ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Estrutura e Processamento dos Materiais Metálicos

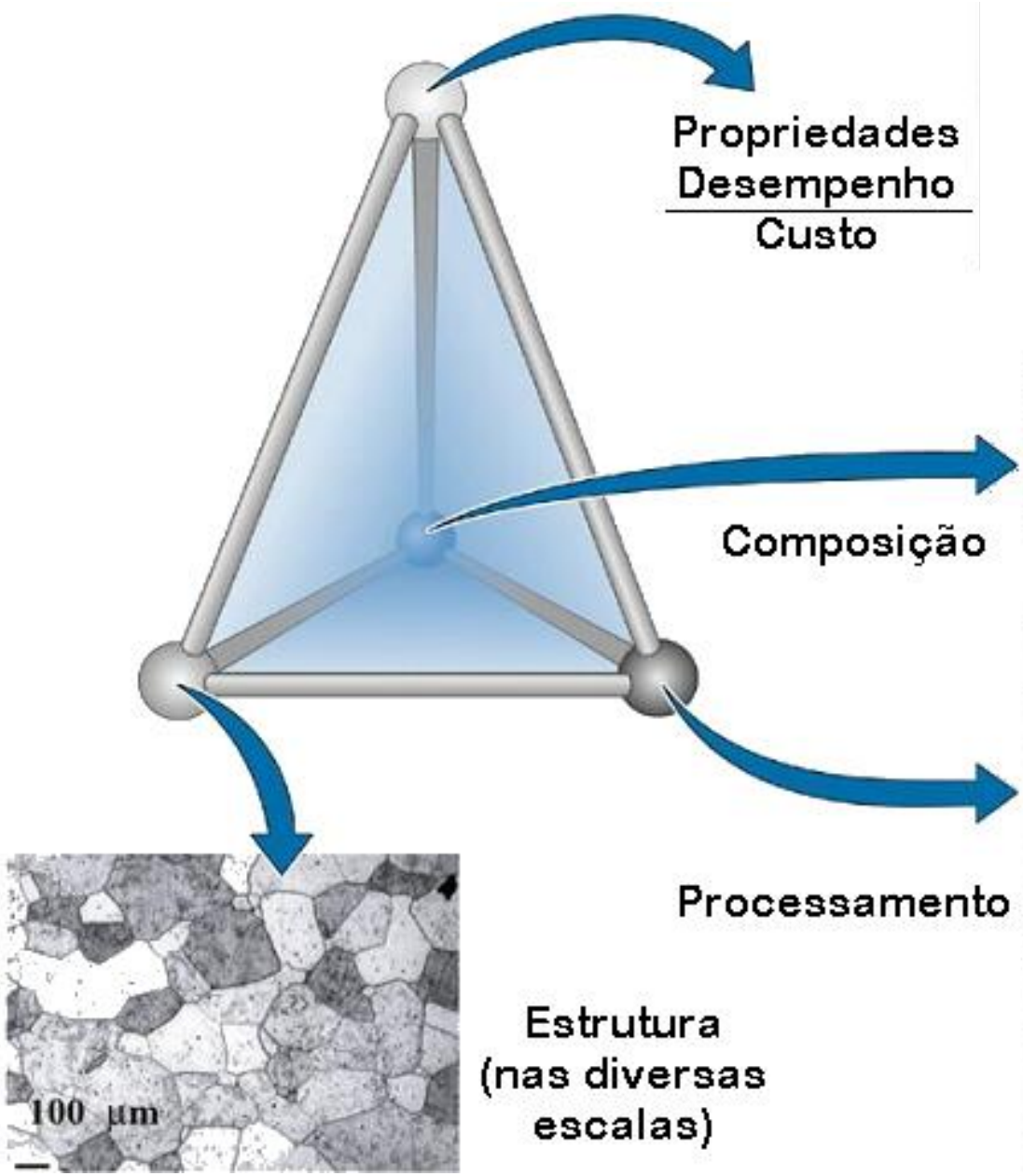
PMT 3100 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia

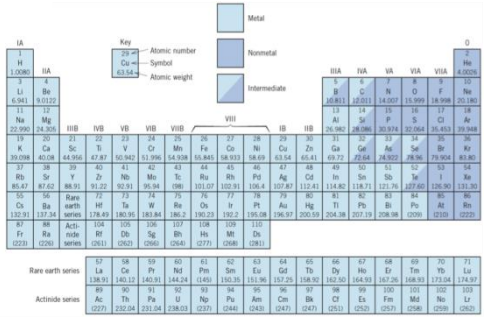
2º semestre de 2014

Estrutura e Processamento dos Materiais Metálicos

ROTEIRO

- Estrutura dos materiais metálicos
- Propriedades dos materiais metálicos
- Relação microestrutura-propriedades
- Processamento para obtenção de microestruturas
- Fundição
- Laminação
- Extrusão
- Trefilação
- Forjamento e estampagem
- Metalurgia do pó
- Tratamentos térmicos e termo-mecânicos
- Resumo


Propriedades
Desempenho
Custo
Composição
Processamento
Estrutura
(nas diversas
escalas)
100 µm


Metal
Nonmetal
Intermediate
Key
Atomic number
Symbol
Atomic weight
Rare earth series
Actinide series

Estrutura dos materiais metálicos

- A estrutura dos materiais metálicos pode ser descrita em termos de:
  - Origem da estrutura (forma de obtenção do material)
  - Tamanho médio de grão
  - Morfologia do grãos
  - Presença e distribuição de fases
  - Presença ou não de deformação plástica

Propriedades dos materiais metálicos

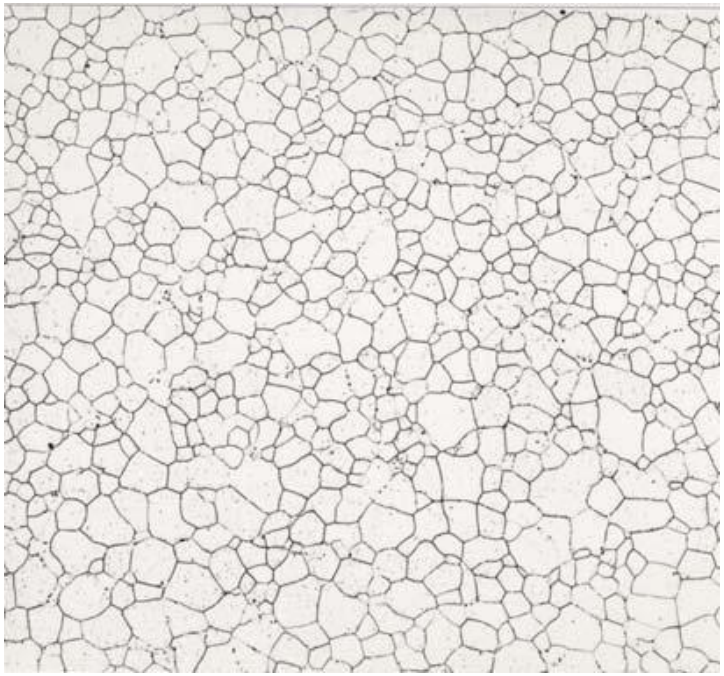
- ✓ Resistência mecânica de moderada a alta, variando ao longo de uma larga faixa.
- ✓ Plasticidade moderada.
- ✓ Alta tenacidade (capacidade de armazenar energia antes que ocorra a ruptura do material)
- ✓ Densos (Mg=1,74 g/cm3; U=18,95 g/cm3).
- ✓ Opacos, brilhantes e lustrosos.
- ✓ Bons condutores elétricos e térmicos.

Relação microestrutura-propriedades

A MICROESTRUTURA DOS MATERIAIS METÁLICOS CONTRIBUI DIRETAMENTE PARA PROPRIEDADES MECÂNICAS, ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Tamanho de grão

- Quanto menor o tamanho de grão, maior tende a ser a resistência mecânica para um mesmo material.
- Existe uma relação matemática entre o tamanho de grão (*d*) e a resistência mecânica (σy) (relação de Hall-Petch)



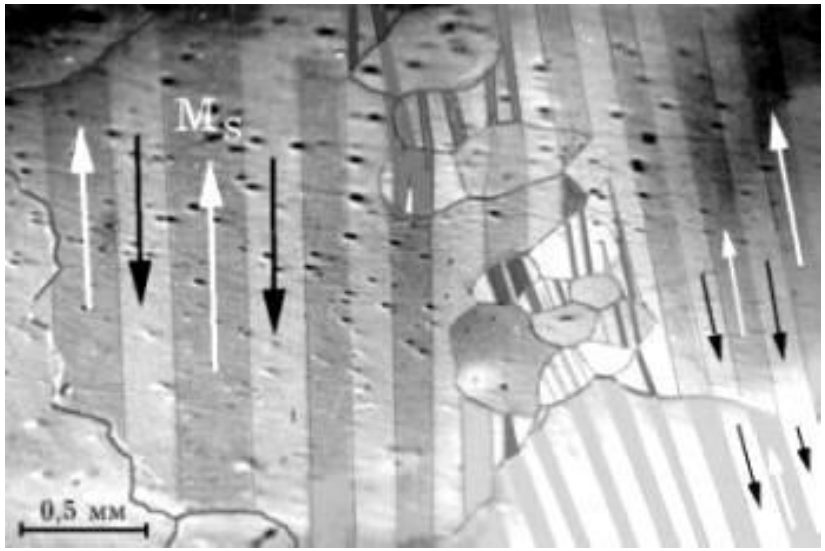
$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

<u>$\sigma 0$ e *ky* são constantes</u>

Tamanho de grão

A redução do tamanho de grão causa piora das propriedades elétricas e magnéticas

- A magnetização do material se dá pela movimentação de domínios magnéticos, e estes tem sua movimentação prejudicada pelos contornos de grão
- A presença de contornos de grão causa espalhamento dos elétrons durante a condução, causando perdas dielétricas.

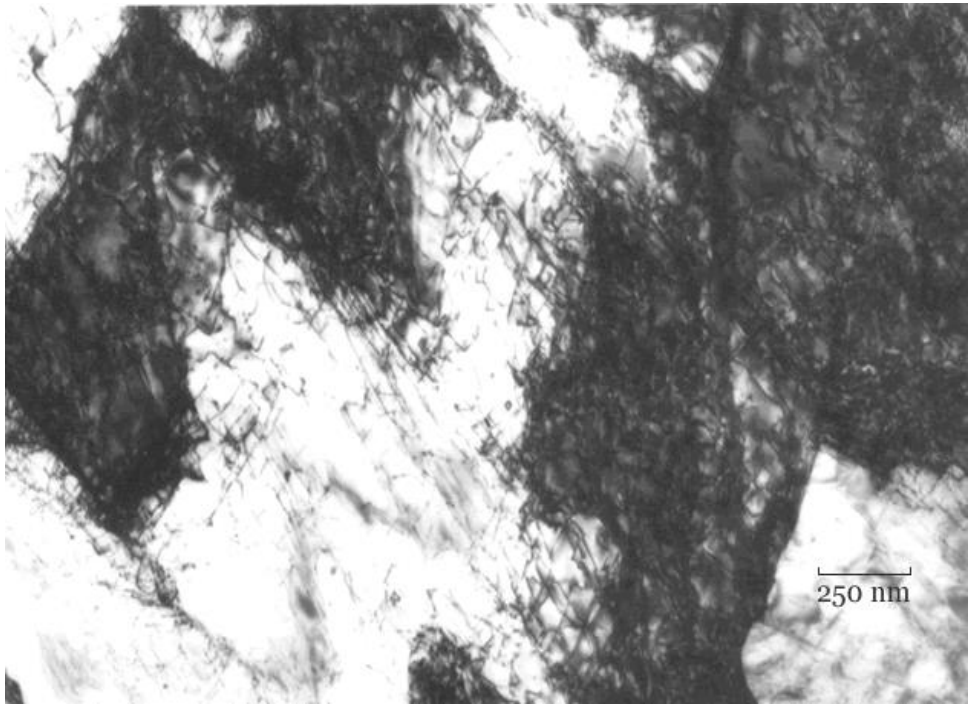


Deformação plástica

- A deformação plástica ocorre por movimentação das linhas de discordância, e também causa multiplicação de discordâncias.
- À medida em que o material é deformado plasticamente, a movimentação de discordâncias fica mais difícil.
- Essa maior dificuldade faz com que o material fique progressivamente mais duro à medida que é deformado (encruamento).
- Esse endurecimento pode ser revertido por tratamento em altas temperaturas (recozimento).
- O excesso de discordâncias também causa espalhamento dos elétrons, diminuindo a condutividade elétrica do material.
  - Cobre: queda de 3% de condutividade elétrica após 97% de deformação plástica.

Deformação plástica

Recozido



44% de deformação

Quantidade e distribuição de fases

- A presença de outras fases também influi as propriedades mecânicas, elétricas e magnéticas.
  - Presença de uma fase não magnética em um material magnético;
  - Presença de uma fase condutora ou isolante;
    - Dispersão de partículas de carbono pode aumentar a condutividade elétrica
  - Presença de uma fase mais dura ou mais mole
    - Contínua
    - Dispersa
  - Presença de uma segunda fase muito fina
  - Fases de não-equilíbrio (aços temperados)
  - Presença de poros

Quantidade e distribuição de fases

- ✓ Fase mais dura que a matriz:
  - ➢ Cementita (carbeto de ferro – Fe3C) no aço.
    - Perlita fina – Estrutura lamelar fina – pode ser submetida a maiores deformações plásticas.
    - Perlita grossa – estrutura lamelar grossa.
    - Cementita esferoidizada – as propriedades mecânicas do aço aproximam-se das da ferrita.
    - Cementita no contorno de grão – fragiliza demasiadamente o material.
- ✓ Fase mais mole que a matriz
  - ➢ Chumbo em ligas de cobre.

