:

- Deformação plástica como usinagem e lixamento;
- Resfriamento não uniforme de uma peça que foi processada ou fabricada a uma temperatura elevada com solda ou fundição;
- Transformação de fases que seja induzida mediante um resfriamento onde as fases de origem e de produto possuem densidades diferentes.
- Para aliviar essas tensões utiliza-se o tratamento de recozimento.



Têmpera - Objetivo: Obtenção da estrutura chamada martensita que possui alta dureza e resistência, mas alta fragilidade

A tempera é aplicável apenas para aços com mais de 0,3% de carbono)

Aquecimento: Região da austenita entre 800 e 950 C.

Resfriamento: Em aços comuns ao carbono sem elementos de liga em água ou em óleo, em aços contendo elementos de liga em banho de sais polímeros ou mesmo ao ar.

Estrutura: martensita (acicular)



Microestrutura: Martensita



Normalizado

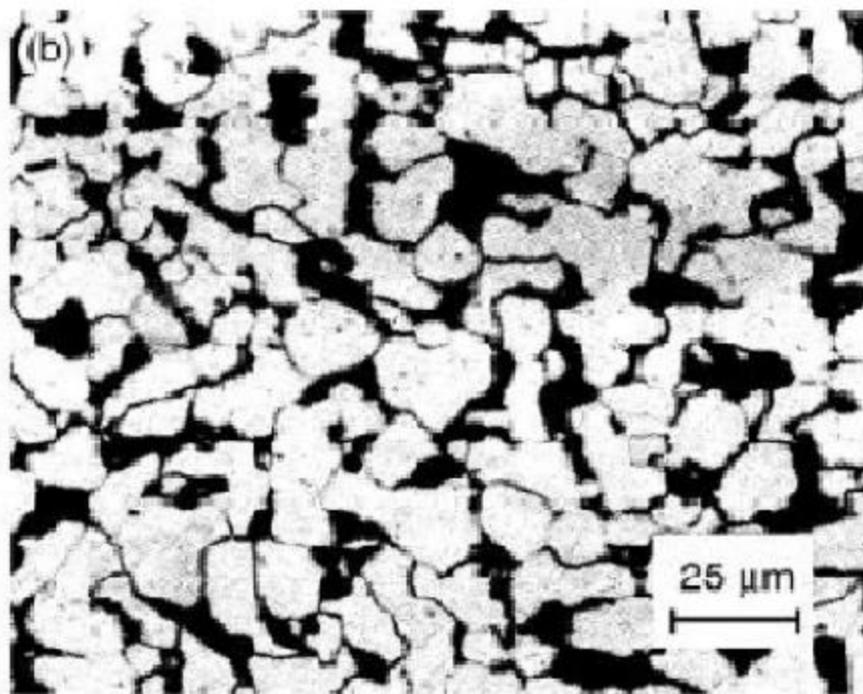
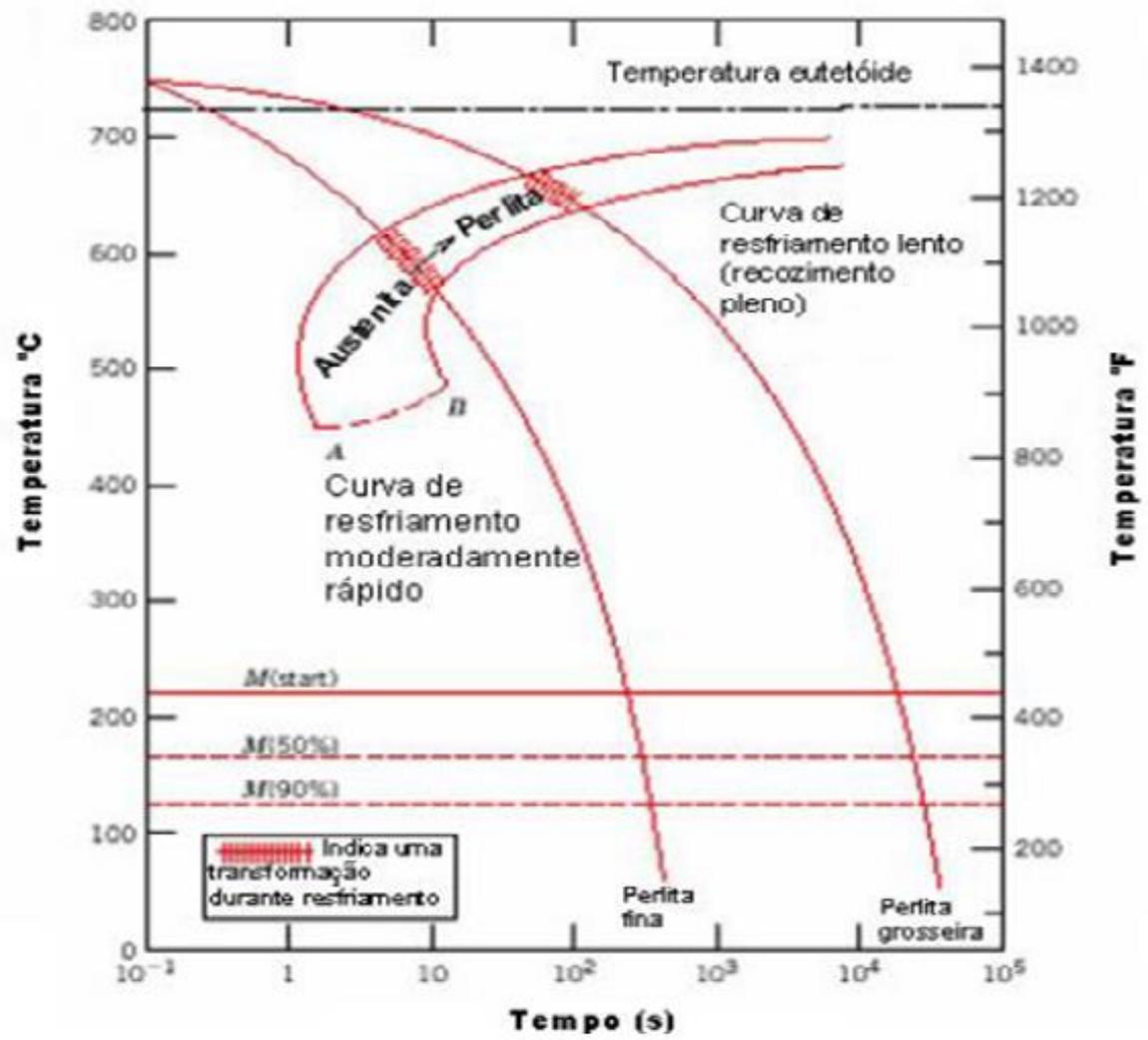


