

# Diagramas de fases:

- Limite de solubilidade
  - Microestrutura
- Diagramas em sistemas metálicos monocomponentes
  - Diagramas em sistemas binários
    - Nucleação
  - Crescimento e segregação de fases
  - Transformação de fases em metais

**Introdução ao estudo dos materiais**

**Estruturas dos sólidos cristalinos**

**Imperfeições na rede cristalina**

**Difusão em sólidos metálicos**

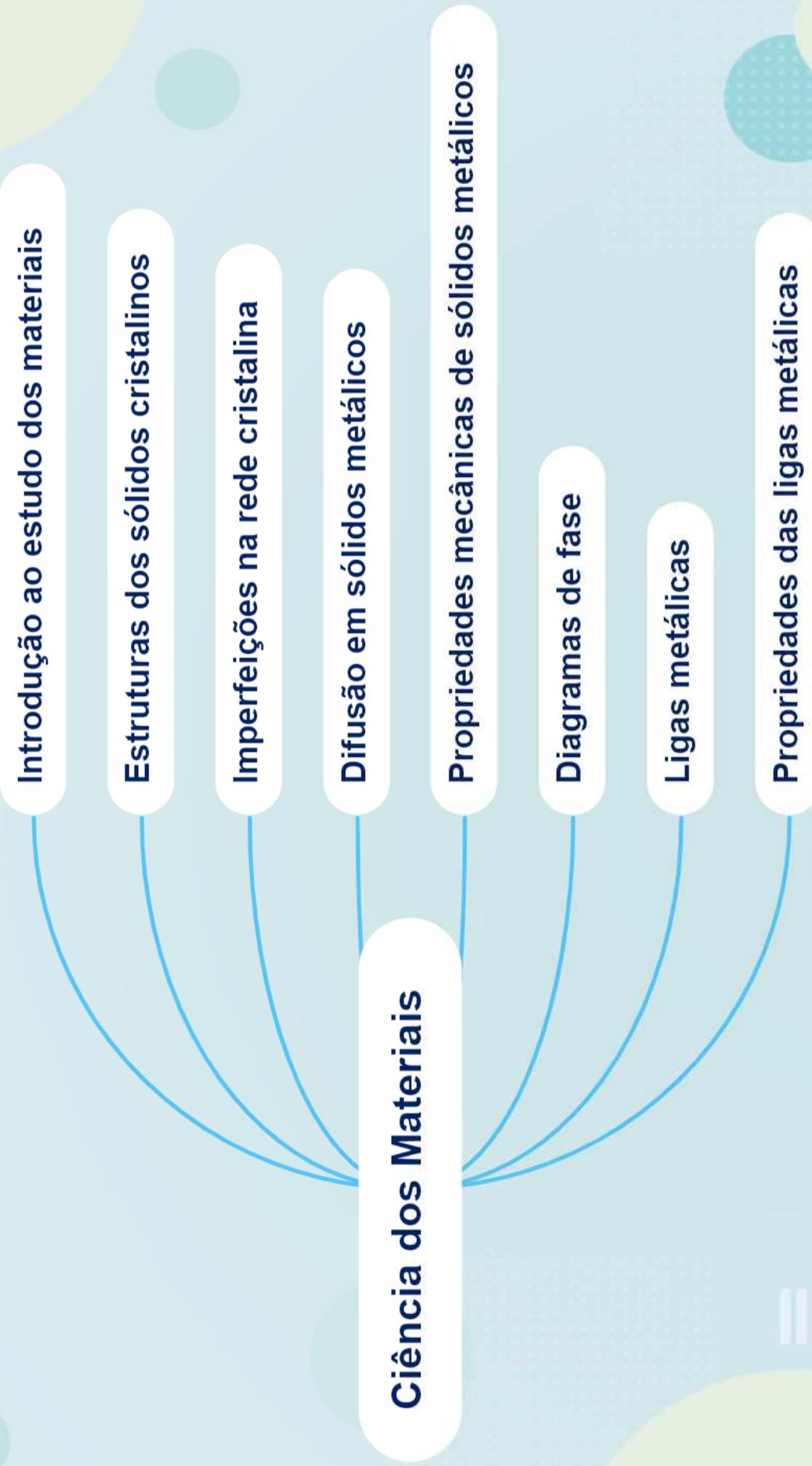
**Propriedades mecânicas de sólidos metálicos**