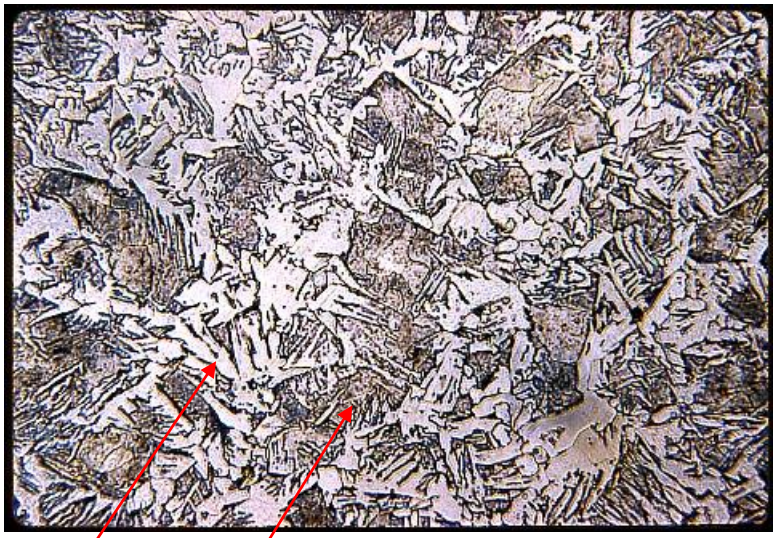
Quantidade e distribuição de fases

- Princípio da fase contínua:

  A fase contínua dita o comportamento mecânico do material.

  - Uma fase mole no contorno de grão causa queda na resistência à deformação plástica
  - Uma fase dura formada nos contornos de grão deixa o material mais frágil
  - Uma fase dispersa pode não causar uma grande diferença de propriedades mecânicas

Aço perlítico com ferrita nos contornos de grão



α perlita

http://www.georgesbasement.com/

Quantidade e distribuição de fases

- Princípio da fase contínua:

  A fase contínua dita o comportamento mecânico do material.

  - Uma fase mole no contorno de grão causa queda na resistência à deformação plástica.
  - Uma fase dura formada nos contornos de grão deixa o material mais frágil.
  - Uma fase dispersa pode não causar uma grande diferença de propriedades mecânicas.

Aço perlítico com cementita nos contornos de grão.

Perlita

Cementita proeutetoide

http://courses.washington.edu/mse170/labs/HeatTreatment/micrographs/

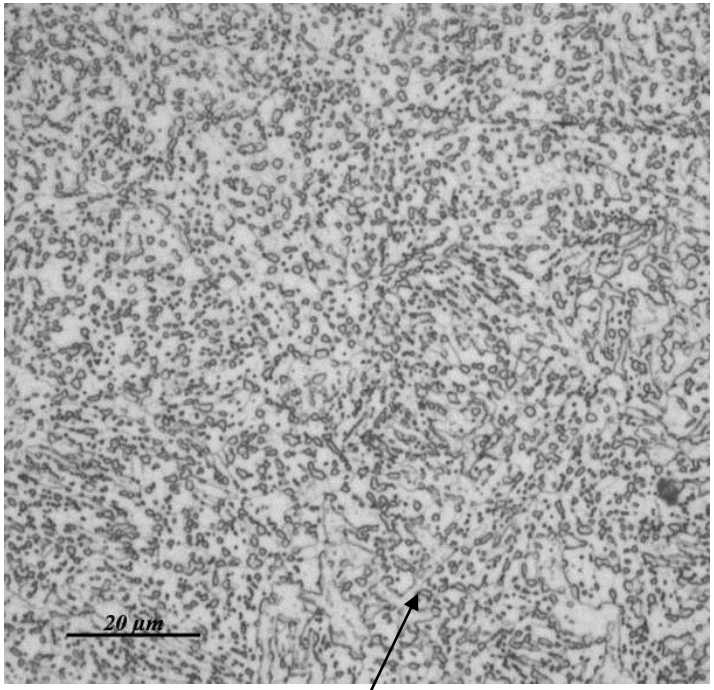
Quantidade e distribuição de fases

- Princípio da fase contínua:

  A fase contínua dita o comportamento mecânico do material

  - Uma fase mole no contorno de grão causa queda na resistência à deformação plástica.
  - Uma fase dura formada nos contornos de grão deixa o material mais frágil.
  - Uma fase dispersa pode não causar uma grande diferença de propriedades mecânicas.

Aço alto carbono com cementita globular



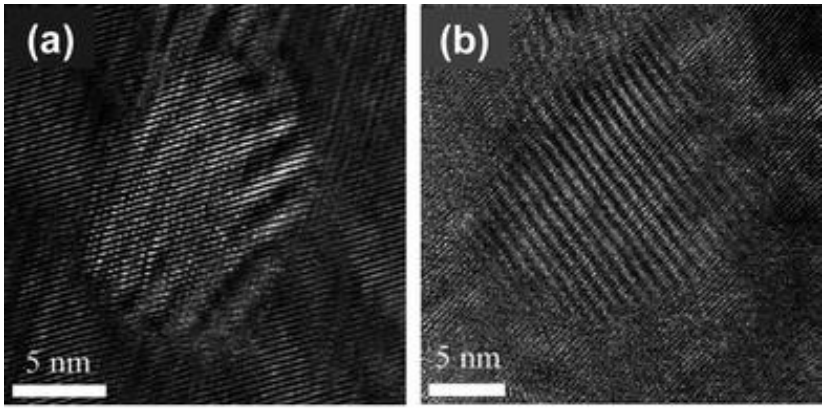
cementita

Quantidade e distribuição de fases

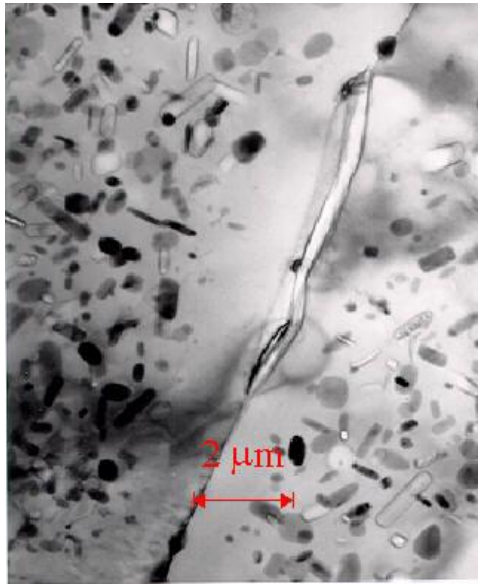
- ✓ Partículas finas de uma segunda fase.

  Endurecimento por precipitação:

  - As partículas têm dimensões reduzidas
  - Existe uma certa continuidade na rede cristalina entre a matriz e a partícula
  - A partir de uma certa dimensão, perde eficiência para endurecer o material



http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/jm/c0jm02755c



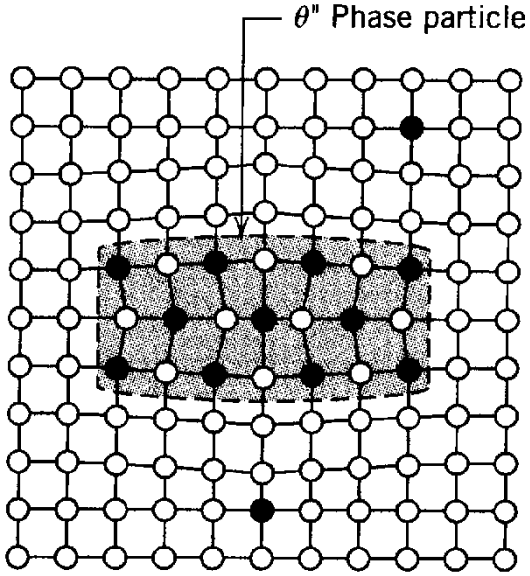
http://www.ndt.net/article/aero1197/forsyth/forsyth.htm

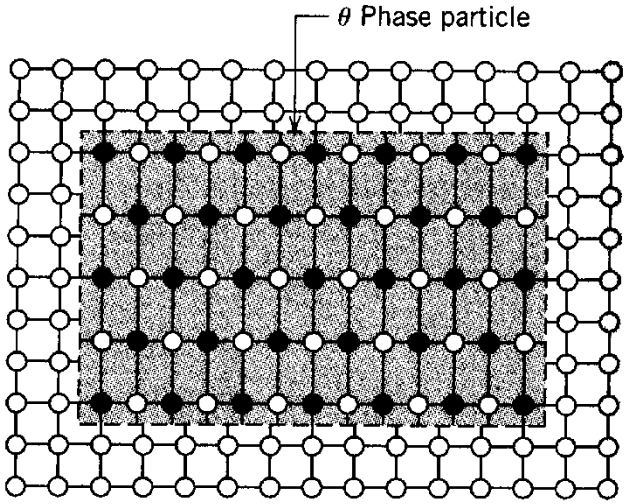
Quantidade e distribuição de fases

- ✓ Partículas finas de uma segunda fase.

  Endurecimento por precipitação:

  - ➢ As partículas têm dimensões reduzidas
  - ➢ Existe uma certa continuidade na rede cristalina entre a matriz e a partícula – há uma distorção da rede cristalina
  - ➢ A partir de uma certa dimensão, perde eficiência para endurecer o material





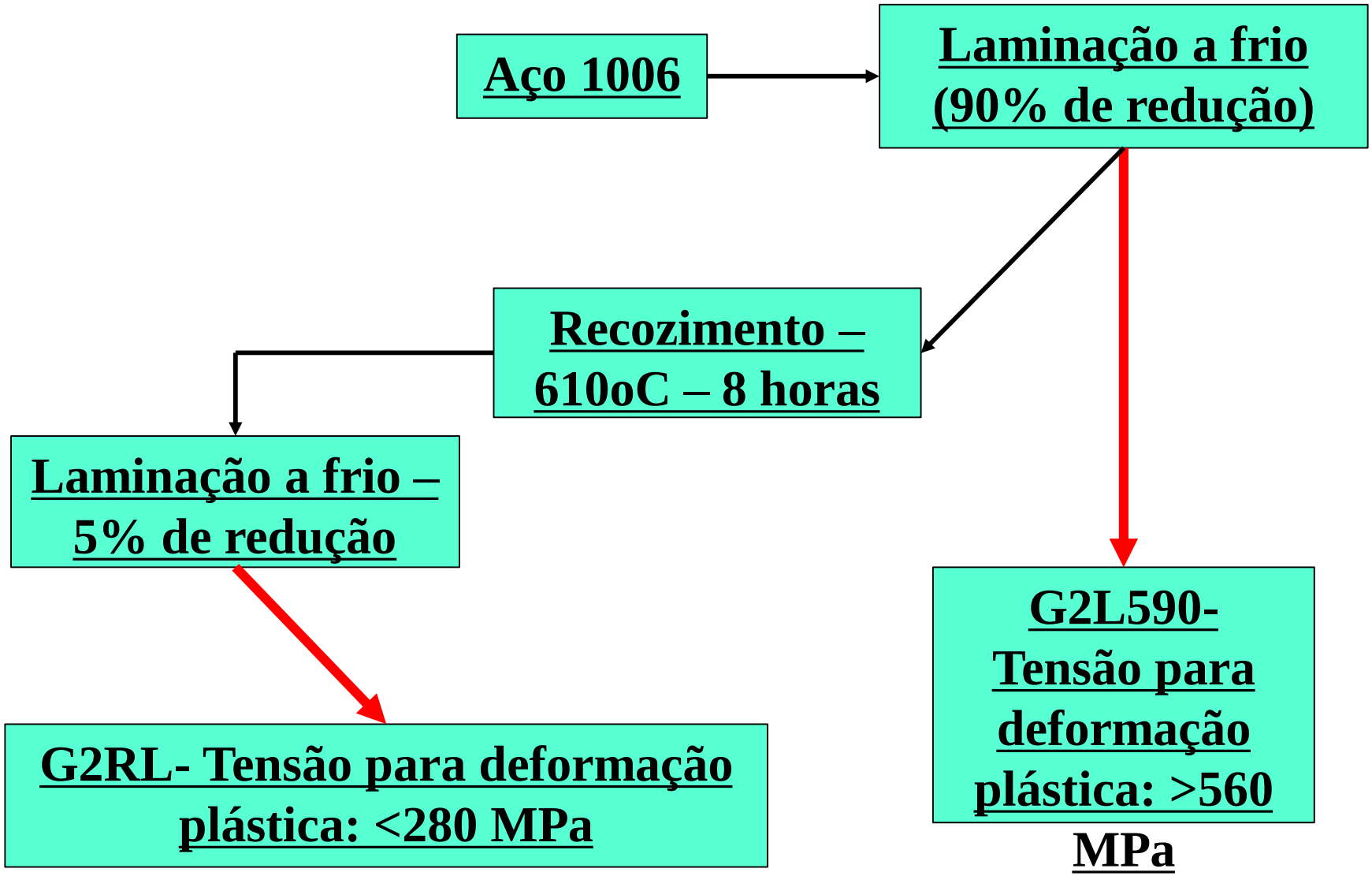
Processamento para obtenção de microestruturas (propriedades)

- ✓ Métodos de obtenção
  - ➢ Conformação no estado líquido (fundição)
  - ➢ Conformação mecânica
  - ➢ Metalurgia do pó
  - ➢ Combinações de métodos
- ✓ Tratamentos térmicos
- ✓ Tratamentos termoquímicos
- ✓ Tratamentos termomecânicos

Processamento para obtenção de microestruturas (propriedades)