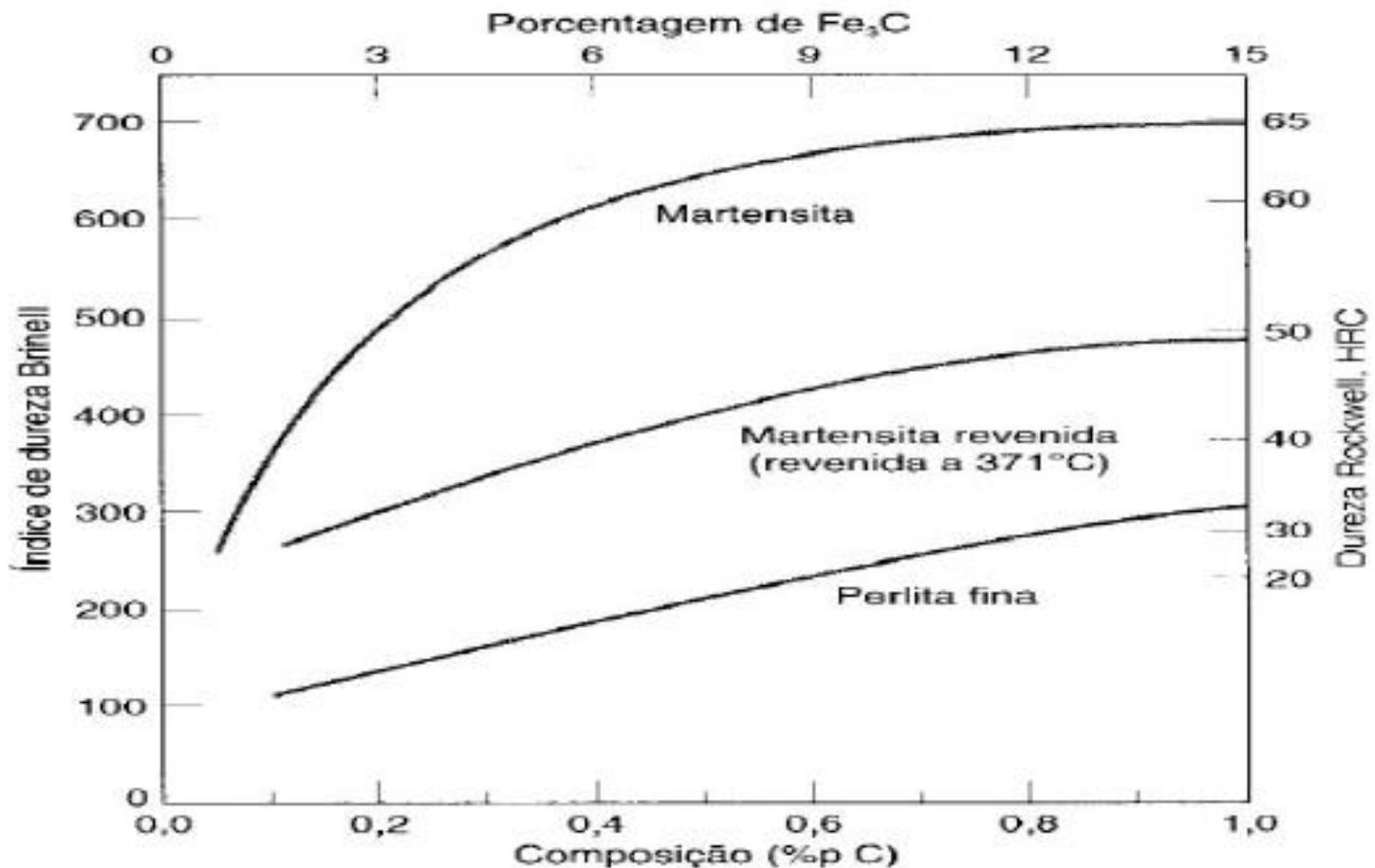


Diagrama TTT (Transformação Tempo Temperatura) ou TRC (Transformação em Resfriamento Contínuo)





Dureza de aços comuns em função da quantidade de carbono e microestrutura





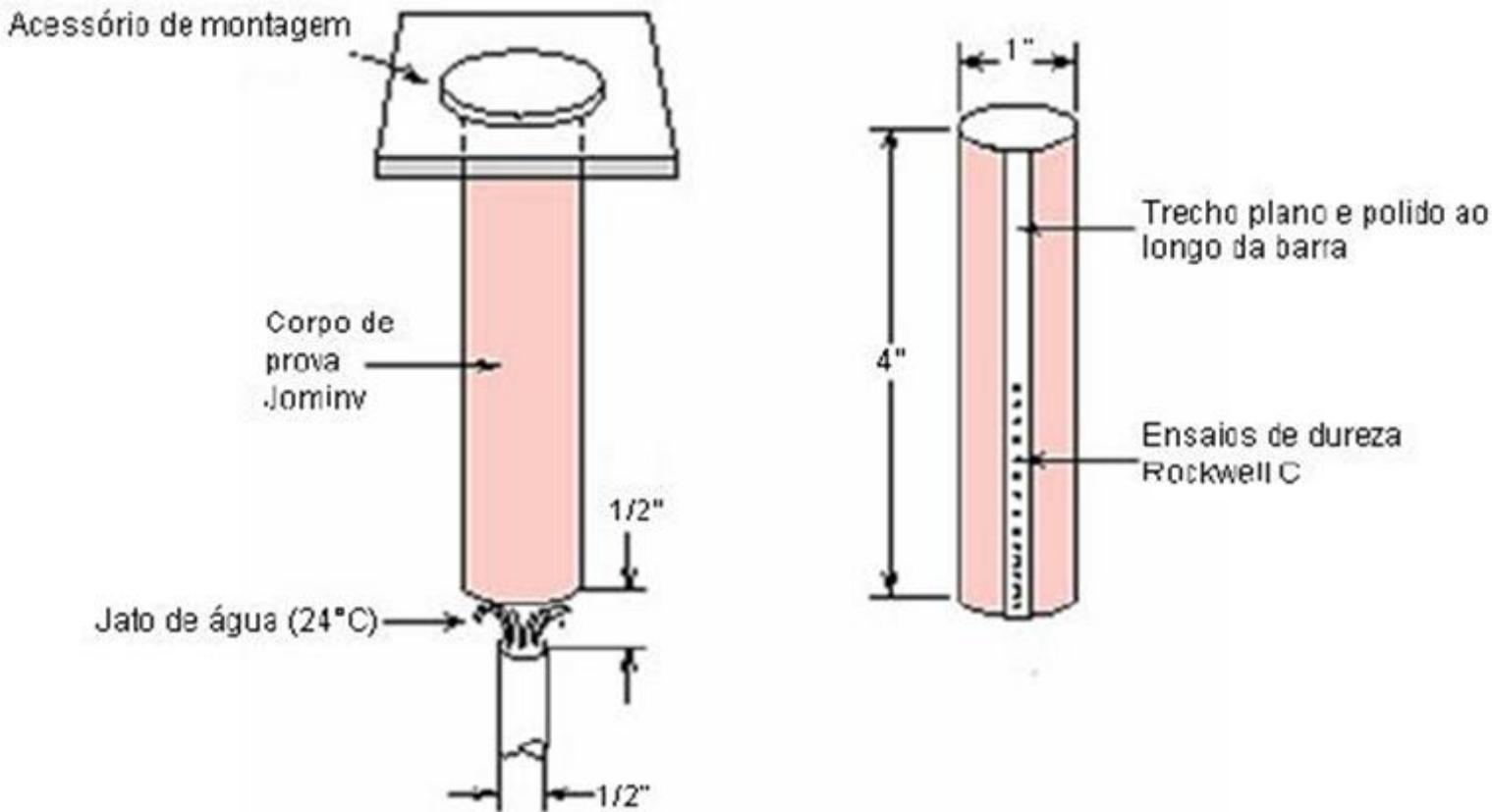
Endurecibilidade

A endurecibilidade é uma medida qualitativa da taxa segundo a qual a dureza cai em função da distância ao se penetrar no interior de uma amostra como resultado do menor teor de martensita. Uma liga de aço que possui endurecibilidade elevada é uma liga que endurece, ou forma martensita, não apenas na sua superfície, mas em elevado grau também ao longo de todo o seu interior.