**Diagramas de fase**

**Ligas metálicas**

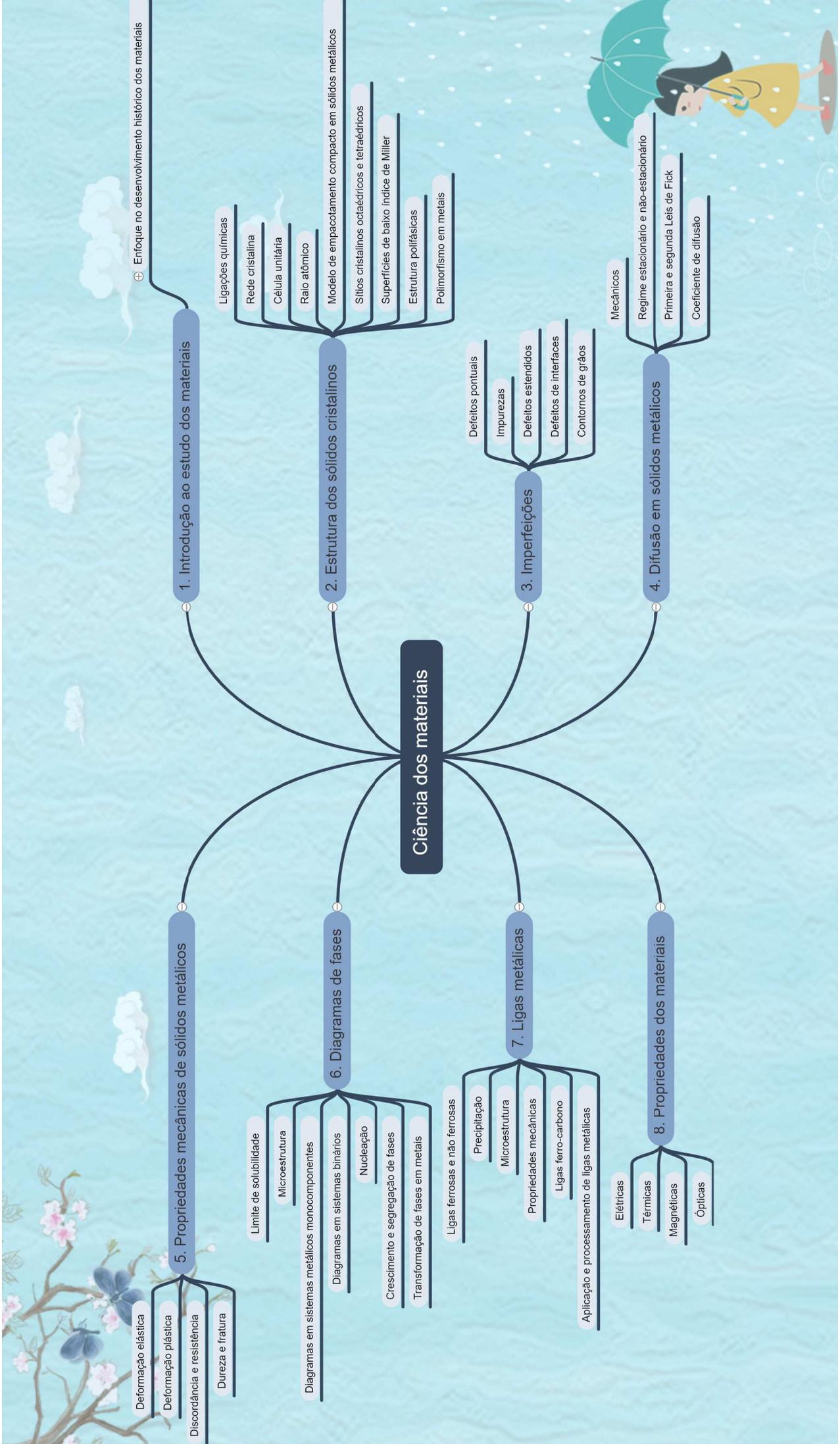
**Propriedades das ligas metálicas**

**Ciência dos Materiais**



```
graph TD; A[Ciência dos Materiais] --- B[Introdução ao estudo dos materiais]; A --- C[Estruturas dos sólidos cristalinos]; A --- D[Imperfeições na rede cristalina]; A --- E[Difusão em sólidos metálicos]; A --- F[Propriedades mecânicas de sólidos metálicos]; A --- G[Diagramas de fase]; A --- H[Ligas metálicas]; A --- I[Propriedades das ligas metálicas];
```

The diagram is a mind map with a central node 'Ciência dos Materiais' connected to eight peripheral nodes. The nodes are arranged in a semi-circle around the center. The background is light blue with decorative green and teal circles and patterns.



