

1) Definições Básicas:

• Material:

Substância pura ou composta que é produzida/obtida com alguma **motivação tecnológica (APLICAÇÃO)**.



• Dispositivo:

Peça composta em geral por materiais distintos produzida visando algum fim tecnológico (ex: Circuitos eletrônicos - placas eletrônicas).

• Propriedades:

Todo material tem **propriedades físico-químicas específicas**, como:

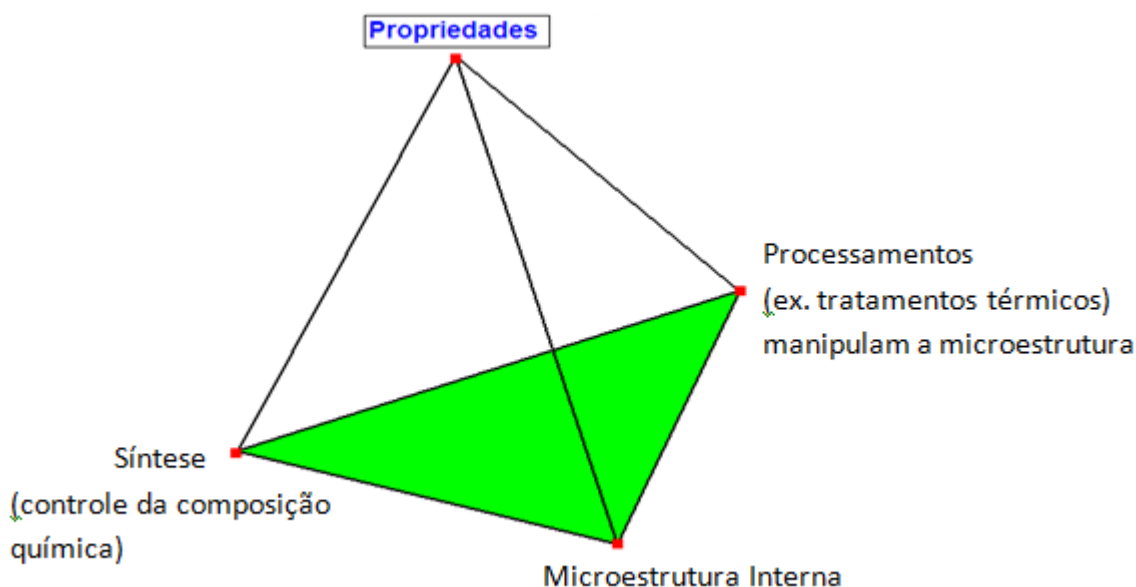
Resistência mecânica;

Condutividade térmica e elétrica;

Resistência a corrosão;

Ao se escolher um material, deve-se utilizar o material que possui as **propriedades esperadas** para o tipo de **aplicação desejada**.

O controle e a otimização das propriedades depende de três fatores: a **síntese** do material (controle da **composição química**), os **processamentos** aos quais o material é submetido (**manipulam a microestrutura**), e o formato da **microestrutura** interna.



- **Engenharia dos Materiais:**

O engenheiro de materiais pretende obter o controle sobre as propriedades para conseguir a aplicação desejada do material.

Aperfeiçoar técnicas de processamento de materiais.

Propriedades controladas e otimizadas → garantem a aplicação

O **desempenho** do material vai **depender da aplicação** a qual ele for submetido

- **Ciência dos Materiais:**

Estudo da microestrutura e correlação com propriedades físicas e químicas.

-técnicas:

Microscopia (óptica, MEV e MET) → para conhecer a microestrutura

Ensaio de materiais (experimentos em laboratório) → para conhecer as propriedades

2) Propriedades e Arranjo Microestrutural:

- **Microestrutura:**

É a **organização dos grãos** (contorno, forma, tamanho, orientação) e **fases** sujeitas à observação microscópica.

A microestrutura compreende as diferentes fases e o modo como estão arranjadas/ organizadas.

Muitas das características estruturais (como, por exemplo, o tamanho dos grãos) que governam as propriedades dos materiais caem dentro da faixa da microestrutura, ressaltando o motivo pelo qual o estudo e o controle da microestrutura é tão importante.

A microestrutura dos materiais depende da composição química e dos processamentos (tratamentos térmicos e mecânicos) aos quais o material foi submetido.