Ensaio de Temperabilidade

Ensaio Jominy da Extremidade temperada



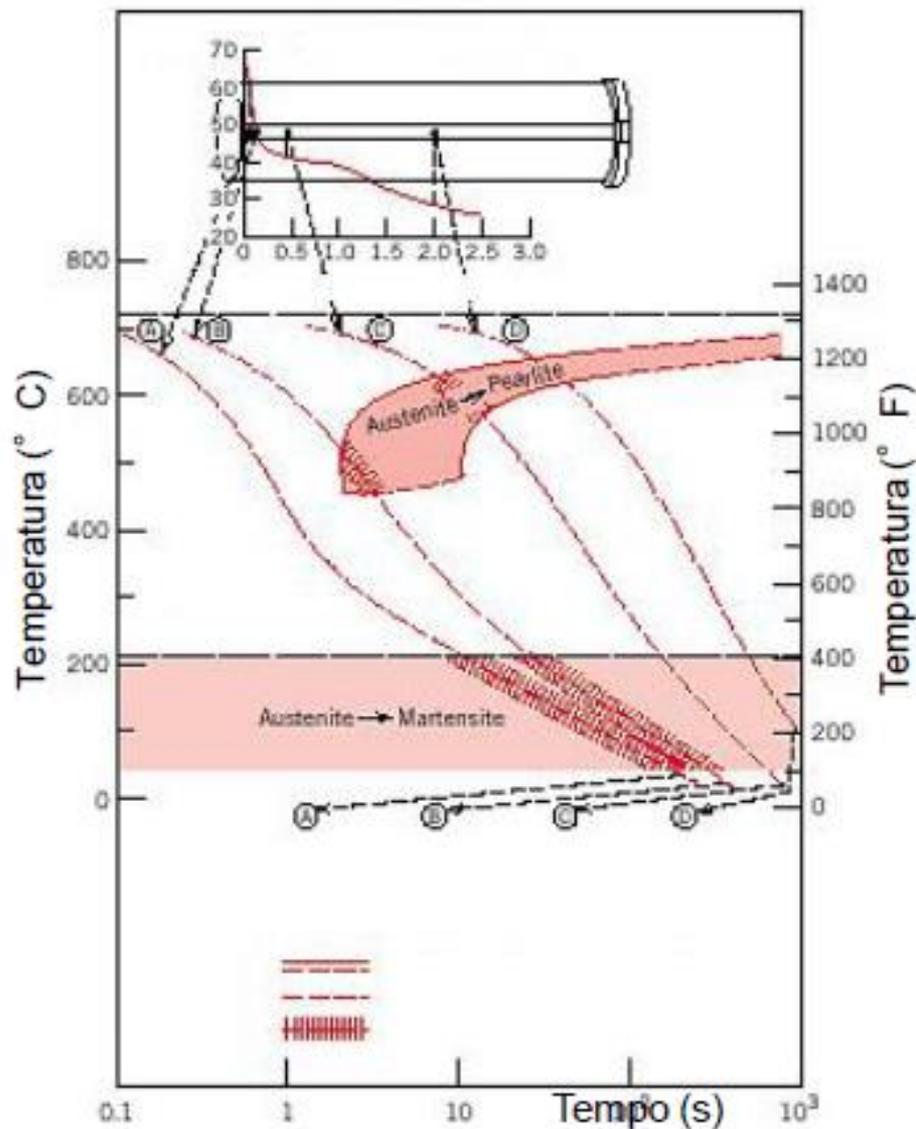
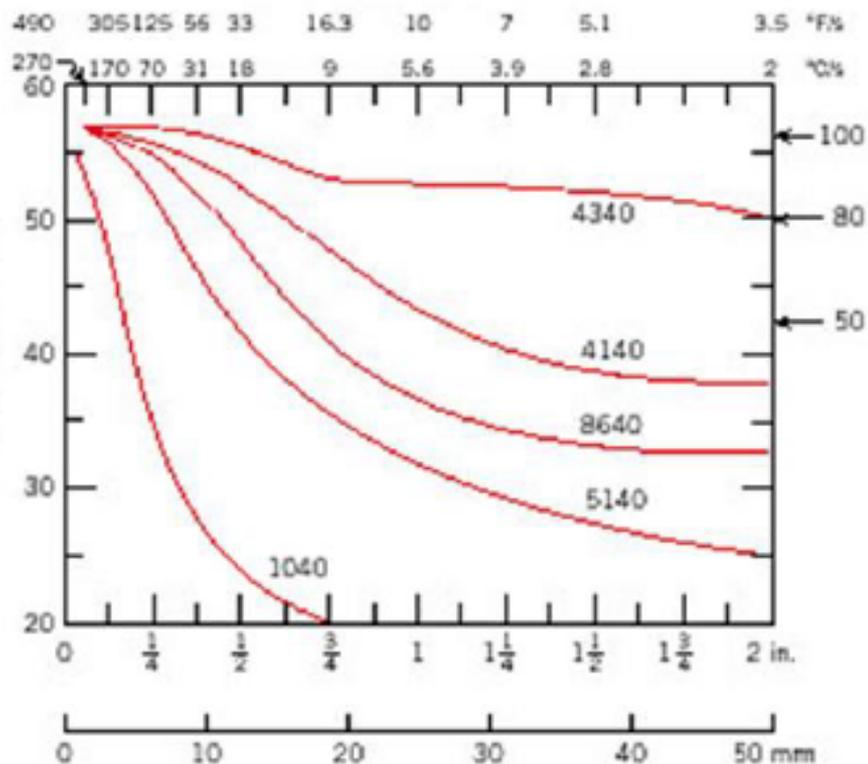


Diagrama de resfriamento contínuo para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide sobre o qual estão superpostas as curvas de resfriamento para quatro posições Jominy diferentes, bem como as microestruturas correspondentes que resultam para cada.



Taxa de resfriamento a 700°C



Distância a partir da extremidade temperada

Curvas de endurecibilidade para cinco ligas de aço diferentes, cada uma contendo 0,4%p C. As composições (em %p) aproximadas das ligas são as seguintes: 4340-1,85Ni, 0,80Cr e 0,25Mo; 4140- 1,0Cr e 0,20Mo; 8640-0,55Ni, 0,50Cr e 0,20Mo; 5140-0,85Cr; 1040 é um aço sem elementos de liga.



Endurecimento por precipitação

A resistência e a dureza de algumas ligas metálicas podem ser melhoradas pela formação de partículas extremamente pequenas e uniformemente dispersas de uma segunda fase no interior da matriz da fase original. O processo responsável por esse efeito denomina-se **endurecimento por precipitação**, e as partículas de nova fase são conhecidas por precipitados.



Endurecimento por precipitação

O termo envelhecimento ou endurecimento por envelhecimento também é usado para designar o endurecimento por precipitação

Ligas endurecíveis por precipitação:

- Al-Cu;
- Cu-Be;
- Cu-Sn;
- Mg-Al;

E algumas ligas ferrosas também.



temperatura em função do tempo

Gráfico esquematizado da temperatura em função do tempo mostrando tanto o tratamento térmico de solubilização como o tratamento térmico de precipitação para o processo de endurecimento por precipitação.



Coffee - break



Tratamentos termoquímicos

Tratamentos termoquímicos são os tratamentos que visam o endurecimento superficial dos aços, pela modificação parcial da sua composição química e aplicação simultânea de um tratamento térmico

Os tratamentos termoquímicos são também conhecidos como tratamentos de endurecimento superficial (que é sua principal finalidade)



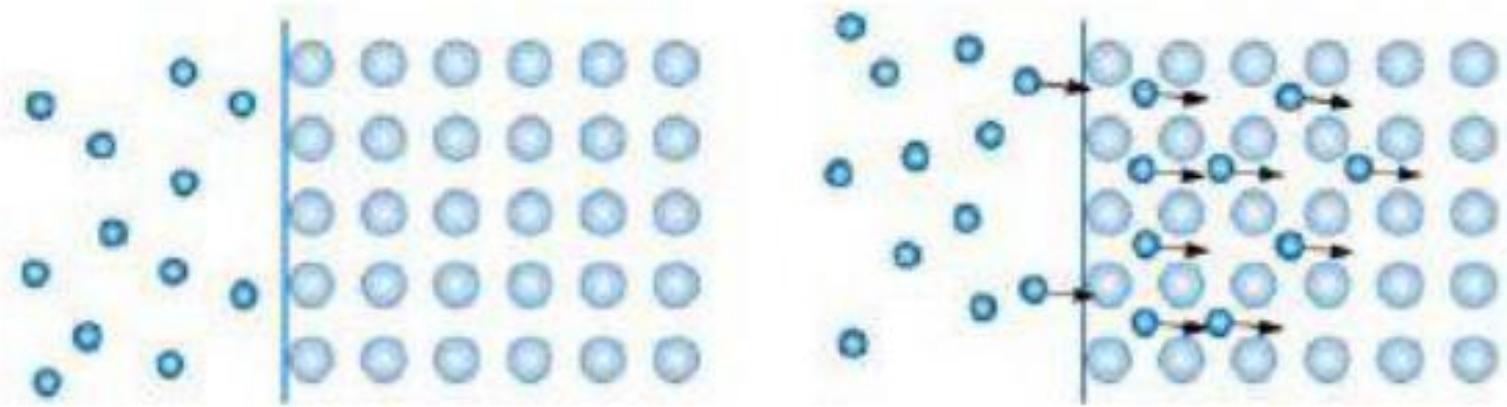
Tratamentos termoquímicos

A modificação da composição química se dá por difusão termoquímica de elementos na superfície do aço como: carbono, nitrogênio e boro, entre outros. Pode ser usado também pra adquirir propriedades como resistência à fadiga, à corrosão e à oxidação em altas temperaturas