# Ciência dos materiais

## 1. Introdução ao estudo dos materiais

⊕ Enfoque no desenvolvimento histórico dos materiais

## 2. Estrutura dos sólidos cristalinos

- Ligações químicas
- Rede cristalina
- Célula unitária
- Raio atômico
- Modelo de empacotamento compacto em sólidos metálicos
- Sítos cristalinos octaédricos e tetraédricos
- Superfícies de baixo índice de Miller
- Estrutura polifásicas
- Polimorfismo em metais

## 3. Imperfeições

- Defeitos pontuais
- Impurezas
- Defeitos estendidos
- Defeitos de interfaces
- Contornos de grãos

## 4. Difusão em sólidos metálicos

- Mecânicos
- Regime estacionário e não-estacionário
- Primeira e segunda Leis de Fick
- Coefficiente de difusão

## 5. Propriedades mecânicas de sólidos metálicos

- Deformação elástica
- Deformação plástica
- Discordância e resistência
- Dureza e fratura

## 6. Diagramas de fases

- Limite de solubilidade
- Microestrutura
- Diagramas em sistemas metálicos monocomponentes
- Diagramas em sistemas binários
- Nucleação
- Crescimento e segregação de fases
- Transformação de fases em metais

## 7. Ligas metálicas

- Ligas ferrosas e não ferrosas
- Precipitação
- Microestrutura
- Propriedades mecânicas
- Ligas ferro-carbono
- Aplicação e processamento de ligas metálicas

## 8. Propriedades dos materiais

- Elétricas
- Térmicas
- Magnéticas
- Ópticas

# Diagramas de fases:

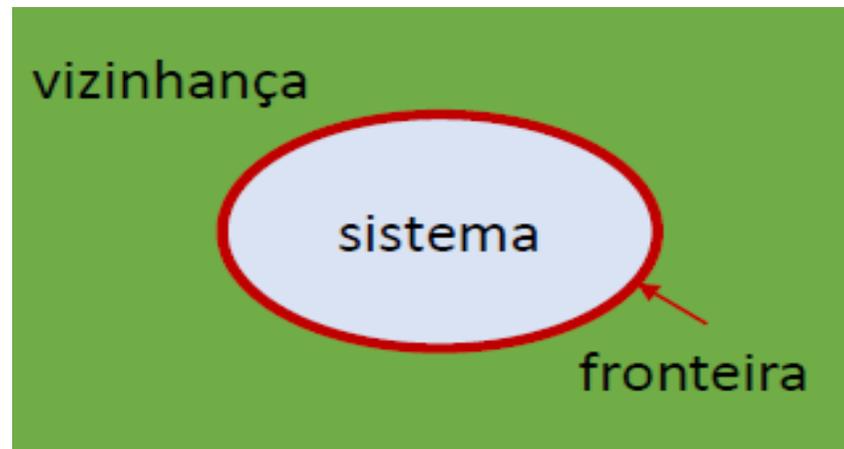
- Limite de solubilidade
  - Microestrutura
- Diagramas em sistemas metálicos monocomponentes
  - Diagramas em sistemas binários

Um **diagrama de fases** é um gráfico que exhibe as condições de equilíbrio entre diferentes *fases* termodinamicamente estáveis em distintas condições de *composição, temperatura e pressão*. O **diagrama de fases** está diretamente relacionado com a microestrutura dos materiais. Por sua vez, existe uma correlação direta entre microestrutura e propriedades dos materiais.

**Componentes:** são as substâncias químicas que compõem uma fase.

**Sistema:** série das possíveis fases formadas pelos mesmos componentes, independente da composição. (Parte representativa de uma amostra de material, escolhida para realizar um estudo).