→ por meio de um processamento almeja-se uma dada microestrutura que, por sua vez, fornece as propriedades desejadas ao material.

A **microestrutura afeta** profundamente **as propriedades** de um material e assim, sua aplicabilidade, por isso, **é importante caracterizá-la**, isto é, conhecê-la.

3) Propriedades e Presença de Fases:

- **Fase:**

porção homogênea de um sistema que tem características físicas e químicas definidas.
(grão)

Identificamos uma **fase** pela sua **composição química e microestrutura.**

cada fase tem suas próprias características físico-químicas, logo...

→ A interação de duas ou mais fases em um material permite a obtenção de **propriedades diferentes**.

→ É possível **alterar as propriedades de um material alterando a forma e distribuição das fases**.

4) Propriedades e Cristalinidade

- **Material Cristalino**: ordem de posicionamento dos átomos de longo alcance (arranjo ordenado) (ex: metais e suas ligas)
- **Material Amorfo**: ordem de curto alcance. (arranjo desordenado) (ex: vidro e escória)

5) Propriedades e Ligação Química

Ligações são como elétrons são compartilhados. Podem ser iônicas, covalentes ou metálicas.

A mecânica quântica faz o link entre as ligações químicas e as propriedades.

Principais efeitos das ligações nas propriedades:

- Boa condutividade (elétrica e térmica)

6) Processamentos:

Alteram a microestrutura → geram impactos nas propriedades

Dependendo do processamento que o material sofrer, vão ser formados **fases diferentes** com propriedades diferentes.

- Tratamento Térmico: (ex: têmpera – resfriamento muito rápido, jogando água)
- Tratamento químico: (ex: galvanização/ cementação)
- Tratamento mecânico: (ex: conformação – dar forma ao material)

- **Tratamento Térmico**:

Aquecimento e subsequente **resfriamento** do material em condições controladas.

O TT altera:

- **Tipo, % e composição das fases** → podem ser **previstas pelo diagrama de fases**
- Forma, tamanho e distribuição dos cristais (grãos) → não pode ser prevista
 - ↳ Fortemente **dependente da taxa de resfriamento** e velocidade (mecanismo) das transformações de fases no interior do material (cinética/ velocidade)

7) Estudos de Casos - AÇO:

ALTO-FORNO: é alimentado com concentrado de minério de **Ferro** (na forma de **granulados, sínter e pelotas**) e com **Carvão (COQUE** – espécie de carvão de alta pureza). O **ar quente** (21% O₂ e 70% N) entra por baixo e **reage com o carbono** do Coque, produzindo CO que **reagirá com o ferro, reduzindo-o**.

É produzido o **FERRO GUSA** (liga de ferro e carbono, ferro impuro) e uma **ESCÓRIA** (parte do concentrado que não se transformou em ferro, **impurezas líquidas**)

É adicionado um **fundente CaO** ao forno para que a **escória saia líquida!**

- **Granulado:** grãos maiores (menor qt)
 - **Sínter:** grão finos (1 – 0.1 mm)
 - **Pelota:** grãos finos (<0.1 mm)
- } Obtidos pela **Aglomeração de finos**, pois grãos muito finos seriam **levados** pelo ar no alto forno

› **Sinterização (metalurgia do pó):** (maior qt)

● Recebe: concentrado, H₂O (aglutinante), coque (combustível) e CaCO₃ (fundente)

● Processo: são submetidos a temperaturas elevadas (forno a T > 800°C com ventaneiras → Ignição do coque → difusão de gases $C + O_2 = CO/CO_2 + \text{Calor}$)

→ **sínter é poroso**, o que garante **melhor reatividade** com os **gases** no alto forno

› **Pelotização:**

Moagem dos grãos de minério de ferro. Em seguida, esses **grãos** muito **finos** são agrupados.

Recebe concentrado, **H₂O**, mineral **aglutinante** e fundente (CaO)

Mistura no **disco pelletizador**: formação de pelotas (energia superficial mínima)

Tratamento térmico após: Queima em forno ao ar a 1200°C → dá maior resistência às pelotas

Resfriamento ao ar – endurecimento:

Formação, fusão e subsequente resfriamento da escória (impurezas que não são reduzidas)

CONVERTOR LD: **limpeza do ferro-gusa.**

recebe o ferro-gusa sólido e líquido, fundente e O₂ puro, com eles produz um aço primário (ainda impuro) gases poluentes e escória.