Tratamentos termoquímicos

Basicamente nos tratamentos termoquímicos temos matéria sendo transportada através da matéria, ou matéria sendo introduzida na matéria por difusão

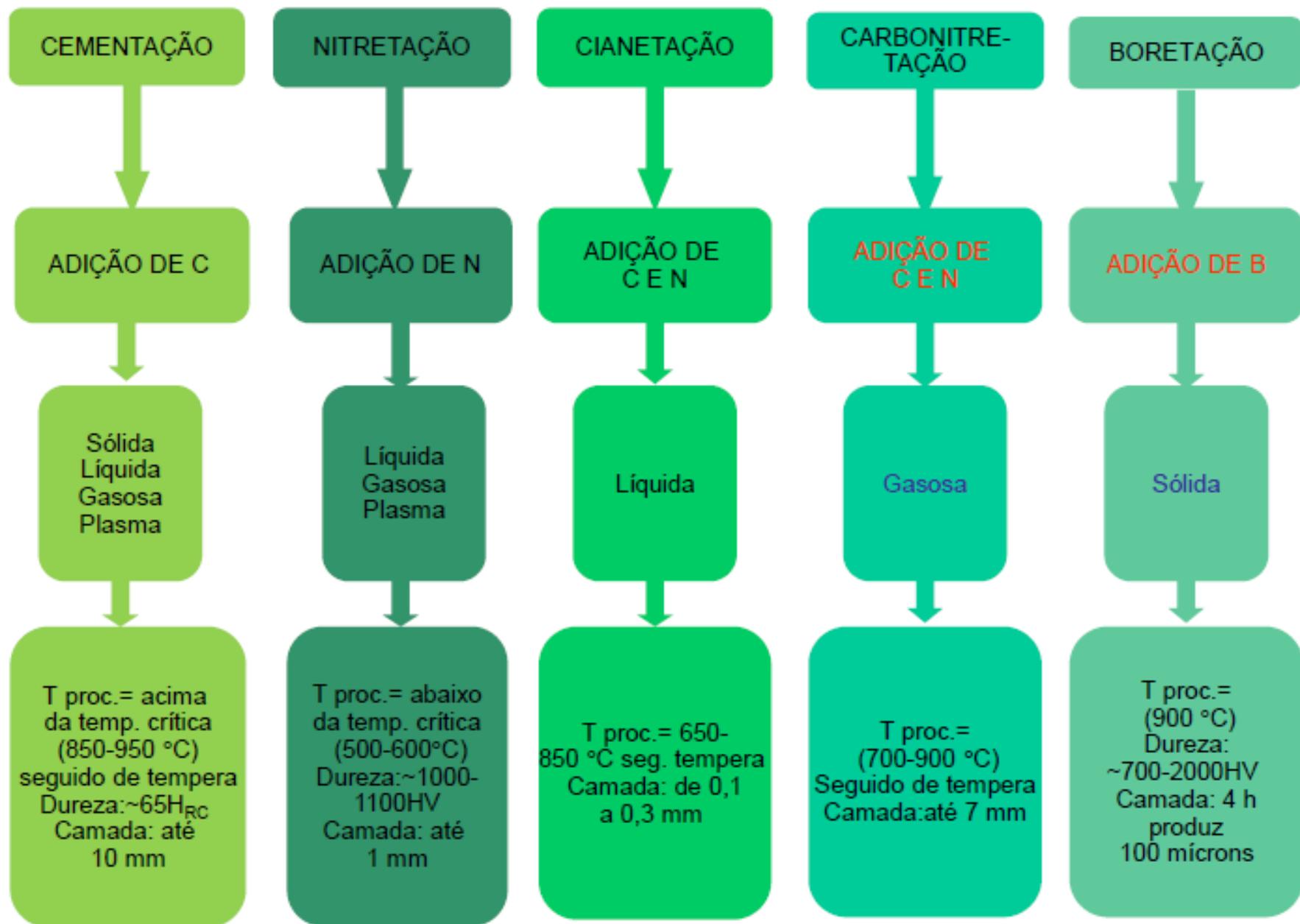




Tratamentos termoquímicos

Tipos:

- Cementação ou Carbonetação (C)
- Nitretação (N)
- Cianetação (CN) (CNX)
- Carbonitretação (C + N)(C > N)
- Nitrocarbonetação (C + N) (N > C)
- Boretção (B)
- Tratamentos Termo reativos (CX + NX + CyNzX)
(V, Nb, Ta, Cr, W e Mo)





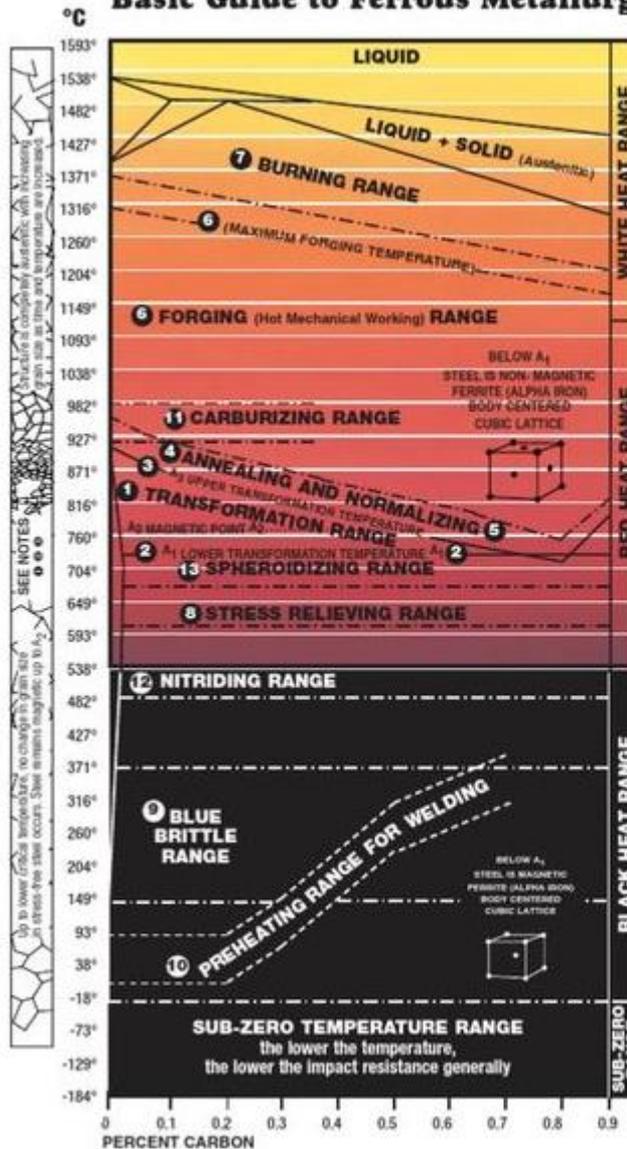
Têmpera superficial

Chama. É utilizada em aços médio-carbono e ferros fundidos, a dureza da superfície varia de 50 a 60 HRC. A camada temperada varia de 0,7 a 6 mm, podendo ocorrer pequenas distorções por causa das transformações de fase. Esse tratamento térmico superficial consiste no aquecimento localizado utilizando uma tocha oxiacetilênica e resfriamento com água ou outro meio (salmoura ou óleo).