**Fases:** As partes estruturalmente homogêneas do sistema que possuem propriedades físicas e químicas características.



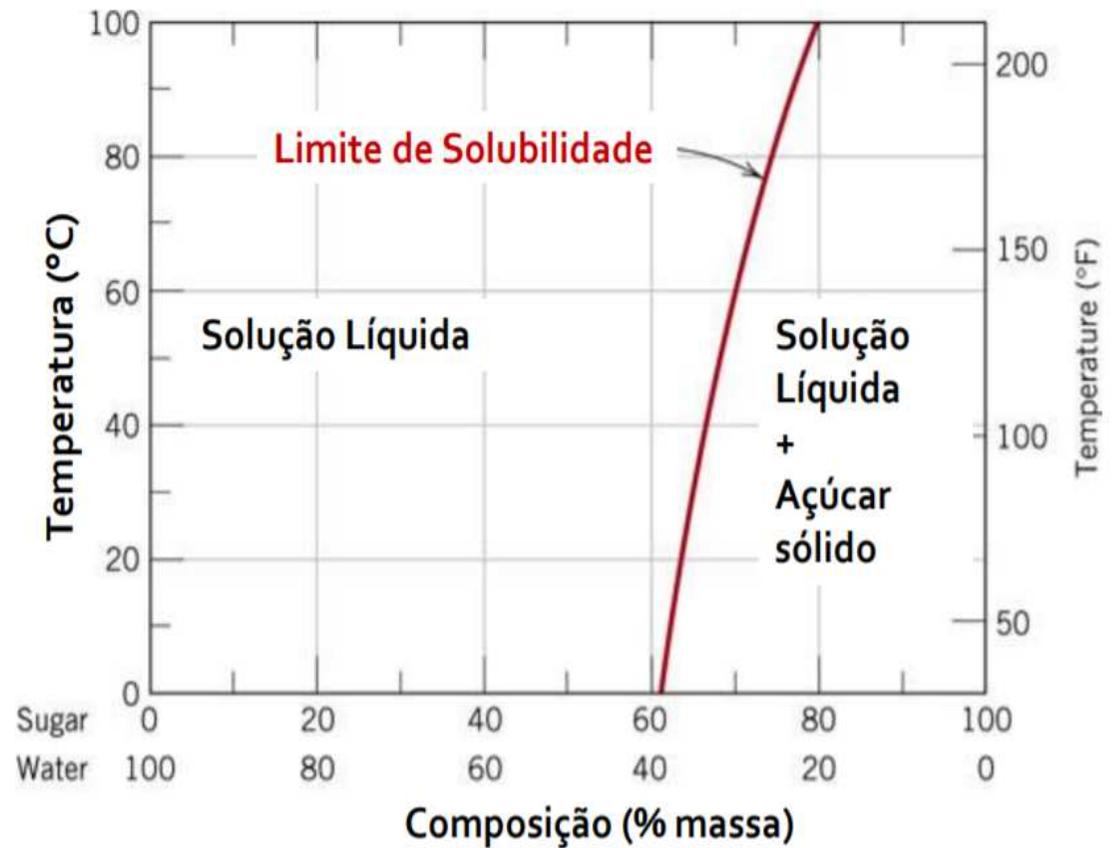
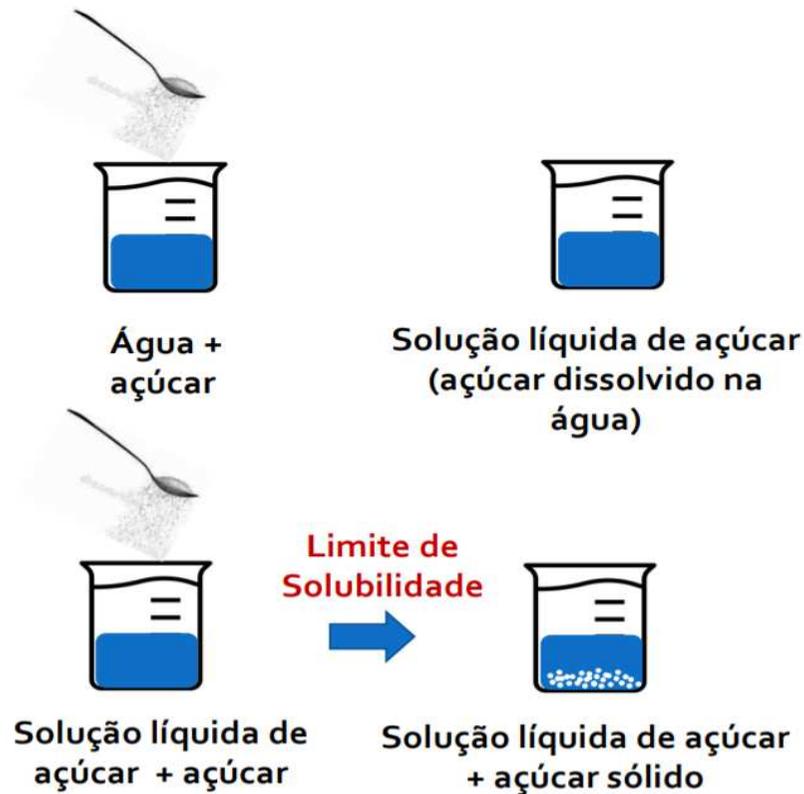
*Equilíbrio de fases*: um sistema multifásico está em equilíbrio quando suas fases não se alteram com o tempo e permanecem nas condições em que se encontram, indefinidamente, a não ser que o sistema seja externamente perturbado.