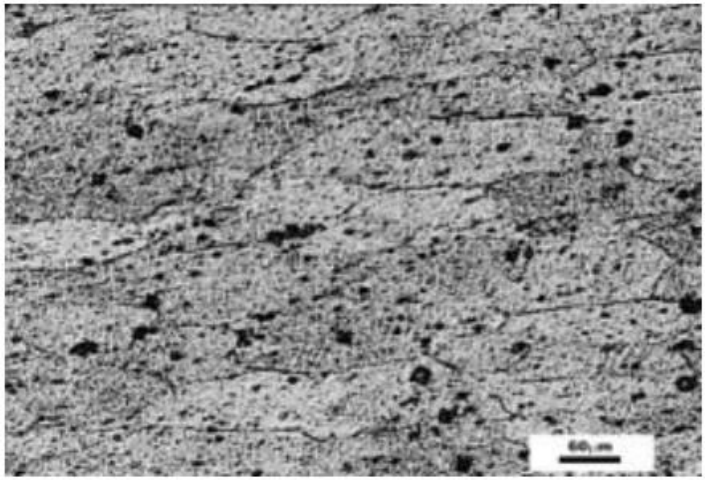
- Seqüência de conformação mecânica
  - Quantidade de deformação em cada estágio
    - Aço baixo carbono NBR G2L590
    - Obtido por laminação a frio com grande redução (~90%)
  - Tratamentos térmicos intermediários
    - Aço baixo carbono NBR G2RL
    - Obtido por laminação a frio com grande redução (70-90%), seguido de tratamento a 600° C por 8 horas e nova laminação de baixa redução (~5%)
  - Ambos os aços partem da mesma matéria-prima base

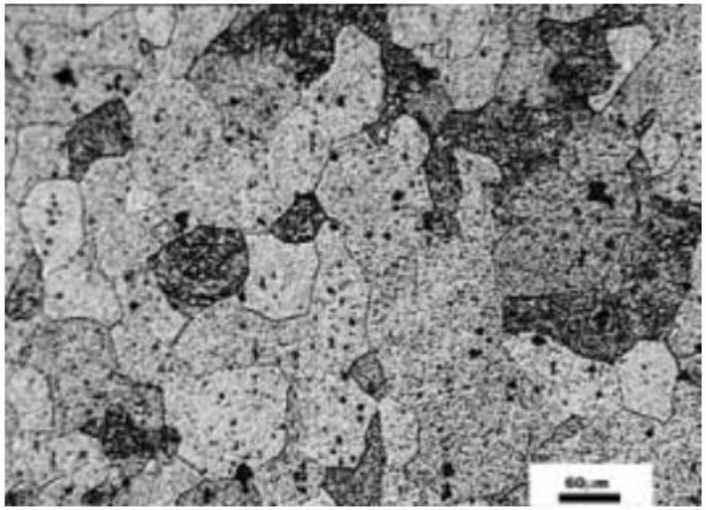
Processamento para obtenção de microestruturas



Processamento para obtenção de microestruturas

- Tratamento térmico
  - Chapa de alumínio laminada a frio a 70% de redução
    - Grãos alongados
    - Intensa deformação plástica
    - Alta dureza
  - Aquecimento a 460oC por tempos determinados
    - Formação de uma nova estrutura de grãos equiaxiais (recristalização)
    - Diminuição da dureza do material





Iara Maria Espósito – Mestrado, 2006

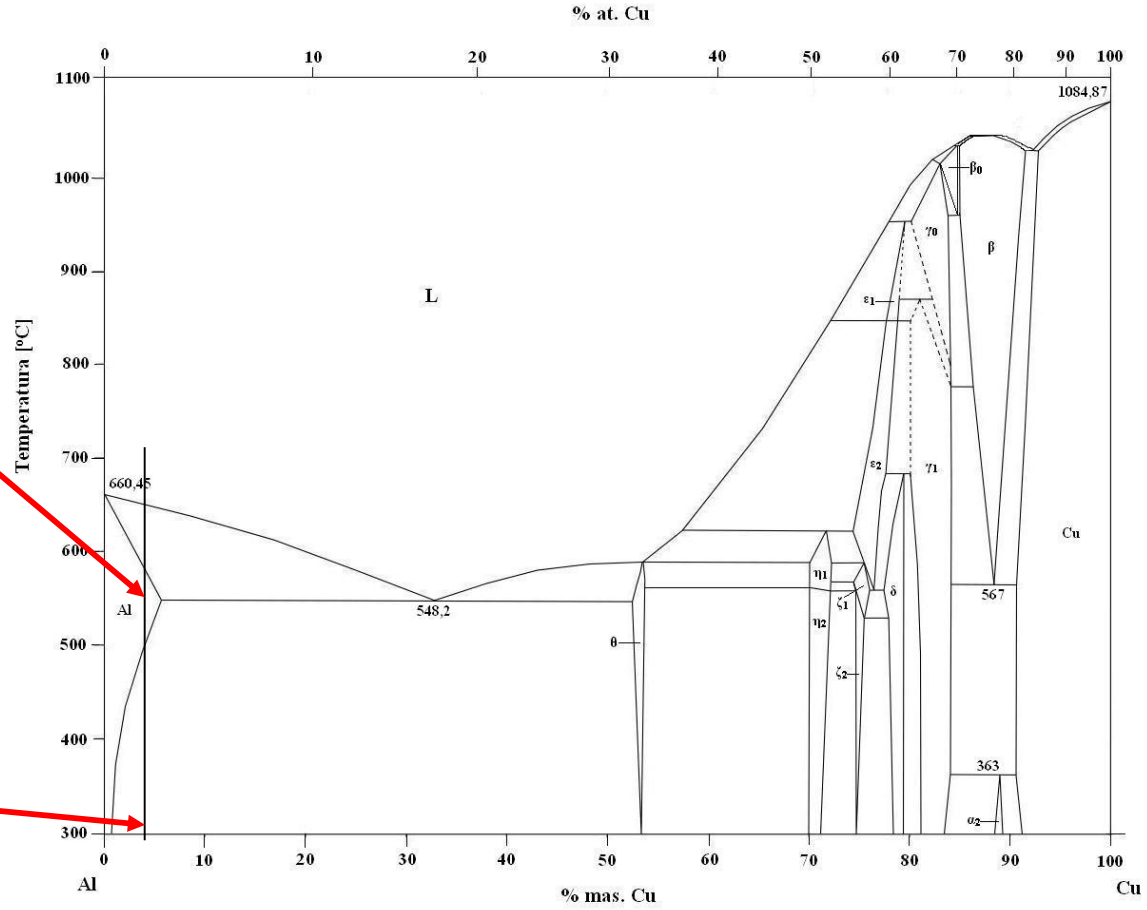
Processamento para obtenção de microestruturas

- Liga Al-4%Cu

Tratamento a 550oC (campo de uma fase)

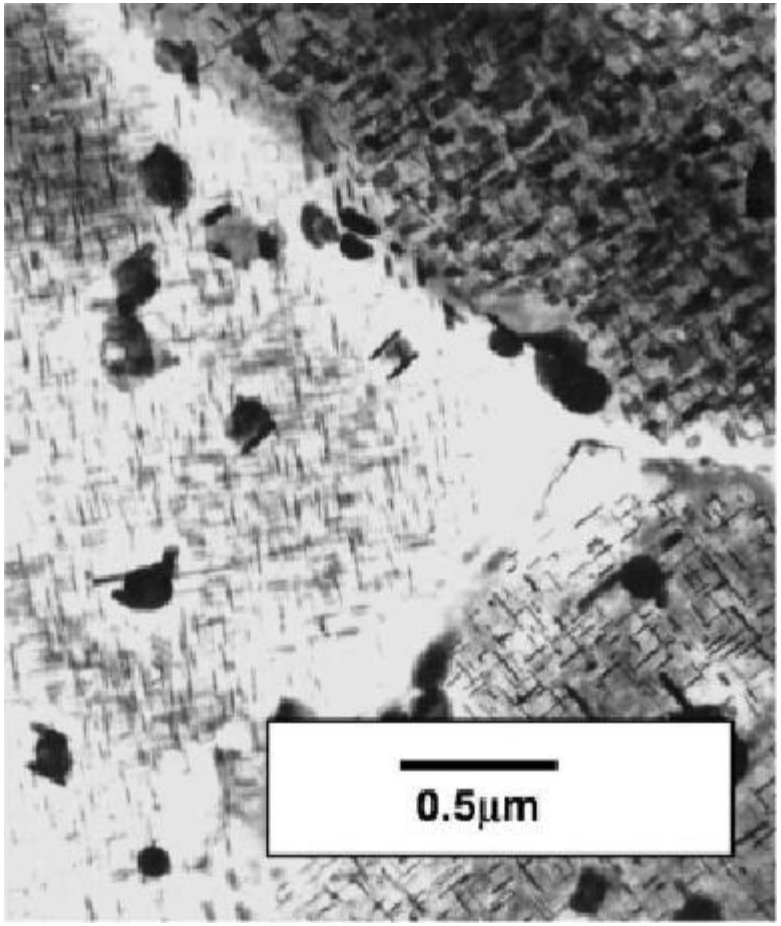
Resfriamento rápido à temperatura ambiente

Novo tratamento em temperatura da ordem de 250-300° C



Processamento para obtenção de microestruturas

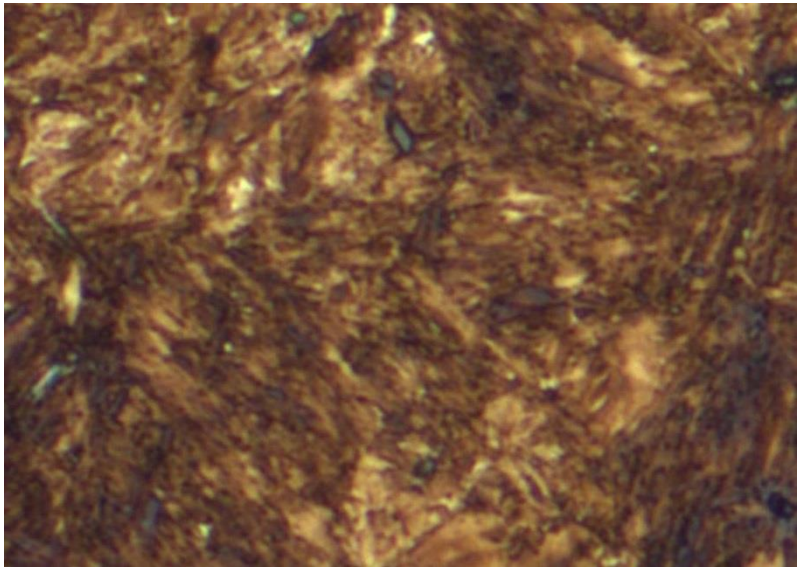
- Estrutura resultante:
  - Precipitados coerentes (bom ajuste de rede cristalina) dispersos na matriz
- Propriedade resultante:
  - Alta resistência mecânica



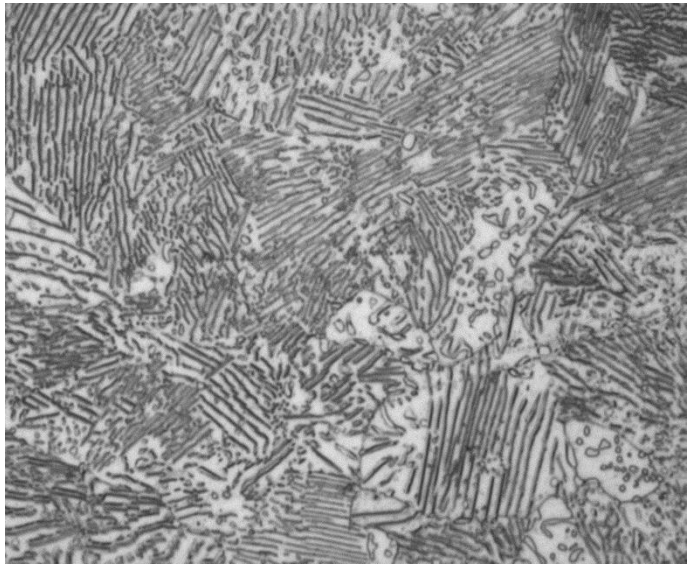
Processamento para obtenção de microestruturas

Tratamento térmico

- Chapa de aço alto carbono com 2 mm de espessura
  - Aquecida a 1100° C e resfriado em água
  - Resultado: material muito frágil, que ***se quebra*** com uma martelada