Indução. É utilizada em aços médio-carbono e ferros fundidos, a dureza da superfície varia de 50 a 60 HRC. A camada temperada varia de 0,7 a 6 mm, podendo ocorrer pequenas distorções por causa das transformações de fase. Esse tratamento térmico superficial consiste no aquecimento localizado utilizando espiras de cobre onde passa uma corrente com alta frequência. O resfriamento é feito com água ou outro meio (salmoura ou óleo).



Basic Guide to Ferrous Metallurgy



- TRANSFORMATION RANGE**- In this range, steel undergoes internal atomic changes which radically affect the properties of the material.
- LOWER TRANSFORMATION TEMPERATURE (A₂)**- Formed A₂ on heating, A₂ on cooling. Below A₂ structure ultimately consists of FERRITE and PEARLITE (see below). On heating through A₂, these constituents begin to dissolve in each other to form AUSTENITE (see below) which is non-magnetic. This dissolved state continues on heating through the TRANSFORMATION RANGE until the solid solution is complete at the upper transformation temperature.
- UPPER TRANSFORMATION TEMPERATURE (A₁)**- Formed A₁ on heating, A₁ on cooling. Above this temperature the structure consists wholly of AUSTENITE which contains with increasing heat and temperature, a higher transformation temperature as bonded or carbon increases NICKEL (notched point).
- FERRITE** is practically pure iron (in plain carbon steels) existing below the lower transformation temperature. It is magnetic and has very slight solid solubility for carbon.
- PEARLITE** is a mechanical mixture of FERRITE and CEMENTITE.
- CEMENTITE** or IRON CARBIDE is a compound of iron and carbon, Fe₃C.
- AUSTENITE** is the non-magnetic form of iron and has the power to dissolve carbon and alloying elements.
- ANNEALING** is normally referred to as FULL ANNEALING, consists of heating steel to slightly above A₁ holding the AUSTENITE to form, then slowly cooling in order to produce small grain iron, softness, good ductility and other desirable properties. The cooling slowly the AUSTENITE transforms to FERRITE and PEARLITE.
- NORMALIZING** consists of heating steel to slightly above A₁ holding the AUSTENITE to form, then followed by cooling (in still air). On cooling, AUSTENITE transforms giving somewhat higher strength and hardness and slightly less ductility than in annealing.
- FORGING RANGE** extends to several hundred degrees above the UPPER TRANSFORMATION TEMPERATURE.
- BURNING RANGE** is above the FORGING RANGE. Burned steel is brittle and cannot be used except by annealing.
- STRESS RELIEVING** consists of heating to a point below the LOWER TRANSFORMATION TEMPERATURE (A₂), holding for a sufficient length period to relieve lock-up stresses, then slowly cooling. This process is sometimes called PROCESS ANNEALING.
- BLUE BRITTLE RANGE** occurs approximately from 300° to 700°F. Tempering or working of steels should not be done between these temperatures, since they are more brittle in this range than above or below it.
- PREHEATING FOR WELDING** is carried out to prevent crack formation. See TEMPERING PREHEATING CHART for recommended temperatures for various steels and non-ferrous metals.
- CARBURIZING** consists of dissolving carbon into surface of steel by heating in above transformation range in presence of carbonizing compounds.
- NITRIDING** consists of heating certain special steels to about 1300°F for long periods in the presence of ammonia gas. Nitrogen is absorbed into the surface to produce extremely hard "skin".
- SPHEROIDIZING** consists of heating to just below the lower transformation temperature, A₂, for a sufficient length of time to get the CHARACTERISTIC combination of PEARLITE and proeutectoid iron. This produces softness and is more workable than normal.
- MARTENSITE** is the hardest of the transformation products of AUSTENITE and is formed only on cooling below a certain temperature known as the M_s temperature (about 800° to 800°F for carbon steels). Cooling to this temperature must be sufficiently rapid to prevent AUSTENITE from transforming to softer constituents at higher temperatures.
- QUENCHED STEEL** consists approximately 0.8% carbon.
- FLANKING** occurs in some alloy steels and is a defect characterized by localized micro-cracking and "flake-like" fracturing. It is usually attributed to hydrogen blisters. Care consists of cooling to at least 300°F before air-cooling.
- OPEN OR BURNING STEEL** has not been completely decarburized and the rapid oxidation with a scaled surface (1 inch²) and a core portion containing hydrogen which can weld or roll without hot rolling.
- KILLED STEEL** has been decarburized to least sufficiently to stability without appreciable gas evolution.
- SEMI-KILLED STEEL** has been partially decarburized to reduce solid solution elements on the right.
- A SIMPLE RULE:** Small steels should be over, least 1000, inches approximately Tempe strength at periods per square inch (2000 Brinell + 2 x 1000) = approx. 100,000 Tempe strength, p. 1-1.



Outros tratamentos superficiais

- Revestimentos com filmes finos
- endurecimento superficial por ação mecânica
(shooting pining, tamboreamento, outros)

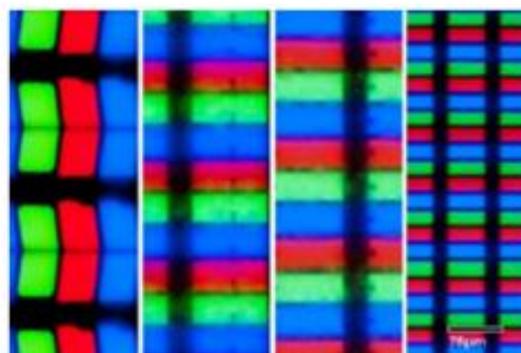
Jateamento com Granalhas

O jateamento com granalhas é um processo de trabalho a frio, que consiste em projetar granalhas com alta velocidade (entre 20 e 100 m/s) contra uma superfície de um material metálico. A granalha atua como se fosse um pequeno martelo sobre a superfície metálica causando deformação plástica. Esse processo de deformação superficial é largamente utilizado para introduzir tensões residuais de compressão na superfície, as quais melhoram as propriedades mecânicas dos componentes em serviço, em especial, aumentam a vida em fadiga.



Aplicações de Recobrimentos

- ❖ Proteção a oxidação e corrosão
- ❖ Redução de desgaste e atrito
- ❖ Resistência térmica
- ❖ Agente bactericida
- ❖ Componentes estéticos
- ❖ Componentes eletrônicos
- ❖ Sistemas eletro-mecânicos



Ionbond (2015)

<http://prometheus.med.utah.edu/~bwjones/2010/06/apple-retina-display>



Recobrimentos ou Revestimentos (superfícies)

❖ Tipos de recobrimentos

❖ Metálicos

❖ Zn, Cr, Ag, Au, Cu...

❖ Cerâmicos

❖ Óxidos (ZnO , Al_2O_3 , TiO_x)

❖ Carbonetos (NbC , TiC , SiC)

❖ Nitretos, Boretos...