*Equilíbrio termodinâmico*: um sistema se encontra em equilíbrio termodinâmico quando sua energia de Gibbs atinge um mínimo, sob condições de temperatura, pressão e composição constantes. Caso estas condições sejam alteradas, a energia de Gibbs irá variar e espontaneamente o sistema buscará um novo estado de equilíbrio, para as novas condições de temperatura, pressão e composição.

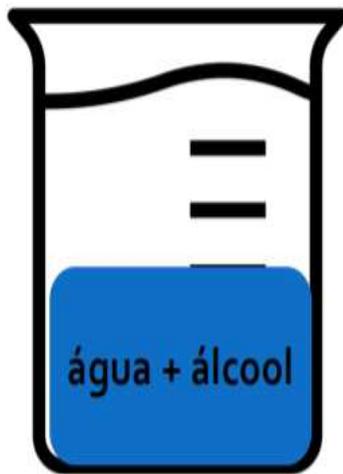
$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

# Limite de solubilidade

**Limite de Solubilidade:** concentração máxima de soluto que se dissolve no solvente para formar uma solução homogênea a uma dada temperatura

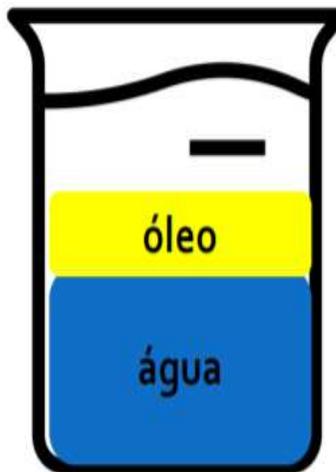


**Número de Fases:** porções homogêneas de um mesmo sistema que possui características físicas e químicas uniformes



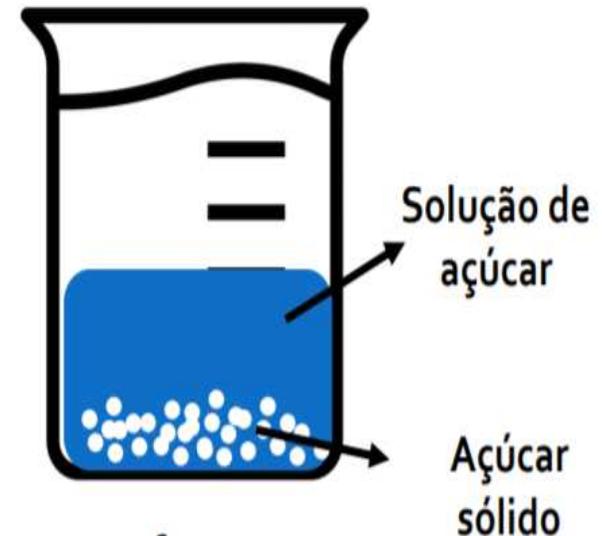
1 fase

2 componentes que se misturam completamente formando 1 fase.