FORNO PANELA: **Refino secundário.** São inseridos **eletrodos de grafite** dentro da solução aquosa, na qual está o aço primário, para que se consiga deixar o aço mais **puro**.

Podem ser adicionados **elementos de liga** para, por exemplo, **aumentar a resistência mecânica**.

LINGOTAMENTO: resfriamento do líquido escoado (a taxa de resfriamento muda as propriedades do ferro formado)

LAMINAÇÃO: “poda”/corte da peça formada (também altera as propriedades)

TRATAMENTO TÉRMICO POSTERIOR: **ajuste da microestrutura** → controle final das propriedades que foram alteradas ao longo do processo

8) Diagrama de Equilíbrio de Fases:

são mapas que representam a **relação entre as fases de acordo com a temperatura, pressão e composição química.**

Os diagramas de fase podem representar estruturas de: SOLUBILIDADE TOTAL, SOLUBILIDADE PARCIAL E IMPARCIAL, pois permitem o cálculo de cada fase presente em função da composição total e temperatura. No caso da solubilidade total, usa-se um diagrama isomorfo, e no caso da nula, um diagrama eutético.

● **Solubilidade:** aponta **o quanto dois elementos tem propriedades compatíveis** e podem **estar juntos em uma só fase** no estado sólido.

É **relacionada** com a **estrutura cristalina**, pois a criação ou não de uma fase homogênea depende da **capacidade dos grãos** (ou cristais) dos dois elementos de **formarem uma mesma estrutura**.

› **Solubilidade Total:** os dois elementos são plenamente compatíveis para a formação de uma **fase homogênea** no estado sólido.

› **Solubilidade Parcial:** apenas **parte** do material se solubiliza na fase sólida.

› **Solubilidade Imparcial ou NULA:** há **clara e total separação de fases**

→ É possível prever a microestrutura de um material através do diagrama de fases.

● **Limite de Solubilidade:**

é a **concentração máxima** que se pode atingir de um soluto dentro de um solvente. Ao ultrapassá-lo forma-se uma segunda fase.

→ Quanto **maior a temperatura, maior o limite de solubilidade.**

● **Diagramas Isomorfos:**

Apenas para materiais não ferrosos. **SIMILARIDADE físico química.** (ex. Cu-Ni)

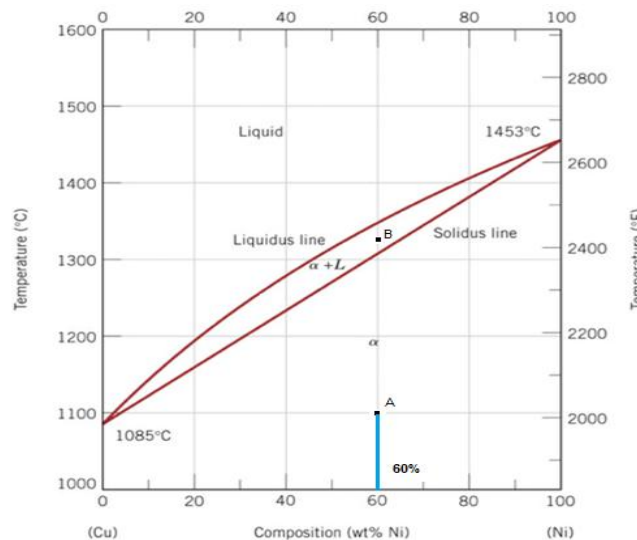
A leitura do diagrama é bastante simples: se o ponto procurado estiver num campo onde somente existe uma fase, a composição já está definida, que é a que já está indicada no campo.

Caso o ponto esteja localizado onde existem duas fases em equilíbrio, a determinação das fases ali presentes é dada traçando-se uma reta horizontal que passa pelo ponto e atinge as duas linhas que delimitam o campo de duas fases. As composições são dadas pelas intersecções do segmento com as linhas de contorno.