❖ Poliméricos

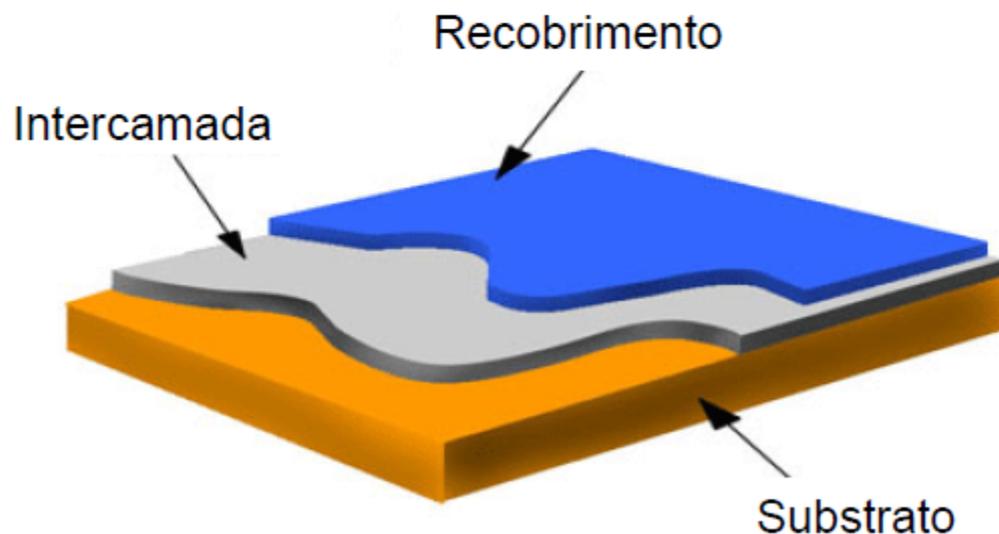
❖ PVA

❖ PU

❖ Resina acrílica



[_JMhttp://produto.mercadolivre.com.br/MLB-679742179-400gr-corante-em-po-para-fabricaco-de-tinta-para-imprensa-](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-679742179-400gr-corante-em-po-para-fabricaco-de-tinta-para-imprensa-)





Recobrimentos metálicos

Para modificar ou proteger a superfície dos metais é preciso levar em conta aspectos econômicos e funcionais:

- Do ponto de vista econômico, o que se quer é proteger o material de uma possível corrosão ou desgaste e, assim, aumentar seu tempo de vida útil.
- Os aspectos funcionais consistem na modificação da superfície dos metais, de modo que eles adquiram certas qualidades, como maior dureza, novas dimensões, capacidade de refletividade e condutividade, boa aparência, sensação ao tato, etc.
- Estes Processos podem gerar Problemas de Poluição e quantidades substanciais de Resíduo com elementos Tóxicos e Metais Pesados.



Recobrimentos ou Revestimentos (superfícies)

❖ Tipos de recobrimentos - Exemplos

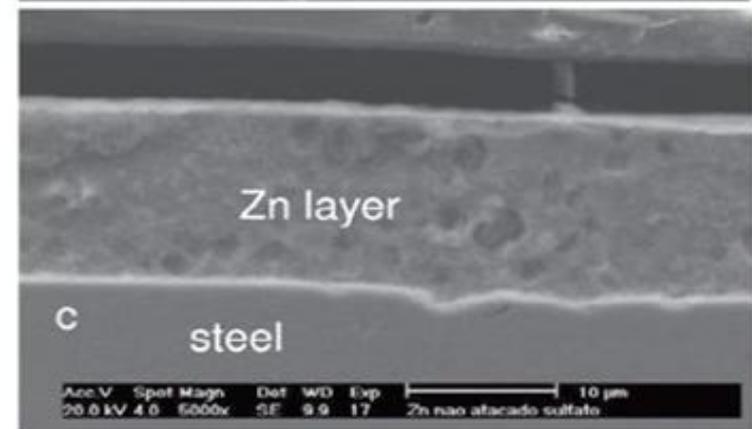
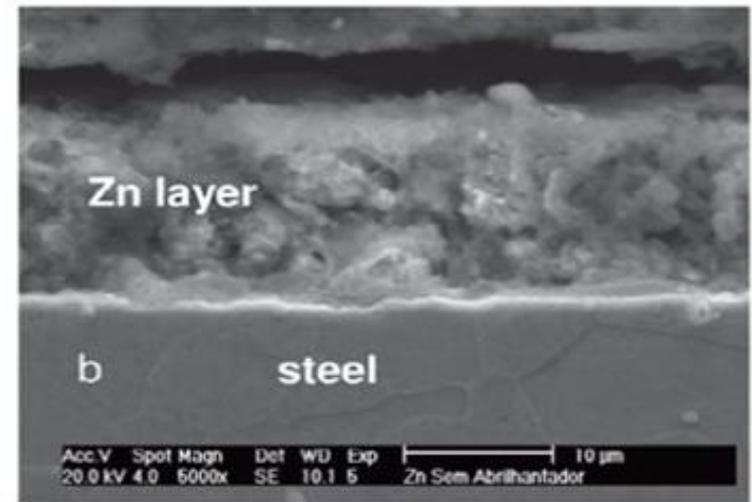
Galvanoplastia: processo eletrolítico para recobrimento metálico de objetos

Objetivos:

- Adquirir resistência a corrosão;
- Adquirir proteção contra a oxidação;
- Apresentar maior durabilidade;
- Aumentar a resistência da peça;
- Ampliar a espessura da peça;

Exemplos de galvanoplastias:

Cromaçoão, douraçoão, prateação, zincagem, niquelaçoão, anodizaçoão, etc.



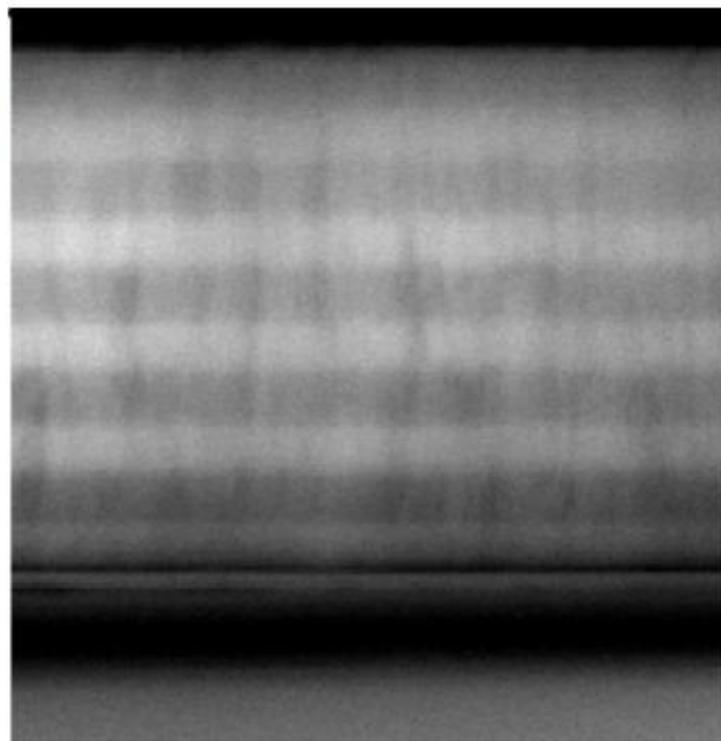


Recobrimentos: Ferramentas

- ❖ Recobrimentos típicos: TiN, CrN, WC, NbC, Ta-C
- ❖ Alta dureza ($> 20\text{GPa}$)
- ❖ Alto módulo de elasticidade ($> 300\text{GPa}$)
- ❖ Deposição por PVD ou CVD
- ❖ Baixa espessura ($< 10\ \mu\text{m}$)
- ❖ Alta tensão residual

PVD- Physical Vapor Deposition

CVD- Chemical Vapor Deposition

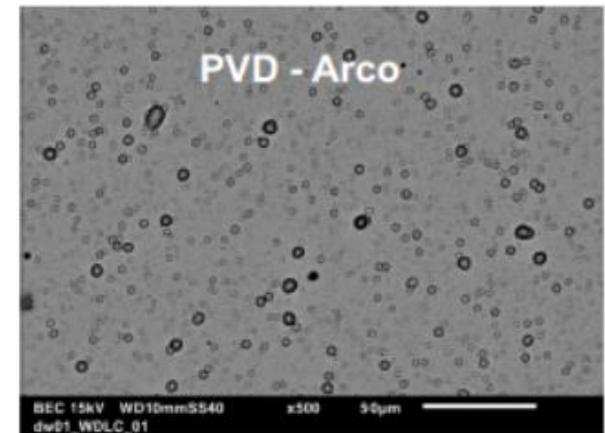
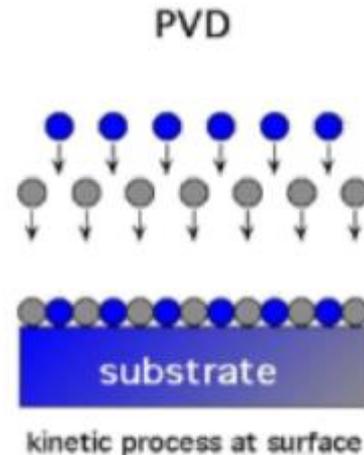