2 fases

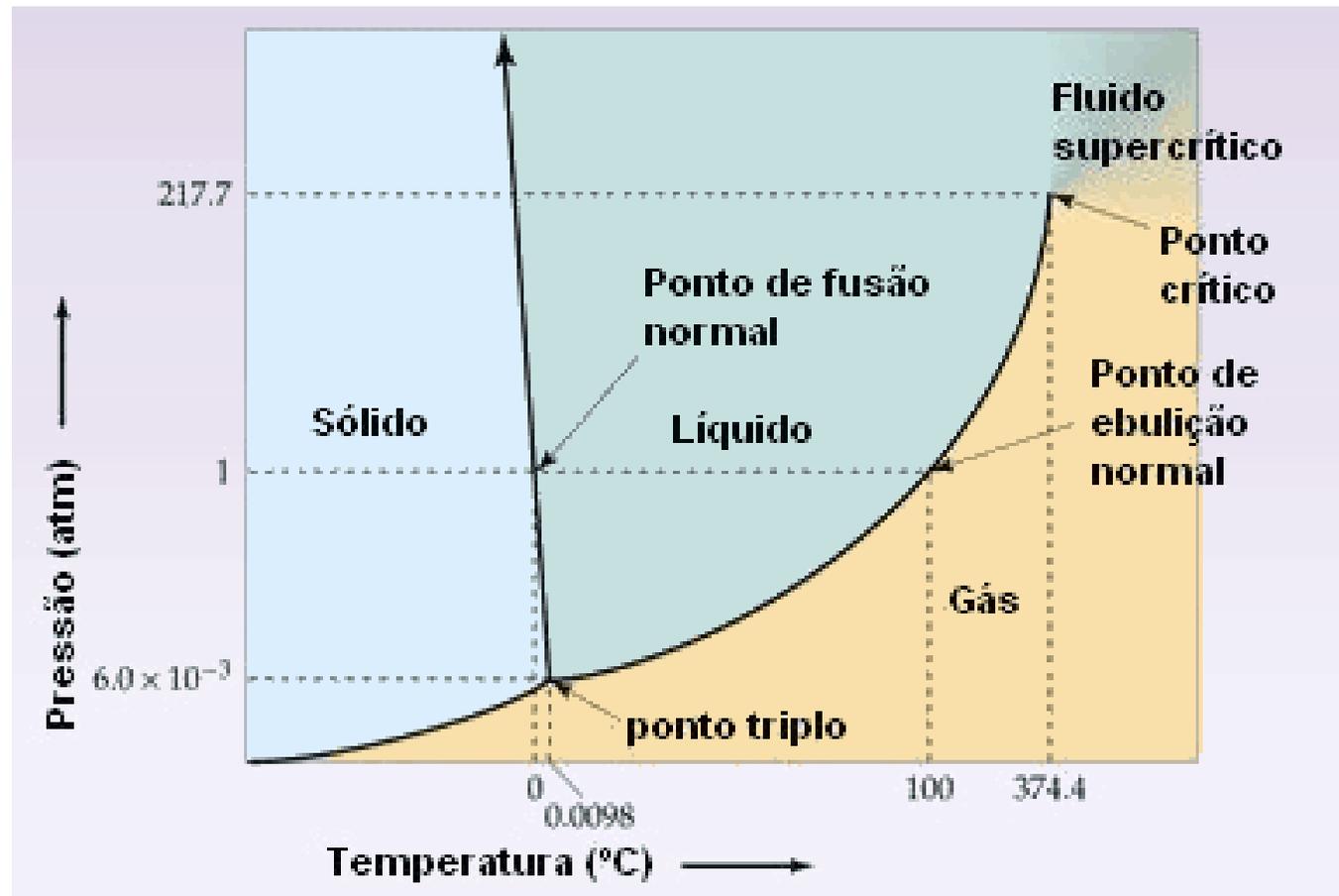
2 componentes que não se misturam formando 2 fases distintas.