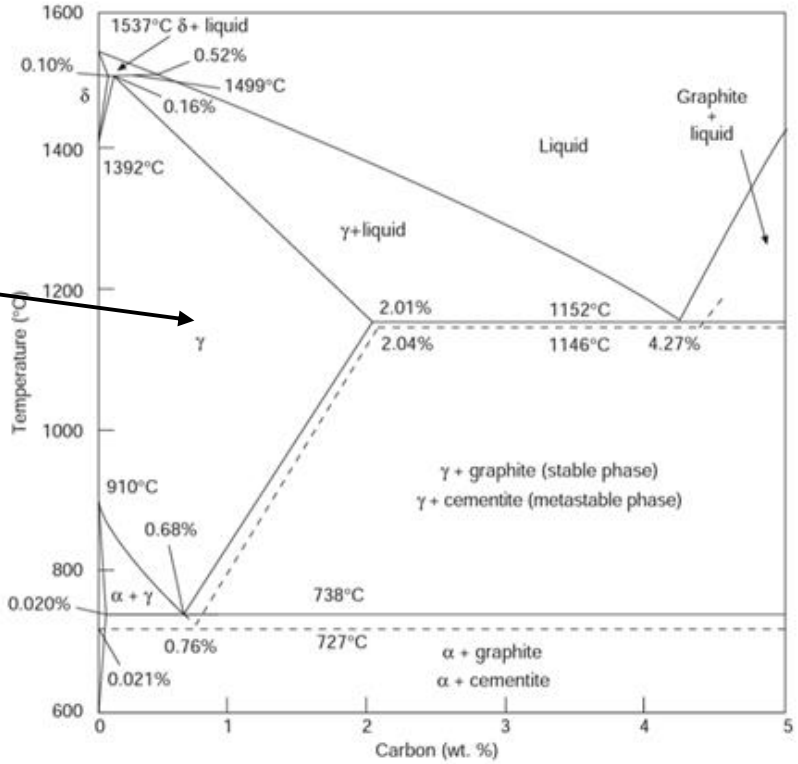


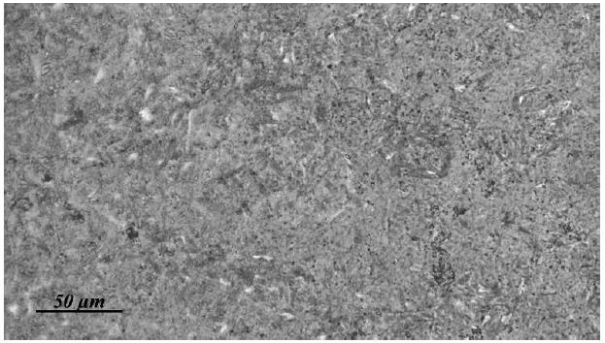
  - Aquecida a 1100° C e resfriada ao ar
  - Resultado: material mais tenaz, que ***se amassa*** com uma martelada



Processamento para obtenção de microestruturas

- Tratamento térmico
  - Peças em aço conformadas por forjamento
  - Aquecimento em temperaturas no campo austenítico
  - Resfriamento rápido (Têmpera – imersão em água, óleo, polímero, jato de gás, etc)
  - Material resultante extremamente duro e frágil
  - Novo aquecimento a temperaturas amenas (250-600° C dependendo do aço)
  - Resfriamento ao ar
  - Resultado: material de alta dureza e alta tenacidade





Processamento para obtenção de microestruturas

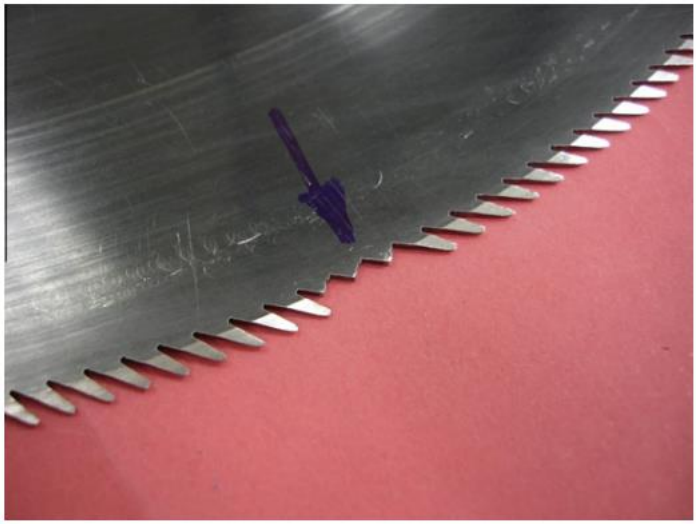
- Cementação (tratamento termoquímico)
  - Engrenagem feita em aço com baixo teor de carbono
  - Tratamento em alta temperatura (~900oC) em meio rico em carbono
  - Penetração superficial de carbono no aço, transformando-o localmente em aço alto carbono
  - Têmpera
  - Revenido
  - Resultado: engrenagem com camada superficial dura e núcleo mole.

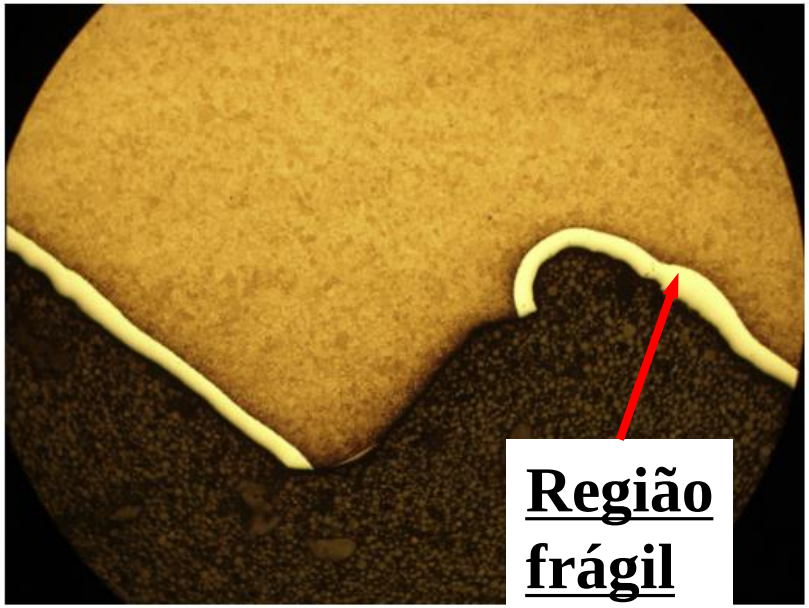
Alteração de microestrutura pelo uso

Ocasionalmente, o uso inadequado ou mesmo o uso normal podem causar alterações microestruturais que alteram as propriedades e causam falhas

Alteração de microestrutura pelo uso inadequado

- Descaroçadeira de algodão
- A serra é cortada a partir de uma chapa de aço temperado
- Processo de corte da serra feito de maneira inadequada
- Alteração da microestrutura na região do corte, criando uma área muito frágil (têmpera sem revenimento)
- Resultado: dentes quebrados durante o uso



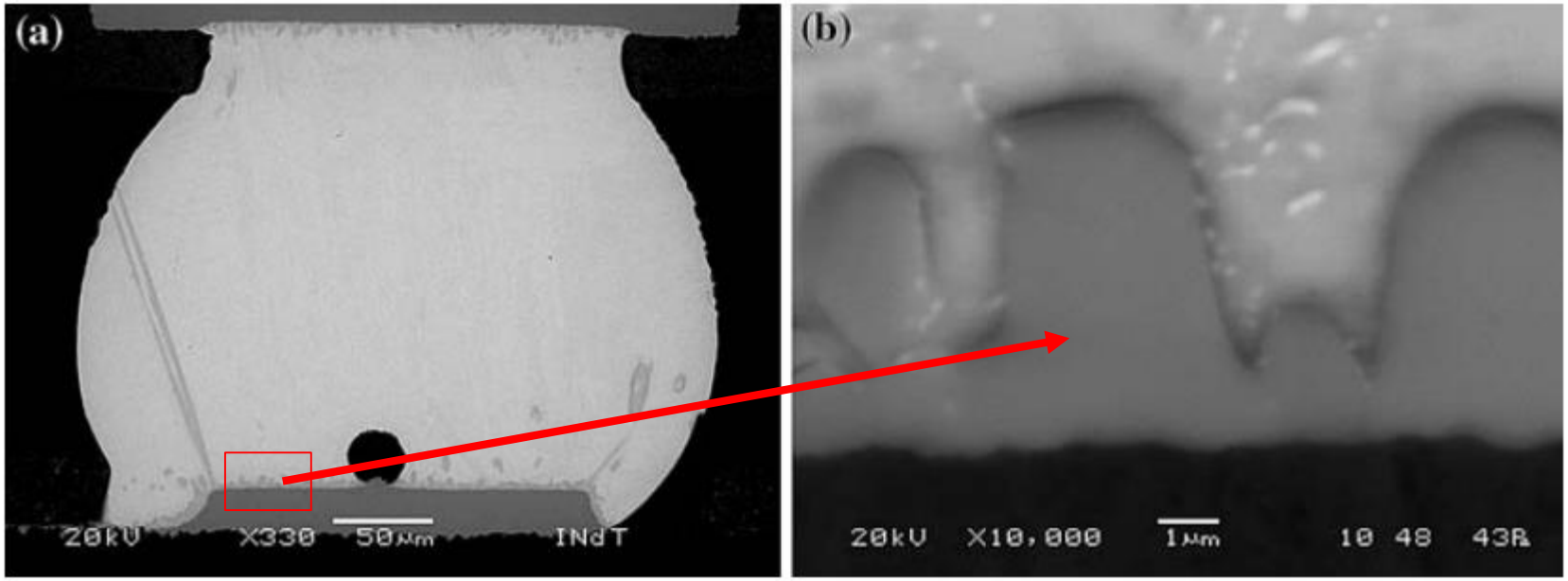


Alteração de microestrutura pelo uso normal

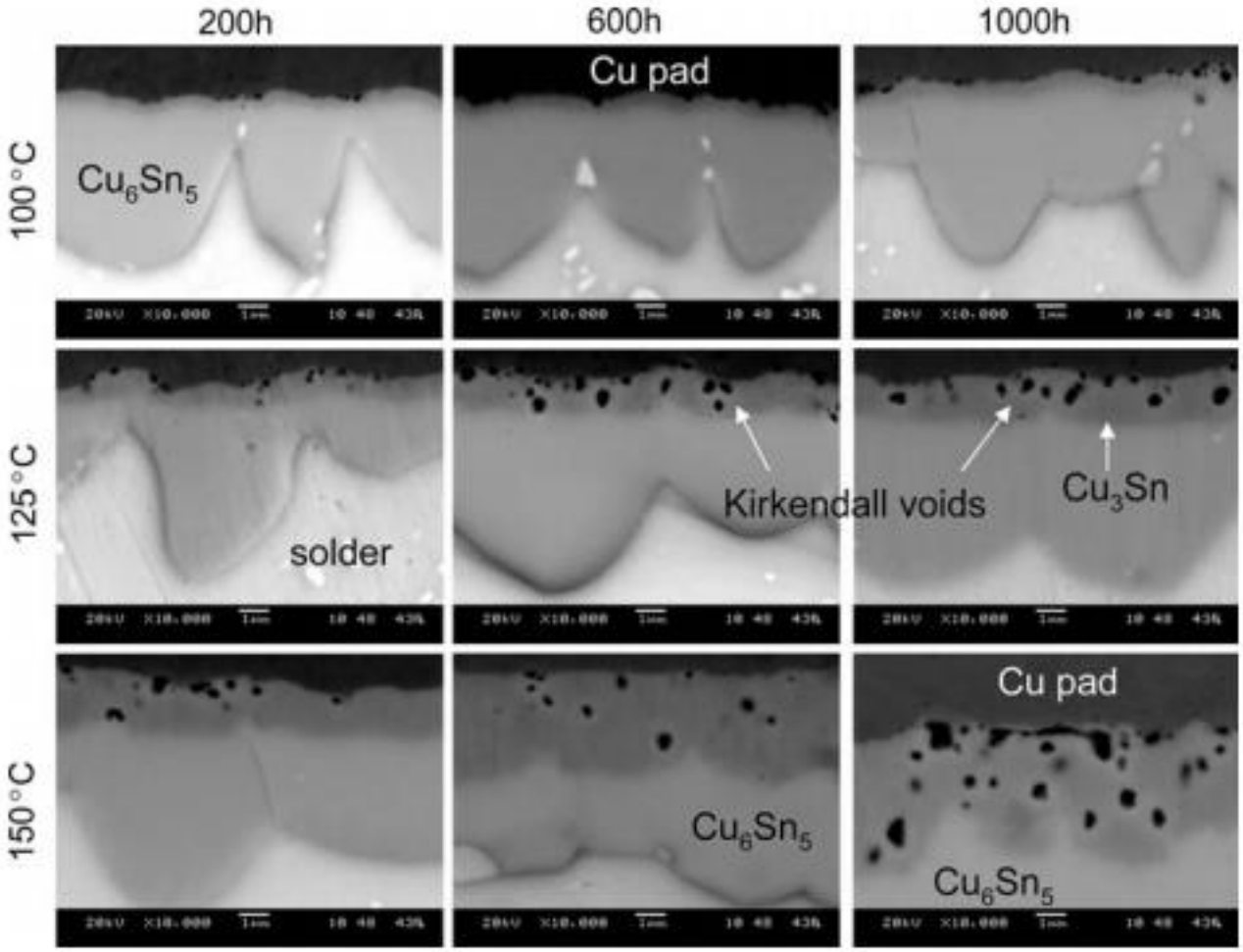
- Soldas de circuitos eletrônicos
- Na fronteira entre o terminal de cobre e a solda de estanho, formam-se camadas de duas fases: Cu_6Sn_5 e Cu_3Sn
- Essas fases são frágeis e, acima de uma certa espessura, podem facilitar o rompimento da solda
- Durante o uso normal, o aquecimento do material causa aumento dessas camadas, por difusão de cobre e estanho

Alteração de microestrutura pelo uso normal

- Após um certo tempo, com a camada muito grossa, a resistência do dispositivo eletrônico a impactos cai sensivelmente