9) Lendo o Diagrama de Fases:

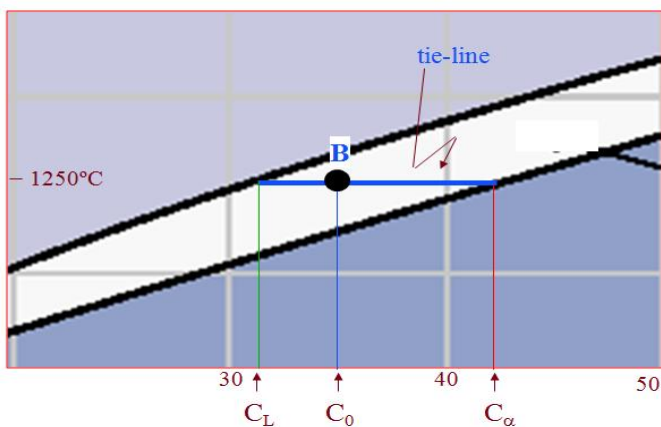
Ponto A → apenas fase alfa → **composição lida direto do gráfico**

Ponto B → fase alfa + líquida → **linha de amarração** → se estende de uma fronteira a outra



•Regra da Alavanca:

(qnt de elemento em cada fase: projeção no eixo x). Para o **teor das fases** %a e %L :



$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 0.73$$

$$W_\alpha = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{35 - 32}{43 - 32} = 0.27$$

A soma das suas frações tem que ser 1

$$W_\alpha + W_L = 1$$

A massa de um dos componentes (ex. Ni) que está presente em ambas as fases deve ser igual a massa deste componente na liga como um todo (composição global)

$$W_\alpha C_\alpha + W_L C_L = C_0 \rightarrow W_\alpha = (C_0 - C_L)/(C_\alpha - C_L)$$

10) Origem Microestrutural

• Nucleação e Taxa de Resfriamento:

A taxa de **nucleação** é estimulada pelo **resfriamento**. A T deve ser um pouco menor que a T de fusão para haver a formação de núcleos.

↑ taxa → **resfriamento rápido** → **mais núcleos** se formam → **grãos diminuem**

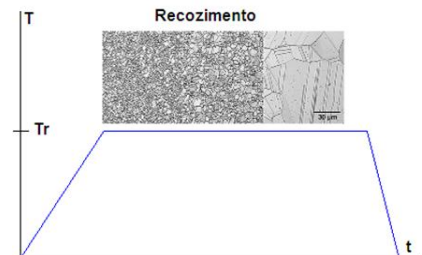
↓ taxa → **resfriamento lento** → **menos núcleos** → **grãos maiores**

• Recozimento:

Tratamento térmico para aumentar o **tamanho dos grãos**.

A taxa de crescimento dos grãos depende da temperatura

↑ T → ↑ taxa de **crescimento** → **grãos maiores** para o **msm tempo**



Também podem: diminuir a dureza, melhorar a ductilidade, ajustar o tamanho dos grãos, regularizar a estrutura bruta de fusão, **restituir características que foram alteradas**.

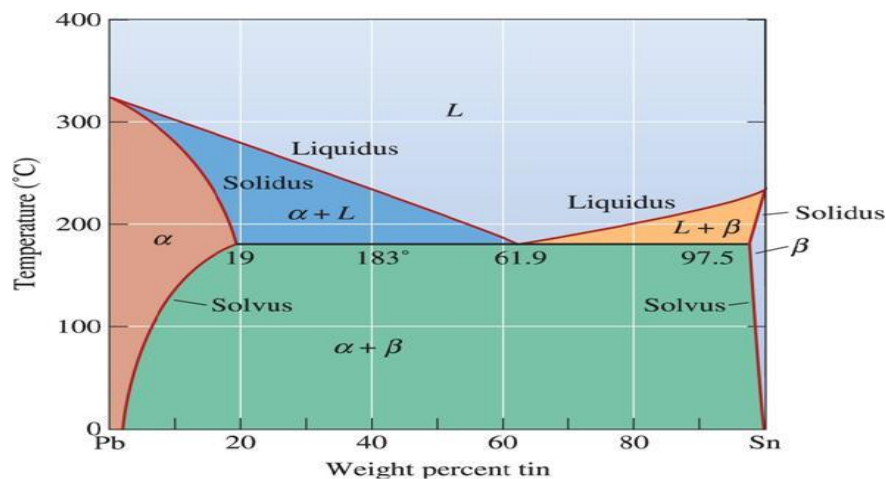
T < Temperatura de fusão da liga!

A temperatura do resfriamento resulta em microestruturas e propriedades diferentes.

resfriamento **rápido** → material mais **duro**

resfriamento **lento** → material mais **dúctil**

11) Diagrama Pb-Sn:



• Reação Eutética:

Primeiro **beta** se forma a partir de um processo de **nucleação** e crescimento na fase líquida (L → beta).