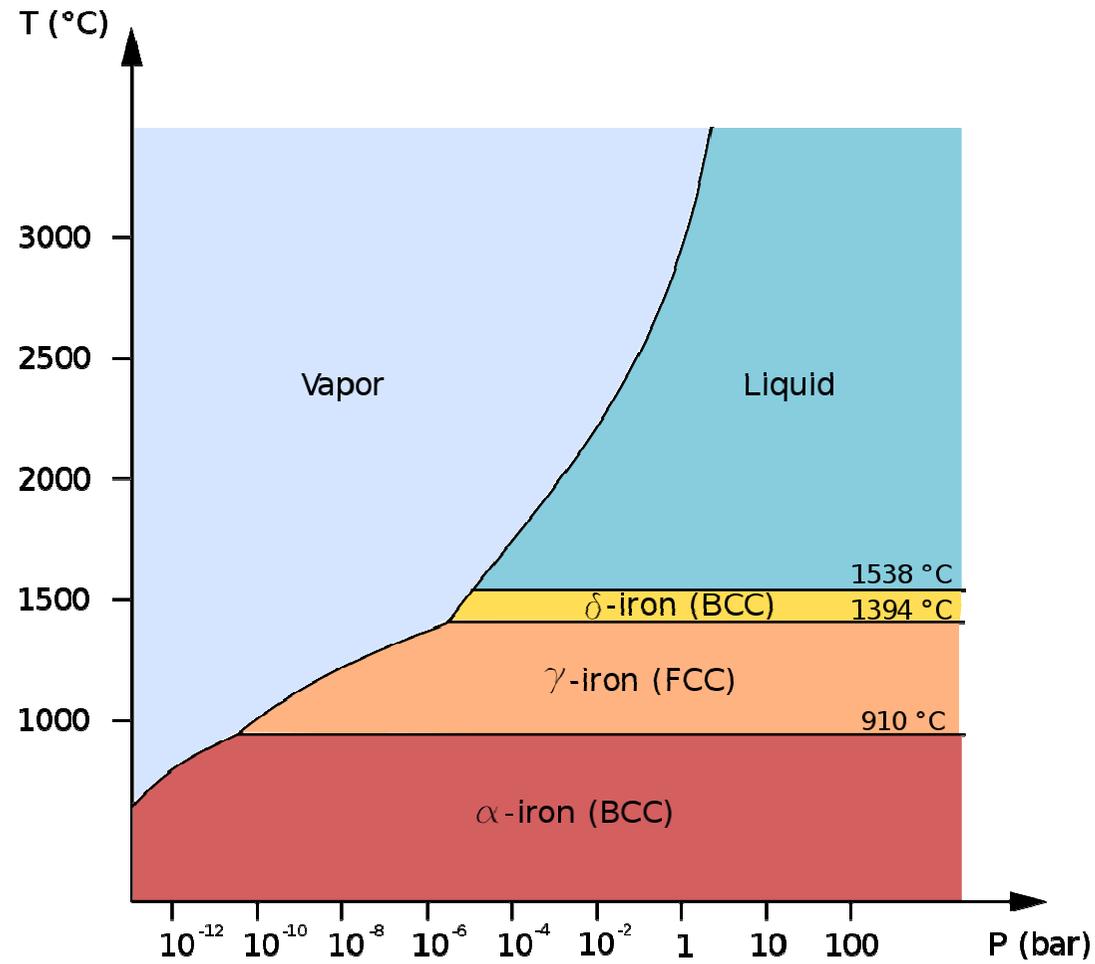
2 fases

2 componentes que se misturam parcialmente formando 2 fases.

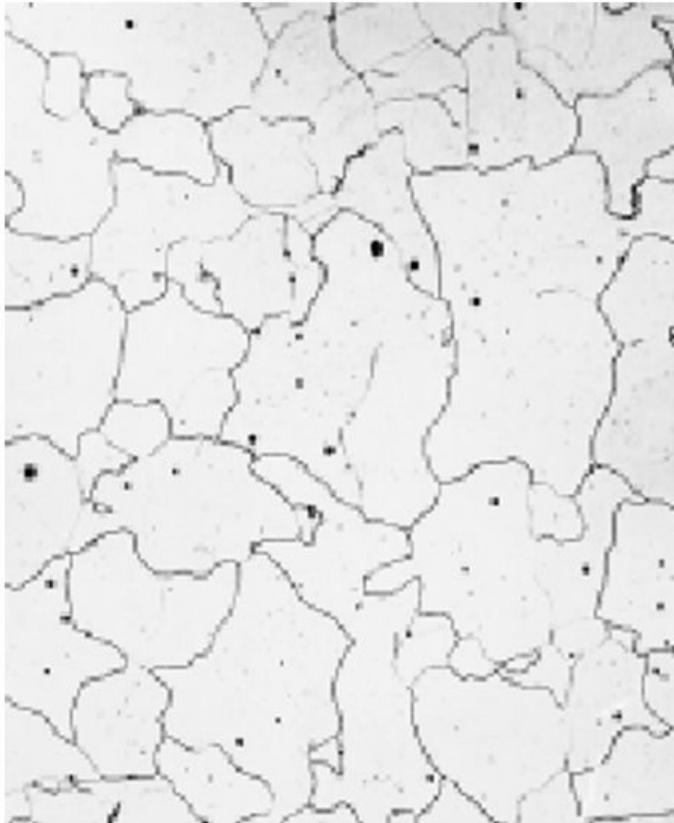
## Diagrama de fase de um componente – água