Alteração de microestrutura pelo uso normal



Fundição

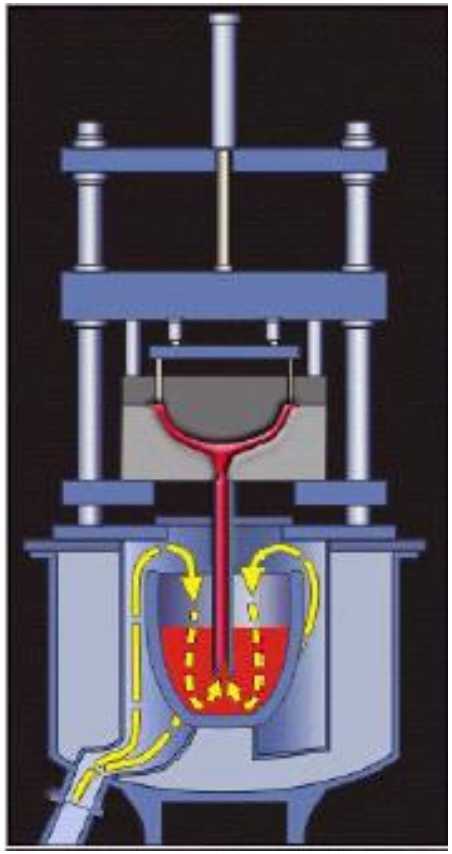
- Material é aquecido acima de sua temperatura de fusão e vazado em um molde
- Estrutura resultante, em geral, pode apresentar grandes heterogeneidades de composição química
- Estrutura resultante pode ser de grãos grandes
- Em virtude das heterogeneidades químicas, as propriedades mecânicas podem ser prejudicadas
- Pode ser de peças em moldes, contínua ou semi-contínua

Fundição de peças

- Moldes de areia
  - Um modelo da peça é envolvido em areia e esta é compactada
  - O metal fundido é vazado nesse molde
  - Processo artesanal
  - Detalhes ocos são obtidos por meio de machos
  - Torneiras, conexões de cobre e bronze

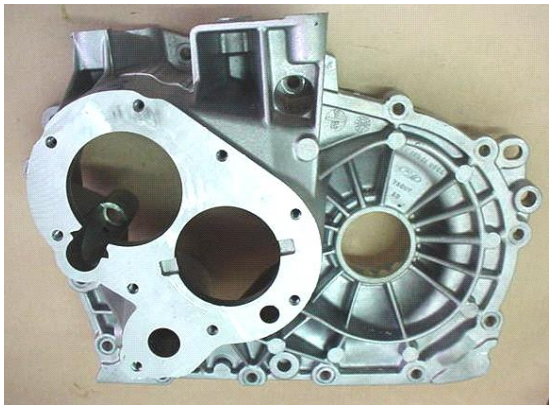
Fundição de peças

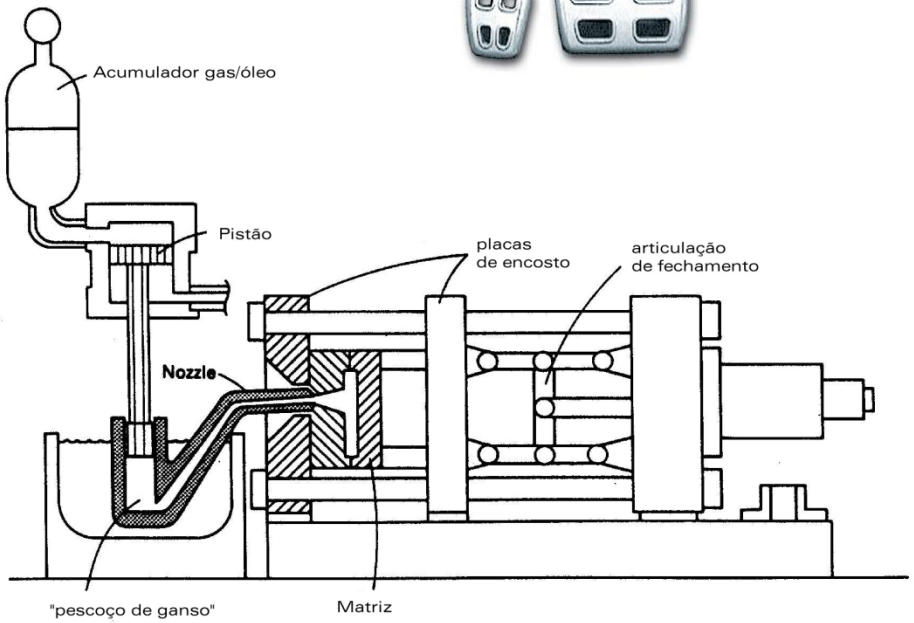
- Fundição sob pressão
  - O metal fundido é injetado dentro do molde sob baixa ou alta pressão, dependendo das necessidades
  - Moldes metálicos refrigerados



Fundição de peças

- Fundição sob pressão
  - O material injetado sob alta pressão preenche a cavidade do molde
  - Injeção sob alta pressão permite peças de paredes finas, com geometria complexa e com dimensões próximas às finais.





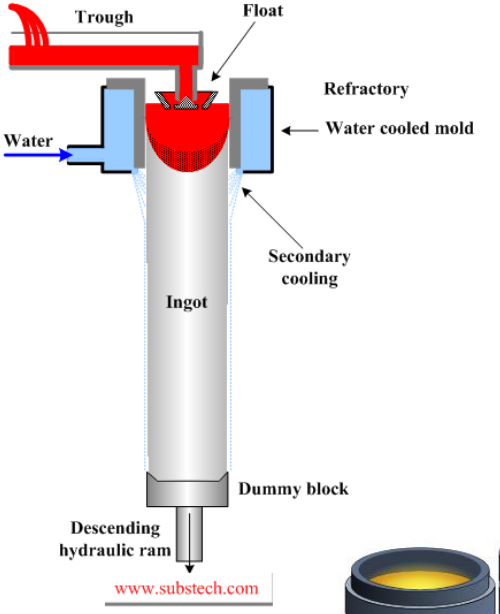
Esquema de uma máquina de injeção de alta pressão do tipo câmara quente

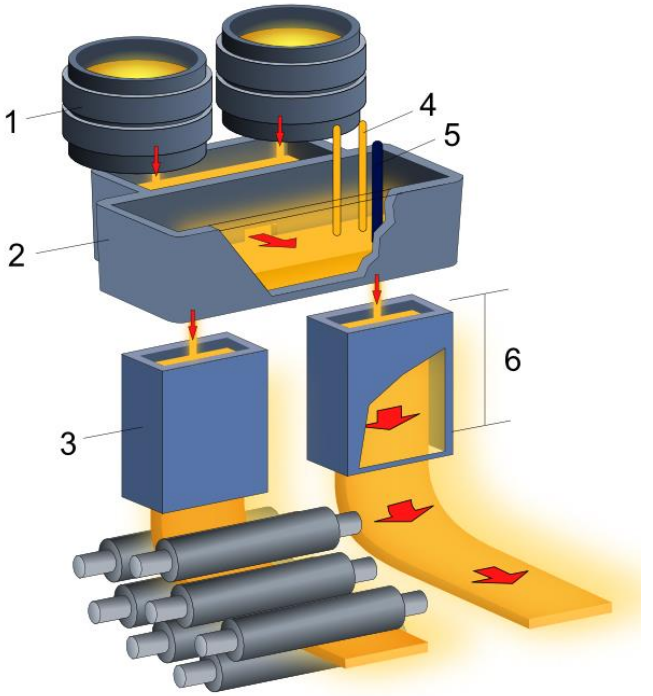
Fundição de peças

- Fundição a cera perdida
  - Um modelo de cera da peça é recoberto com o material do qual é feito o molde
  - A cera é derretida e extraída
  - Vaza-se o metal
  - Alta produtividade, podendo ser feitas várias peças em um único molde

Fundição contínua e semi-contínua

- O molde é vazado, e tem suas paredes resfriadas
- O material começa a solidificar dentro do molde, e é puxado por um sistema posicionado logo abaixo
- O resfriamento é auxiliado por um sistema secundário após a saída da região do molde
- Processo contínuo: alimentação contínua de metal fundido
- Processo semi-contínuo: processo para a cada lingote produzido



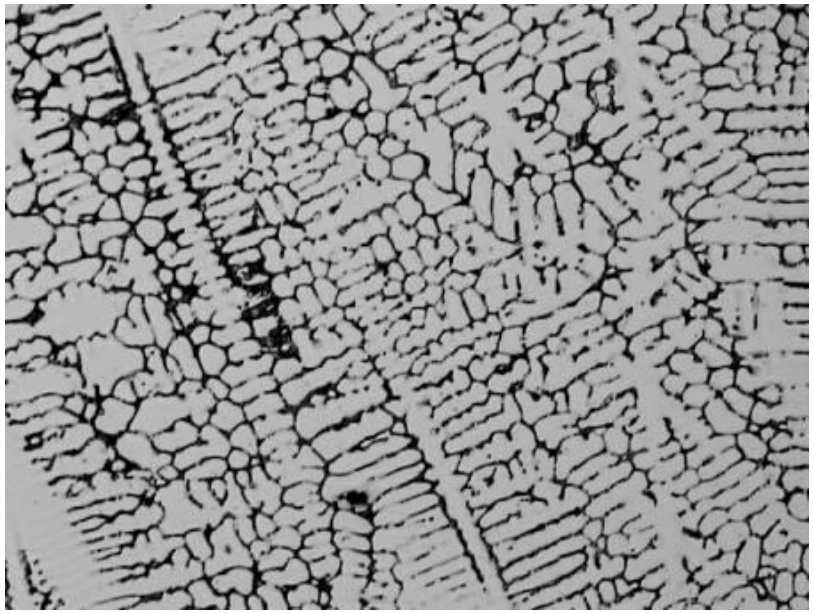


Fundição centrífuga

- Peças com simetria radial
- Tubos, cilindros
- O metal fundido é vazado em um molde giratório
- A rotação faz com o líquido migre para as paredes do molde

Fundição

- Estruturas brutas de fundição



http://www.sm2000.coppe.ufrj.br/mirror/sarra/artigos/artigo10110/index.html

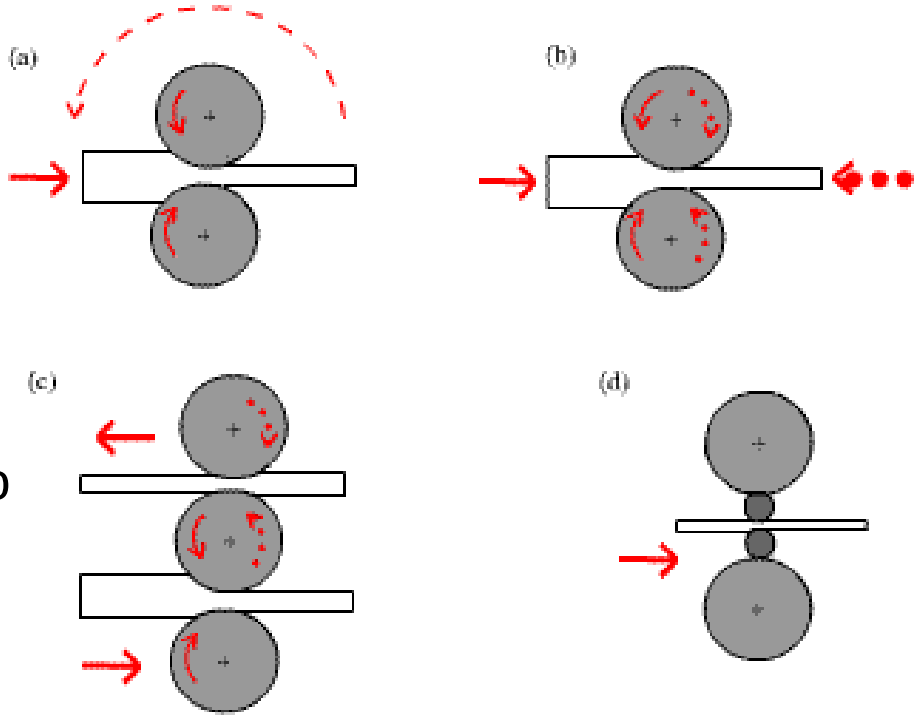
Tubo de cobre fundido continuament

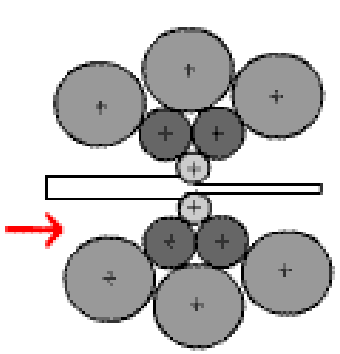
Laminação

- Passagem de um material entre dois cilindros
- Pode produzir materiais planos ou perfis
- Realizada em alta ou baixa temperatura
- Grandes reduções em poucos passes são normalmente feitas a quente
- Grandes reduções a frio requerem múltiplos passes

Laminação

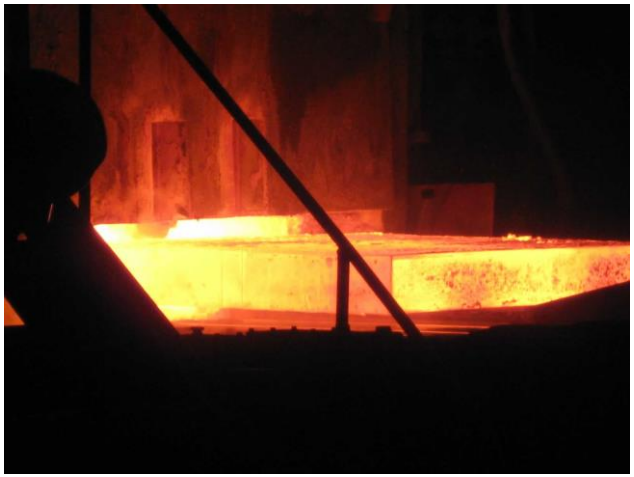
- Produtos planos
  - Tipos de laminador diferentes para cada requisito
  - Mudança de largura do material é muito menor do que a mudança de comprimento
  - Tiras, chapas
- Produtos longos
  - Perfis, vergalhões, barras