Quando cruzamos a **isotérma eutética**, o líquido presente se transforma de uma só vez em alfa e beta – **reação eutética** (L → alfa + beta)

Microestrutura composta por grãos de beta (claros) e grãos formados pela superposição de alfa e beta (lamelas – microestrutura eutética).

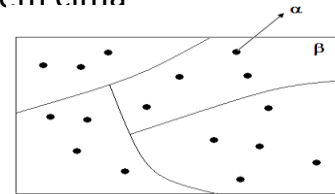
• **Fora da linha eutética:**

Primeiro beta se forma a partir de um processo de nucleação e crescimento na fase líquida (L → beta).

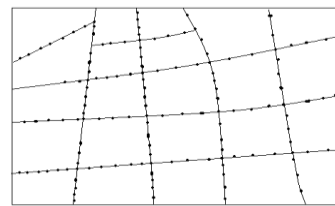
Todo o líquido é convertido em beta. Continuando-se o resfriamento, ao adentrarmos o campo alfa + beta, cristais de alfa de formam – transformação no estado sólido (beta → alfa)

Microestrutura composta por grãos de beta (claros) e precipitados de alfa em cima (escuros).

Resfriamento lento → grãos se formam no espaço **intergranular**.



Resfriamento rápido → Grãos se formam nos **contornos** de grão (**intragranular**). Pode-se limitar a transformação (% de alfa inferior ao previsto pelo diagrama de fases). (em alfa → beta)



12) Diagrama Fe-C:

• **Reação Eutetóide:** 1 sólido → 2 sólidos
Austenita → Ferrita + Cementita = Perlita
 γ (gama) → α (alfa) + Fe₃C

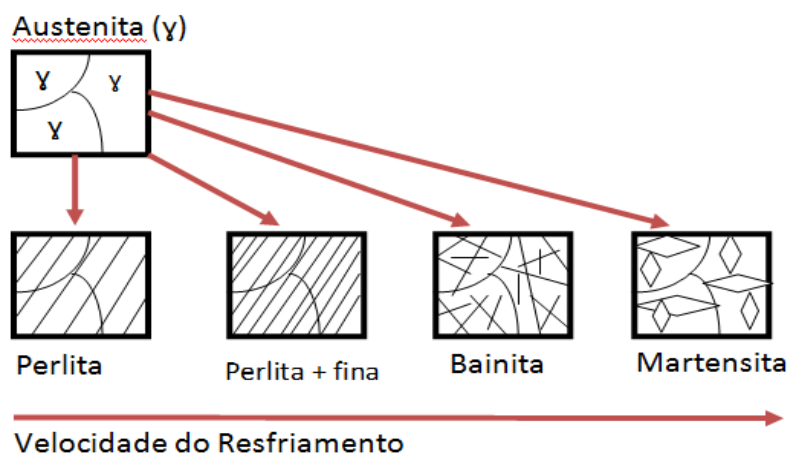
• **Reação Eutética:** 1 líquido → 2 sólidos
L → austenita(γ) + cementita (Fe₃C)

• **Elementos de Liga:** modificam as linhas do diagrama

• **Efeito do Carbono:** gera soluções sólidas **intersticiais** (**átomo muito pequeno é inserido na estrutura cristalina**)
Para formação de grafite: Resfriamento muito lento
Para formação de cementita: Resfriamento ao ar. reação eutetóide

• **Tratamentos Térmicos:** **recristalização** da austenita → **reconstrução** das fases

Austenitização e resfriamento alteram o tipo de microestrutura presente na peça, mudando o tamanho dos grãos e a % das fases. Determina se será produzido perlita, bainita ou martensita.



- **Bainita:** Maior dureza que a perlita

Mesmas fases (alfa + Fe₃C), porém com um arranjo microestrutural distinto

- **Martensita:** ocorre por **resfriamento muito rápido** (ex. **têmpera**- jogar H₂O)

Mais resistente que a bainita

Revenido: aquecimento posterior para diminuir um pouco a dureza

12) Ensaio Mecânico: Caracterização dos Materiais (Propriedades Mecânicas)

- **Ensaio Destrutivo:**

Há a destruição total ou parcial do corpo de prova. Servem para descobrir as propriedades mecânicas de um material.

↳ **Ensaio de Tração:**

Aplicação de carga de tração crescente em um corpo de prova até a ruptura.