Processos de deposição

❖ Deposição física de vapor (PVD)

- ❖ Densos
- ❖ Homogêneos
- ❖ Finos
- ❖ Baixa temperatura
- ❖ Linha de visão
- ❖ Precursor sólido



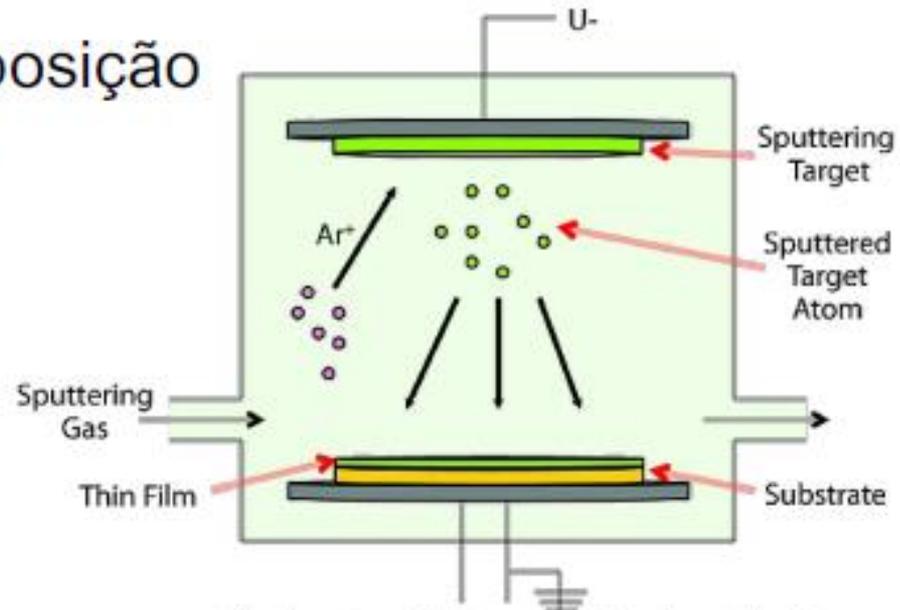
O processo PVD (Deposição física de vapor) é uma tecnologia utilizada para a **deposição de filmes metálicos finos sobre diversos tipos de substratos**. O processo é realizado, **sob vácuo**, aonde os metais a serem depositados (tais como zircônio, titânio, cromo) são evaporados. Graças a **energia cinética** e ao diferencial de potencial aplicado sobre a peça a ser recoberta, os íons metálicos são atraídos para a superfície do objeto a ser recoberto, onde se condensam, juntamente com um gás de processo, formando o revestimento desejado.

O **PVD** é particularmente indicado para aqueles produtos inovadores e de qualidade que necessitam atender elevados padrões (**resistência a abrasão, ao risco, a corrosão, dureza superficial, etc**) e permite ainda obter uma vasta gama de cores.

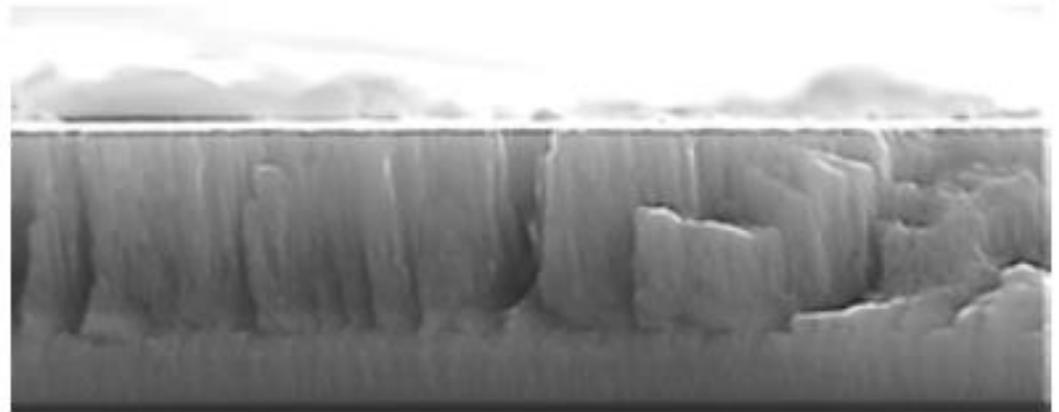
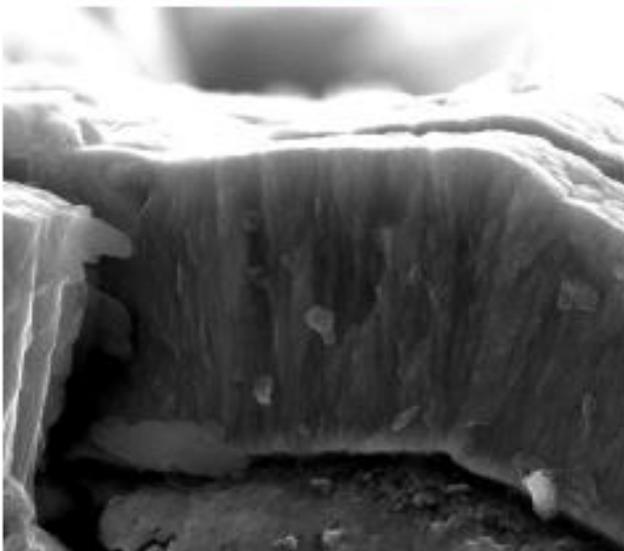


Processos de deposição

❖ Deposição física de vapor (PVD)



<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=108832720>

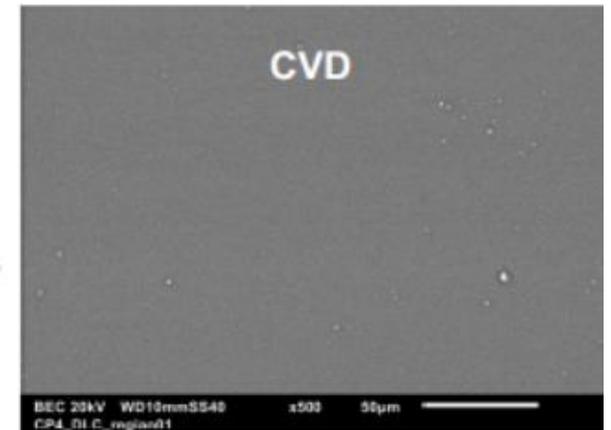
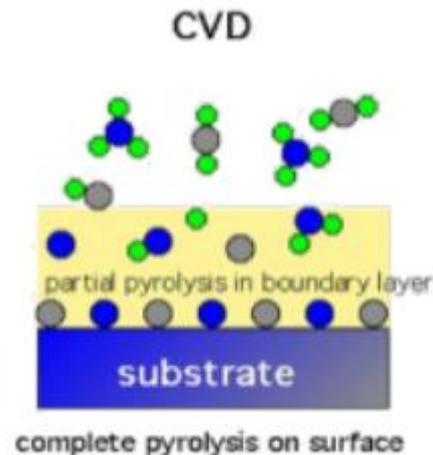




Processos de deposição

❖ Deposição química de vapor (CVD)

- ❖ Cerâmicos
- ❖ Densos
- ❖ Homogêneos
- ❖ Alta temperatura
- ❖ Finos
- ❖ Imersão
- ❖ Precursor gasoso

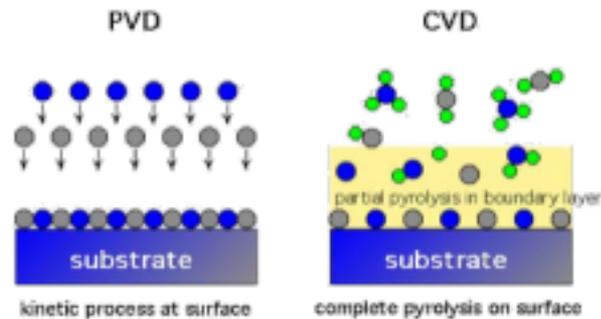


Deposição química em fase vapor ou CVD (*chemical vapour deposition*) é um processo versátil para construção de filmes sólidos, revestimentos, fibras, componentes monolíticos, entre outros materiais. Essa tecnologia é usada na indústria de semicondutores e outros componentes eletrônicos, em componentes ópticos e optoeletrônicos, fotossensíveis e revestimentos.