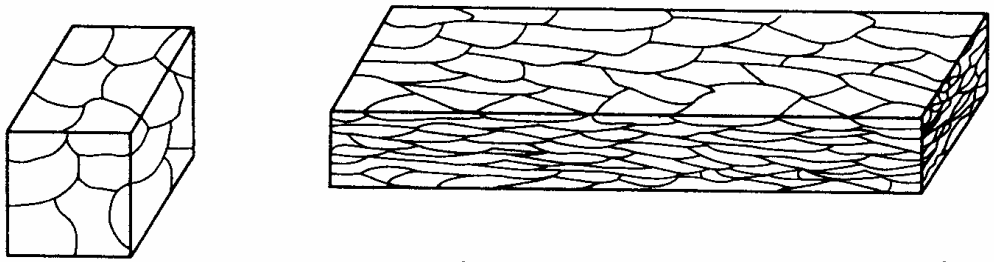
Laminação a quente

- Grandes reduções de espessura em poucos passes
- Baixa tolerância de espessura (0,1 mm)
- Aços: ~1200° C
- Estrutura do metal muito heterogênea entre pontas dos rolos (produtos planos)
  - Resfriamento na parte de fora do rolo é diferente da parte de dentro
- Os grãos do material final não são alongados

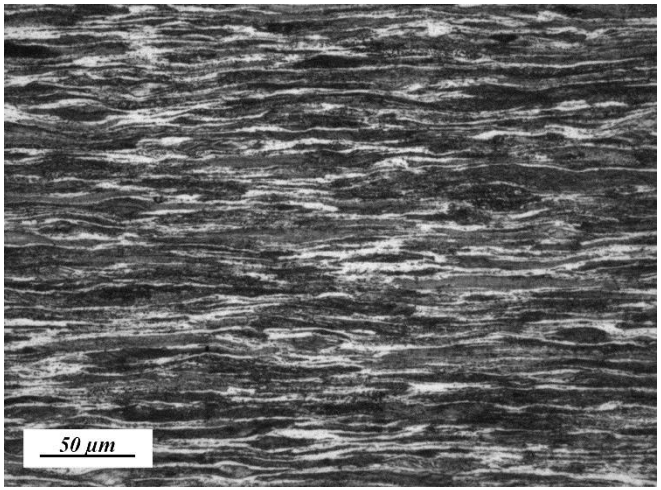


Laminação a frio

- Melhor controle de espessura
- A redução de espessura aplicada ao material pode ser controlada para obtenção de propriedades mecânicas
- Os grãos do material ficam alongados
- As propriedades mecânicas podem ficar anisotrópicas

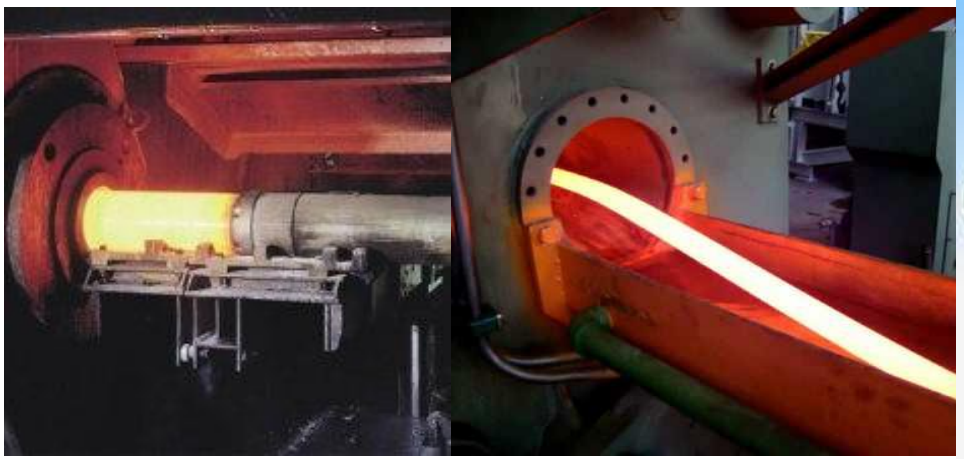


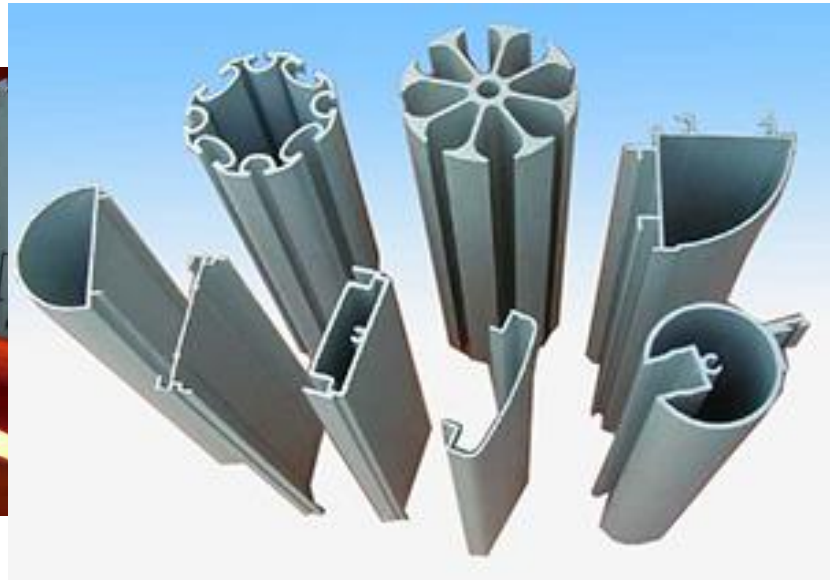
Metal monofásico antes a após deformação plástica



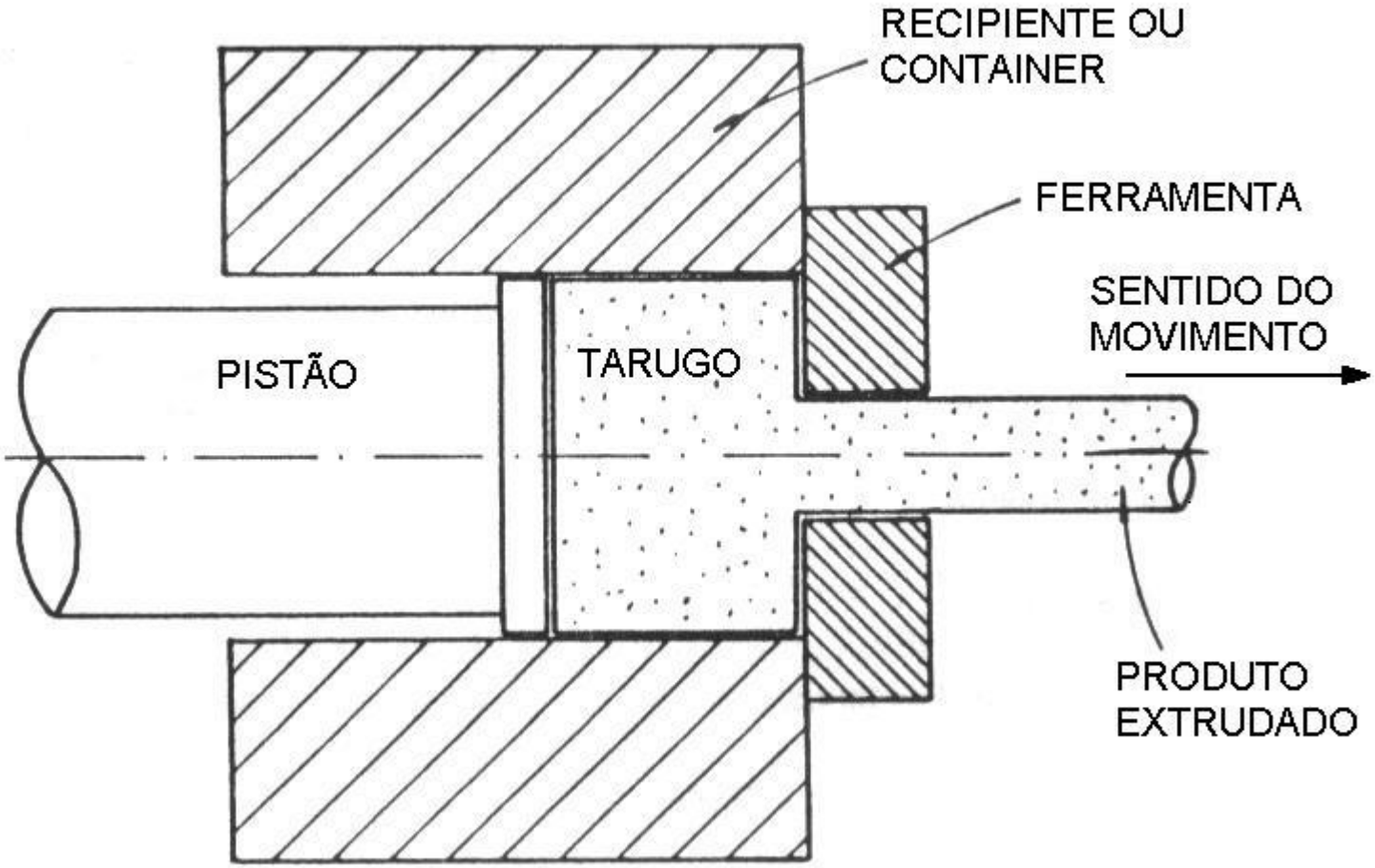
Extrusão

- O material na forma de um tarugo é empurrado através de uma matriz, resultando em um perfil longo
- Geometrias complexas
  - Barras de diversas geometrias, trilhos de cortina, semi-acabados para processamento posterior



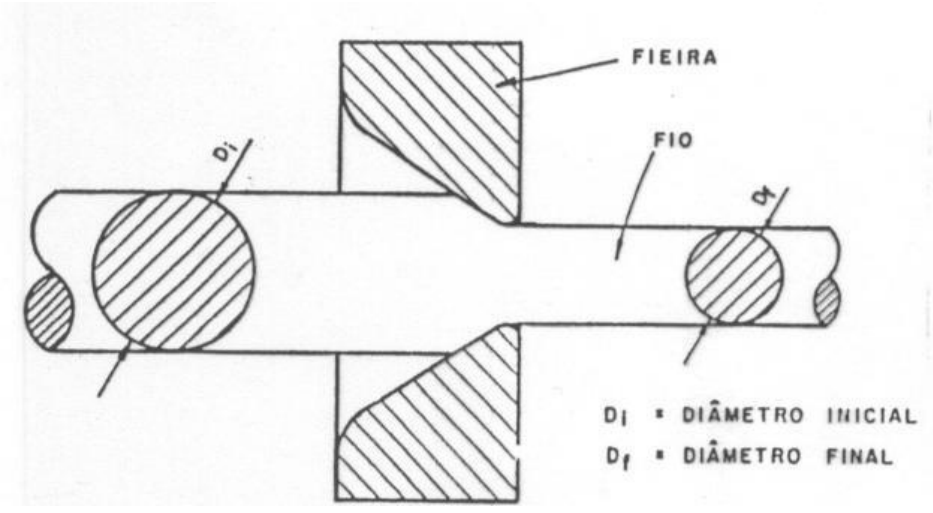


Extrusão


RECIPIENTE OU
CONTAINER
FERRAMENTA
SENTIDO DO
MOVIMENTO
PISTÃO
TARUGO
PRODUTO
EXTRUDADO

Trefilação

- Realizada há centenas (talvez milhares de anos)
- O material é puxado através de uma fieira, resultando em um arame, fio ou tubo
- Geometrias simples
- Altas velocidades de processo



Trefilação

- Para trefilação de tubos, pode-se usar um mandril internamente

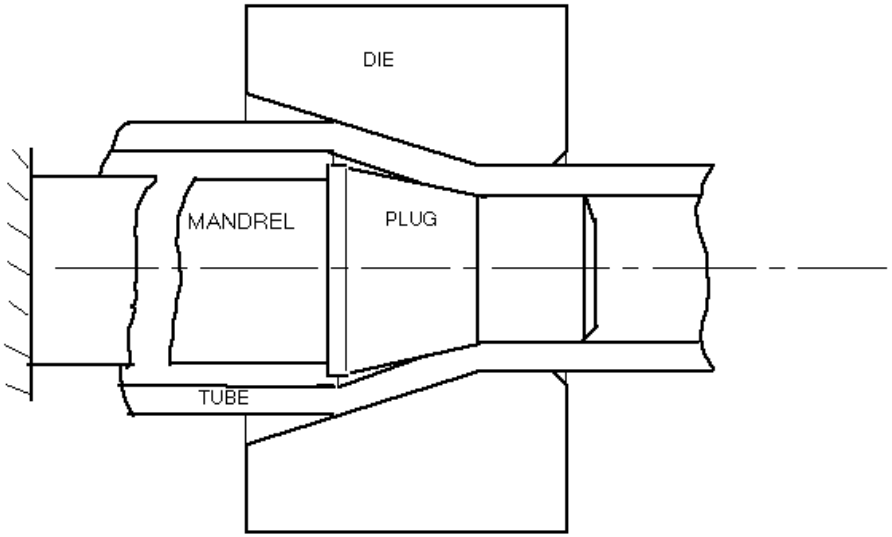
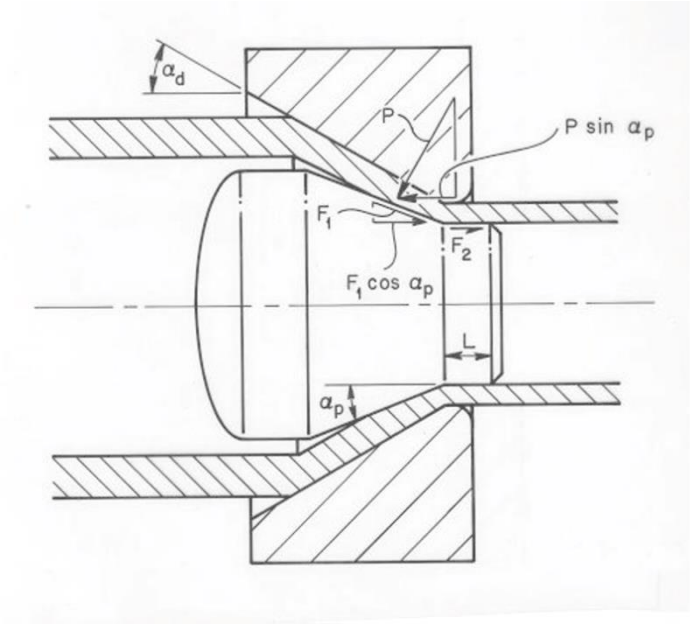