› **Módulo de Young:** mede a resistência à deformação (elasticidade)

coef. angular do gráfico

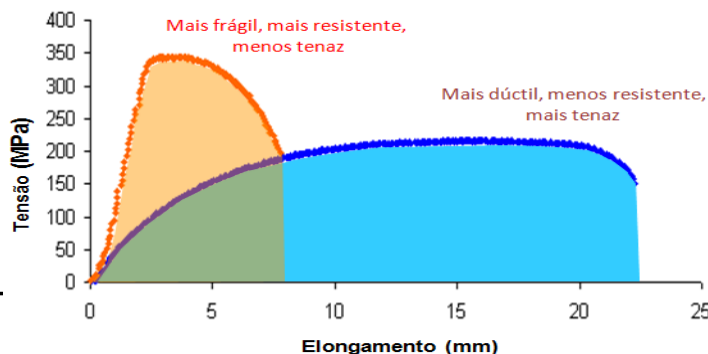
Tensão = resistência*deformação

› **Tenacidade (ÁREA do gráfico):** energia que um material pode absorver antes de fraturar

› **Ductilidade:** deformação máxima antes de romper de um material (pt final do gráfico)

› **Limite de escoamento:** transição do elástico para dúctil (PT q o gráfico deixa de ser 'reta')

Ductilidade e dureza são **inversos** ! Quanto mais duro menos dúctil !



Obs: mais carbono -

↳ **Ensaio de Dureza:**

Quanto maior a penetração da ponta geométrica na peça, inferior a dureza (mais dúctil)

Grãos grossos → menor resistência

Grãos finos → maior resistência → maior dureza → mais frágil (não aguenta grande deformação)

- **Ensaio Não-Destrutivo:**

Servem para saber se há microtrincas, poros e deformidades superficiais. Avaliam o risco de fratura de um material.

Não é necessária a confecção de corpos de prova, pois a peça não é destruída.

Link com processos de fabricação.

12) Processos de Fabricação:

Construção de peças/ dispositivos. **Alteração da forma dos materiais** com impactos na microestrutura e portanto, nas propriedades.

• Conformação Mecânica:

Deformação plástica

Gera impacto na microestrutura: tensões transferidas aos grãos faz com que ocorra encruamento – grãos deformados e tensionados → **Aumento de dureza!**

› Conformação a frio:

Deformações limitadas, maior força e grandes precisões. Para **materiais** mais dúcteis. (ex: Pb-Sn)

Temperatura ambiente → Gera encruamento!

É possível recrystalizar o material → através do **Recozimento** pleno posterior → diminui a dureza e aumenta a ductilidade após a conformação
a **temperatura de recristalização** é definida como aquela em que o **metal encruado recristaliza em uma hora**.

→ quanto **maior** o nível de **deformação**, menor é a **temperatura de recristalização**

› Conformação a quente:

Grandes deformações, menor força e pouca precisão. Para **materiais** mais duros (ex: aços)
A **resistência mecânica reduz com a T**.

Gera encruamento se:

- Recozimento pleno é possível:
 - T na região de recozimento
 - » Recristalização!

• Fundição:

Vazar metal líquido, a altas temperaturas, em um molde, que contém uma cavidade com a forma desejada, e depois permitir que esfrie e solidifique.

Difícil controle da taxa de resfriamento → Microestrutura altamente não homogênea → definição das propriedades do material de acordo com a microestrutura formada.

Pode ser realizado um **recozimento** posterior para obter a **microestrutura de interesse**

• Metalurgia do Pó:

Produção de pós: quanto mais fino o pó, melhor.

Aquecimento sinterização → Eliminação de poros e formação da liga na de T fusão

Resfriamento → Microestrutura final

• Fundição VS. Metalurgia do Pó:

Ambas resultam em peças complexas.

- **Conhecimento da faixa de T onde a liga se funde:**
 - Relevante em ambas
 - **Limitante para a fundição!** (só pode ser feito com matérias com **baixa T de fusão**)

Superior **controle** da microestrutura na **metalurgia do Pó!!**

• Soldagem:

União de peças metálicas: pela fusão do metal/liga de solda

Forma-se uma liga de interesse na Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Se necessário → TT para alívio de tensões residuais.

Diagramas de fases são úteis para analisar desvios do equilíbrio pelo resfriamento!