No processo de CVD ocorre a formação de um filme fino sólido pela deposição atômica ou molecular, em uma superfície aquecida, sendo o sólido resultante de uma reação química onde os precursores estão na fase de vapor. No processo de CVD as espécies depositadas são átomos ou moléculas ou a combinação desses.



Processos de deposição



CVD: usa gases or precursores **em** estado vapor e o filme depositado a partir de reações químicas sobre superfície **do** substrato. **PVD:** vaporiza o material sólido por calor ou sputtering e recondensa o vapor sobre a superfície do substrato para formar o filme fino sólido.

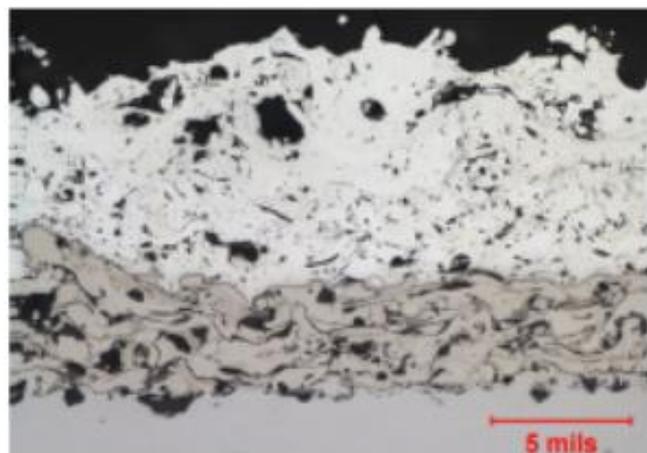
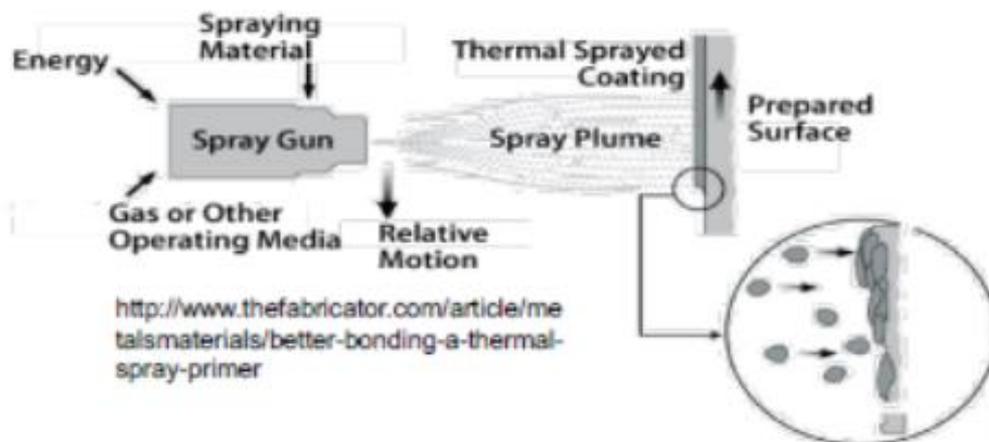
- Filmes CVD: melhor cobertura de degrau.
- Filmes PVD: melhor qualidade, baixa concentração de impurezas e baixa resistividade



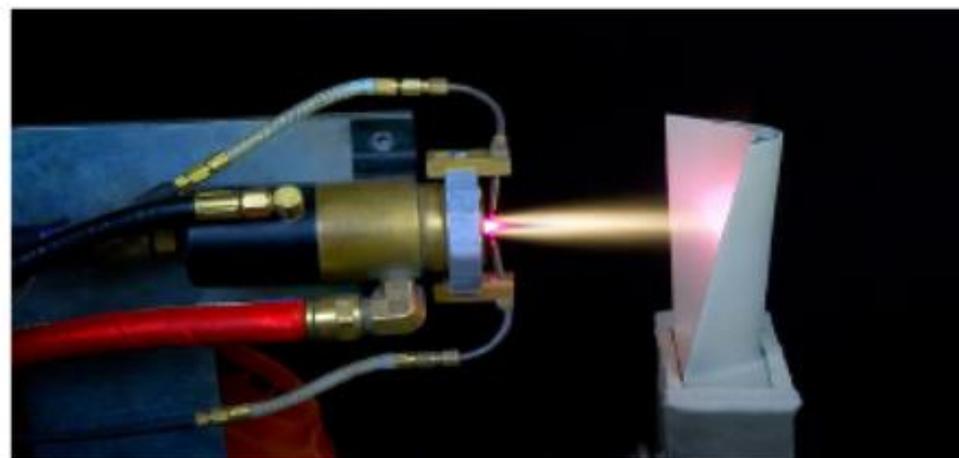
Processos de deposição

❖ Aspersão térmica

- ❖ Espessos
- ❖ Porosos
- ❖ Heterogêneos
- ❖ Alta temperatura
- ❖ Linha de visão
- ❖ Precursor sólido



<https://www.imrtest.com/tests/thermal-spray-coating-analysis>



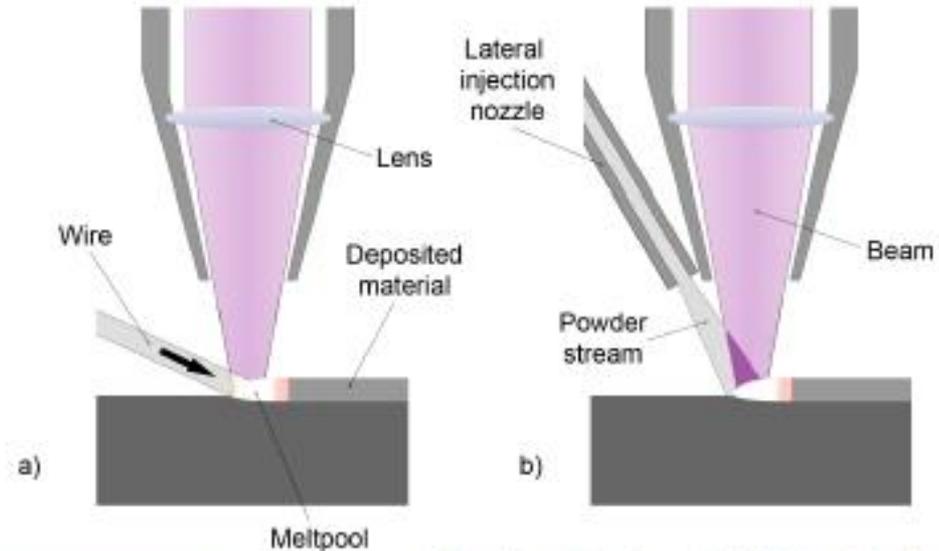
<https://www.vividinc.com/thermal-coatings-1>



Processos de deposição

❖ Laser

- ❖ Espessos
- ❖ Densos
- ❖ Linha de visão
- ❖ Precursor sólido ou líquido



[https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding_\(metalworking\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding_(metalworking))



<http://www.castolin-eutectic-oiltec.com/services/laser-cladding-services>



<http://www.ogj.com/articles/print/volume-105/issue-34/drilling-production/special-report-lasers-used-to-clad-strengthen-nonmagnetic-steel-equipment.html>

Fim da aula