FIG. 8. TUBE DRAWING WITH A PLUG



Trefilação

Forjamento

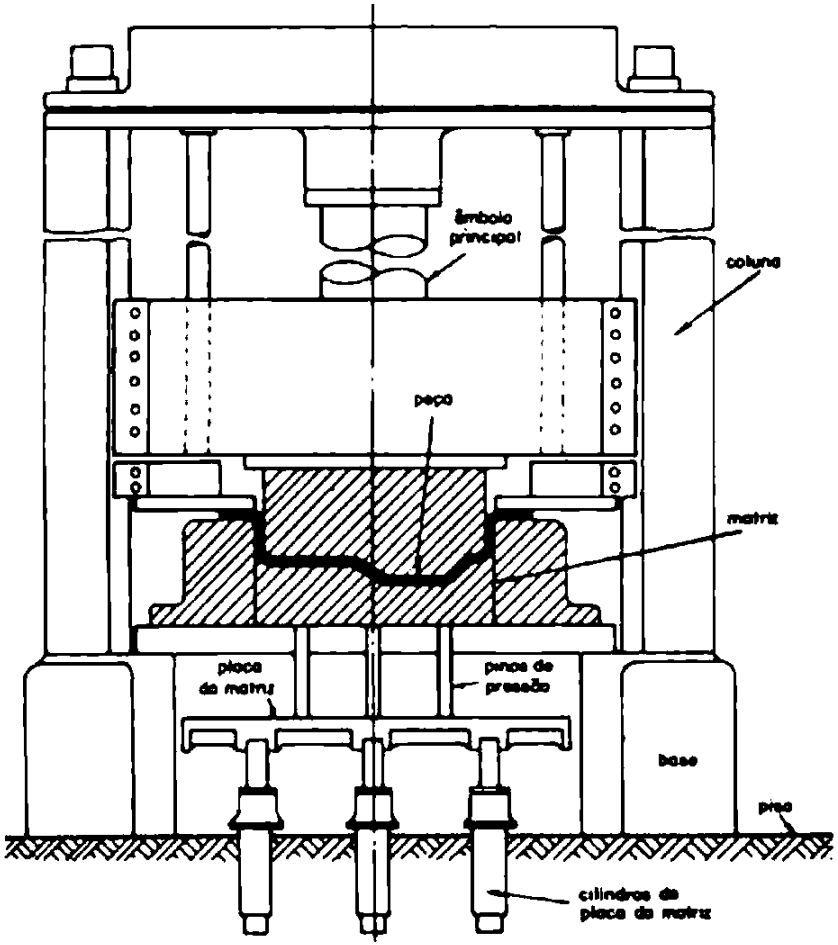
- Realizado há milhares de anos para produção de artefatos metálicos
- Um bloco de metal é prensado dentro de uma matriz com uma cavidade contendo o formato final da peça
- Dimensões próximas às do produto acabado
- Geometrias complexas
  - Nervuras, peças assimétricas, detalhes

Forjamento

- Conformação pode ter estágios intermediários no caso de peças complexas
- Pré-formas ajudam a distribuir o metal de acordo com a distribuição de volume da peça e evitam deformações excessivas durante a conformação

Estampagem

- Prensagem de um material fino entre duas matrizes de conformação, resultando em uma peça fina com detalhes em relevo
  - Latas de bebidas, panelas, ilhoses e botões, peças, carcaças de peças, etc.



Estampagem

- Fabricação de uma peça pode exigir estágios intermediários
- Estágios podem ser definidos em função das propriedades da peça final, complexidade da peça, ou da operação

Metalurgia do pó

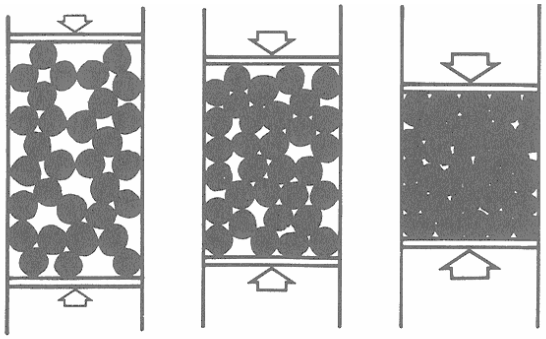
- Material de partida tem a forma de pó
- O pó é prensado com a forma da peça final (por exemplo, engrenagem)
- A peça é tratada em alta temperatura, e as partículas se “unem”
- Alta produtividade aliada a baixo desperdício de material

Metalurgia do Pó

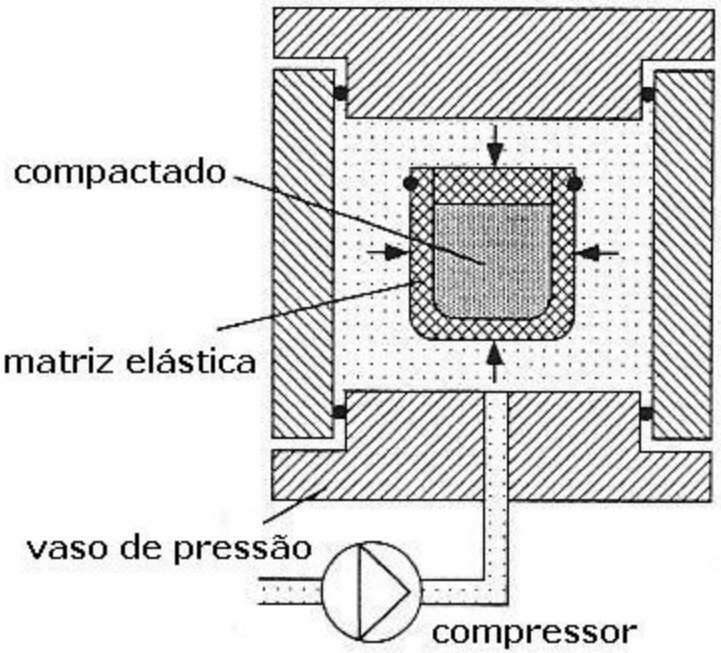
- Material inicial
  - Os pós metálicos podem ter diferentes morfologias e tamanhos médios de partículas (granulometrias)
  - Pós mais grossos são mais difíceis de ser compactados e deixam uma quantidade maior de espaços vazios
  - Pós menores deixam espaços vazios menores
  - Combinações de faixas de granulometria podem resultar em peças finais de melhor qualidade
  - Os pós podem ser combinados a aglomerantes para que sejam injetados nos moldes

Metalurgia do pó

- Prensagem da peça
  - Prensagem uniaxial – a pressão é aplicada apenas em uma direção
  - Prensagem isostática – a pressão é aplicada em todas as direções
    - O molde inteiro é colocado dentro de uma câmara com óleo hidráulico
    - Aumenta-se a pressão do óleo, que aplica a mesma pressão em todas as direções da peça

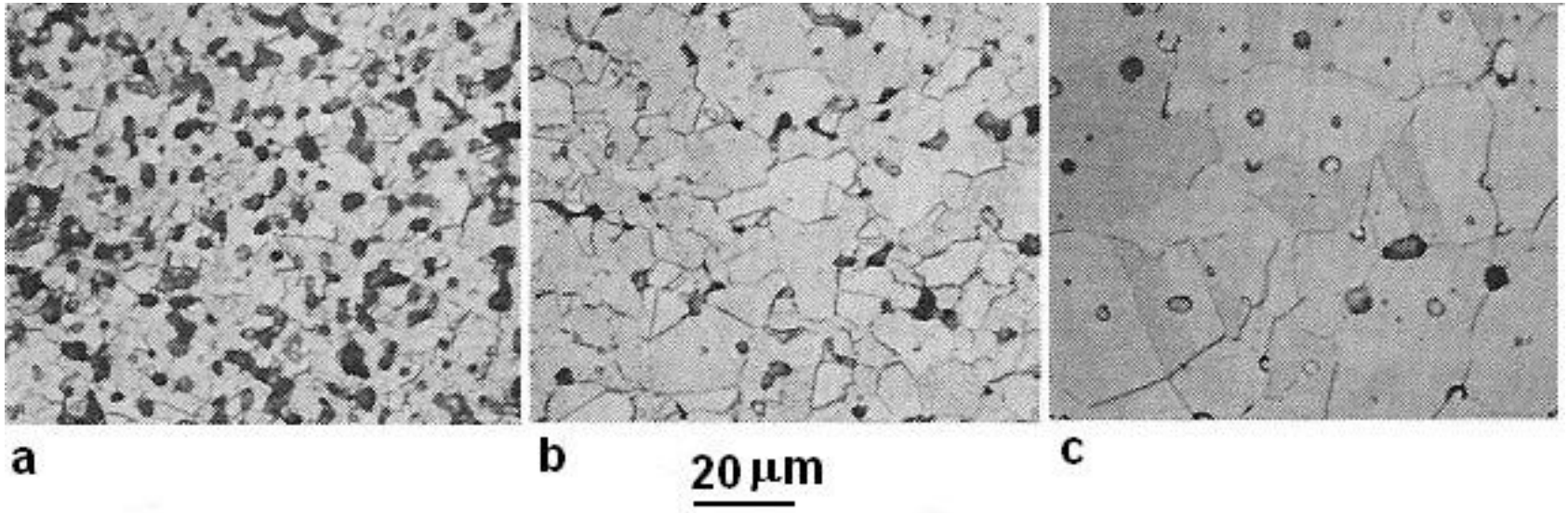


compactação



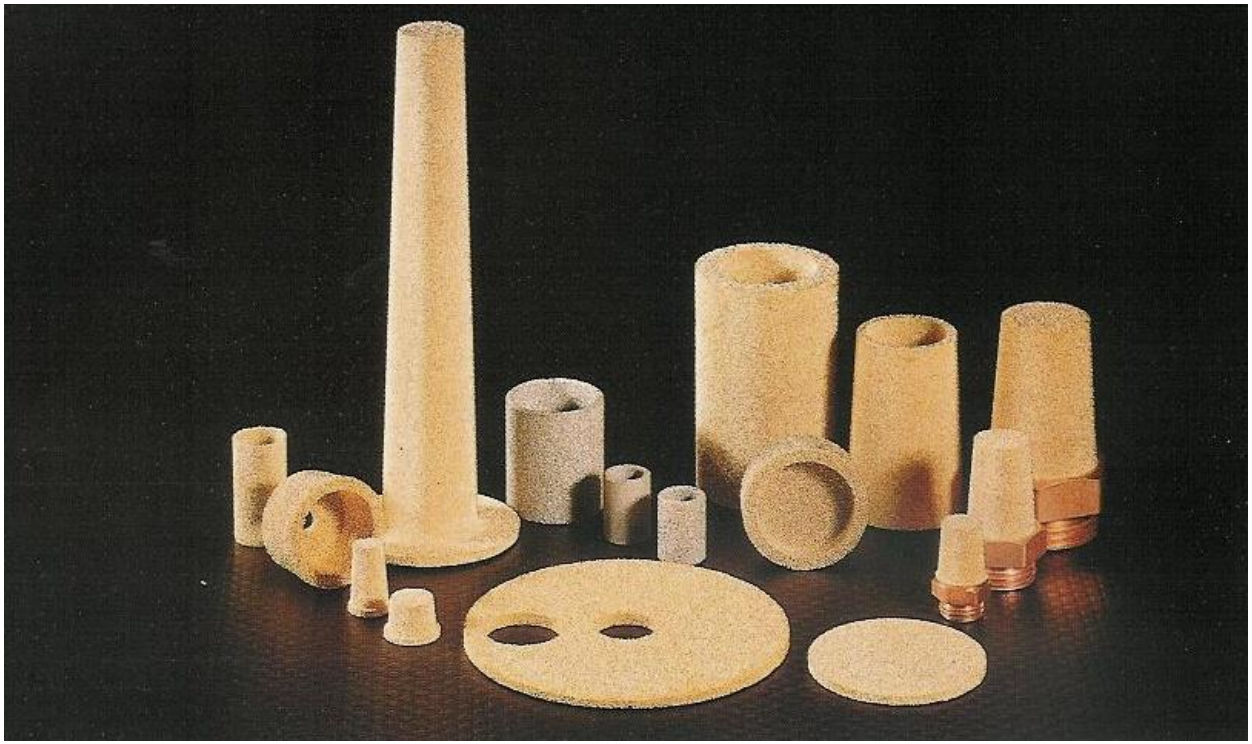
Metalurgia do pó

- Tratamento em alta temperatura (sinterização)
  - As partículas unem-se sob ação da temperatura
  - Aumento da área de contato
  - Formação de pescoço entre as partículas
  - Diminuição dos poros



Metalurgia do pó

- Em geral, as peças apresentam porosidades
- Existem aplicações em que a alta porosidade é um requisito (por exemplo, filtros)



Escolha das rotas de processamento

- Aspectos a considerar
  - Características da peça
  - Requisitos da peça
    - Propriedades mecânicas
    - Tolerâncias dimensionais
    - Estanqueidade
    - Outras propriedades
  - Características do material
  - Custo do processo e da peça final
  - Gasto energético
  - Capacidade das máquinas disponíveis
  - Aspectos ambientais

Escolha das rotas de processamento

- Requisitos do produto final
  - Tira de aço baixo carbono:

    1)
    - Espessura: 4,00 mm
    - Tolerância de espessura: +/- 0,1 mm

    2)
    - Espessura: 4,00 mm
    - Tolerância de espessura: +/- 0,05 mm

- O material 1 pode ser feito por laminação a quente, ao passo que o material 2 requer laminação a frio

Escolha das rotas de processamento

- Requisitos do produto - Propriedades mecânicas
  - Carcaça de filtro de óleo
    - Estampagem é feita em 3 golpes
    - Para garantir a resistência mecânica, a carcaça é “invertida” a cada golpe, aumentando a quantidade de deformação plástica

Escolha das rotas de processamento

- Conexão em latão para água
  - Conexão precisa ser estanque (evitar vazamentos)

    Conexão fundida:
  - O latão para produção de peças fundidas costuma ter adições de chumbo
    - O chumbo aumenta a estanqueidade de peças de latão fundidas
    - O chumbo facilita os processos de usinagem

    O chumbo é tóxico (aspecto ambiental)

    Conexão forjada
  - O latão para forjamento não tem chumbo, e a conformação mecânica elimina problemas de estanqueidade
  - O custo é maior

Escolha das rotas de processamento

- Gasto energético
  - Consumo de energia elétrica dos equipamentos x disponibilidade de energia elétrica x custo da energia
  - Energia necessária para aquecimento de material

- Impacto ambiental
  - Consumo de água
  - Matriz energética
    - Geração de gases tóxicos
    - Efeito estufa
    - Fontes de energia renováveis ou não renováveis

Escolha das rotas de processamento

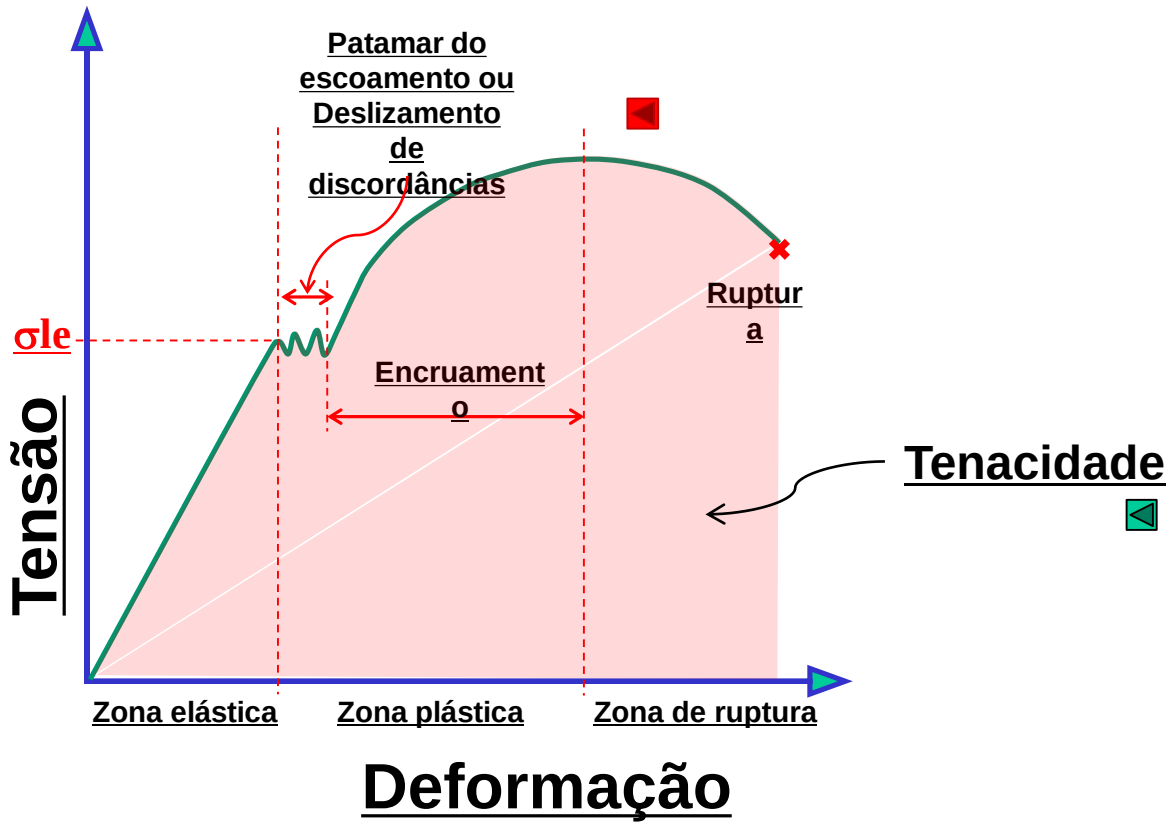
- Custo do processo
  - Complexidade do processo (processo mais longo x processo mais enxuto)
  - Perdas inerentes ao processo
  - Custo de ferramentas
  - Custo de matérias-primas
  - Investimento necessário em equipamentos
  - Preço que o cliente se dispõe a pagar

Escolha das rotas de processamento

- Características da peça
  - Complexidade geométrica
    - Peças com muitas nervuras ou apêndices
  - Dimensões
    - Peças para indústria naval, com peso da ordem de várias toneladas, podem não ser possíveis de fabricar por processos de conformação mecânica por conta do tamanho
- Características do material
  - Propriedades mecânicas – alguns materiais podem ser muito duros para ser conformados mecanicamente

Resumo

- A microestrutura dos materiais influi de maneira significativa nas propriedades dos materiais
- O processamento dos materiais pode ser projetado para obtenção de microestruturas específicas, que levem às propriedades desejadas
- Entre as rotas principais de processamento dos materiais metálicos destacam-se a fundição (conformação no estado líquido), conformação mecânica e metalurgia do pó
- A escolha do método de processamento depende de fatores variados como os requisitos do produto final, limitações de processo no ambiente produtivo, custo de fabricação, impacto ambiental, gasto energético, características do material processado, etc.


Patamar do escoamento ou Deslizamento de discordâncias
σle
Ruptura
Encruamento
Tenacidade
Tensão
Zona elástica
Zona plástica
Zona de ruptura
Deformação

Deformação plástica do cristal

Um corpo metálico quando solicitado por uma tensão superior à tensão limite de escoamento (σle) sofrerá uma deformação plástica.

σle de um cristal real << do que a do cristal teórico perfeito, principalmente devido à presença de discordâncias.

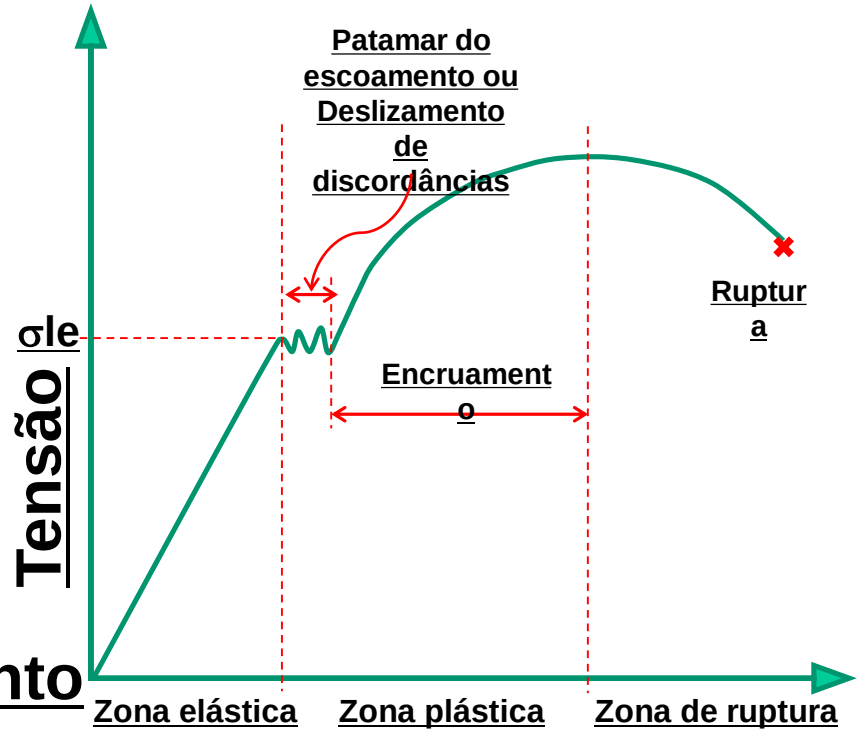
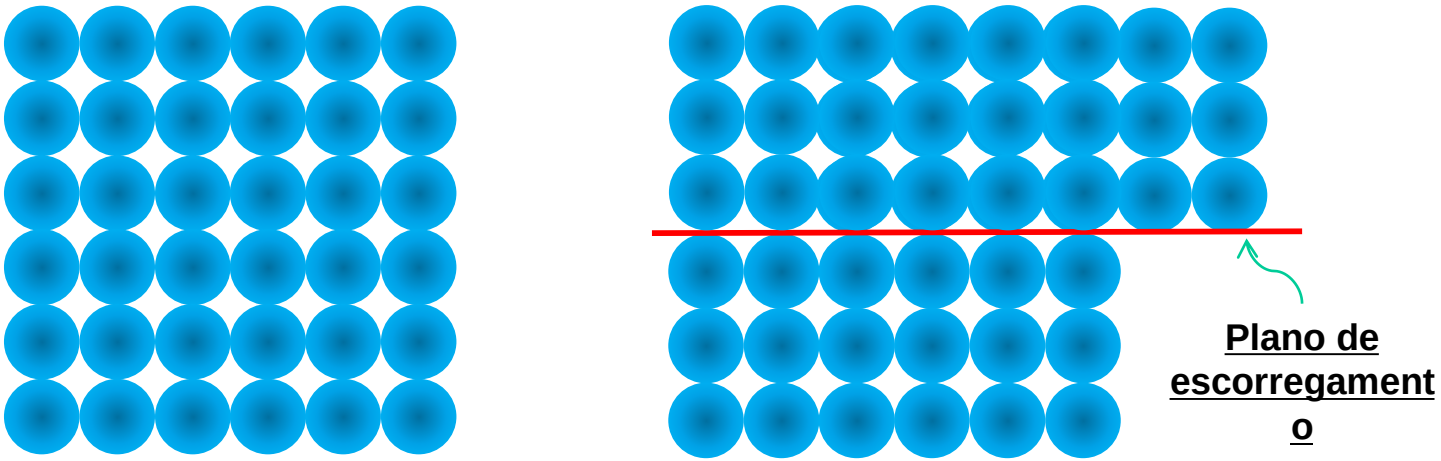
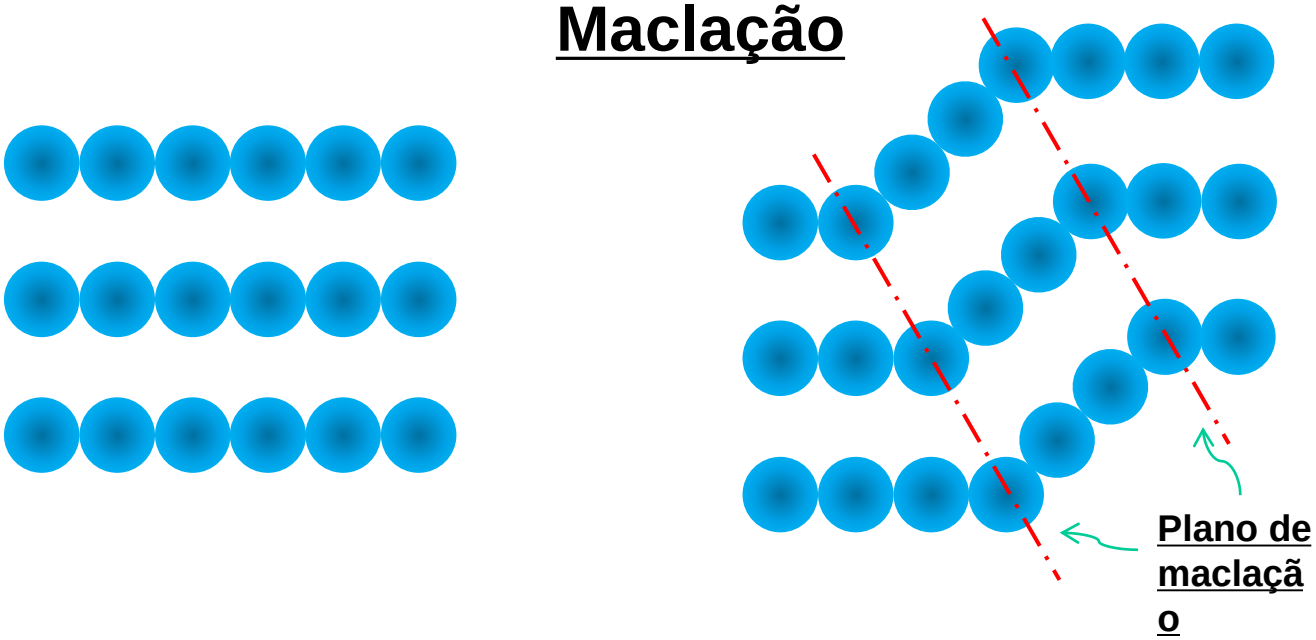


Diagrama tensão x deformação

Mecanismos na deformação plástica
- Escorregamento
- Maclação

Escorregamento



Maclação