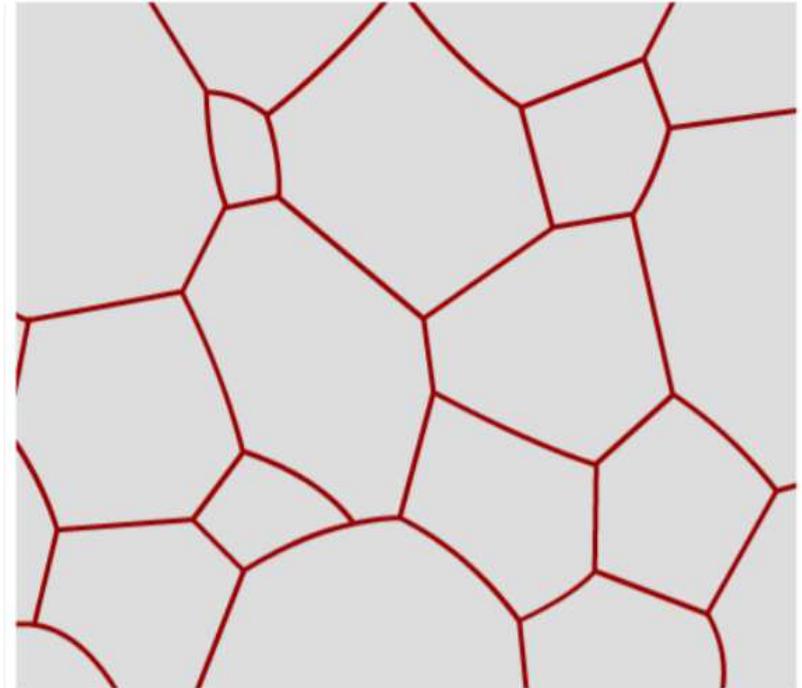
# Diagrama de fase de um componente – ferro



## Microestrutura (1 fase e 1 componente)



Microestrutura do ferro ( $\alpha$ ), ferrita  
aumento 90 X



## Regra das fases de Gibbs

$$P + F = C + N$$

$P$  = número de fases que coexistem no sistema

$C$  = número de componentes no sistema

$N$  = número de variáveis além da composição (temperatura e pressão)

$F$  = graus de liberdade (variáveis externas controláveis)

A regra das fases estabelece um critério para determinar o número de fases que coexistirão no sistema em equilíbrio.

## Aplicação das regras das fases ao ponto triplo da água:

► No ponto triplo coexistem 3 fases ( $P = 3$ ) em equilíbrio de um único componente ( $C = 1$ ), água e o diagrama apresenta duas variáveis ( $N = 2$ ) (temperatura e pressão). O grau de liberdade pode ser calculado:

$$P + F = C + 2$$

$$3 + F = 1 + 2$$

$$F = 0$$

Zero grau de liberdade, ou seja, nenhuma das variáveis ( temperatura ou pressão) podem ser alteradas, para que se mantenha a coexistência das três fases em equilíbrio. O ponto triplo é invariante.

► Considere um ponto na linha líquido-sólido. Em qualquer ponto sobre essa linha coexistem duas fases ( $P = 2$ ). Assim,

$$2 + F = 1 + 2$$

$$F = 1$$

Há um grau de liberdade, uma das variáveis (temperatura ou pressão) podem variar e o sistema manterá em coexistência as duas fases. Então, se for fixado uma pressão, haverá apenas uma determinada temperatura na qual ambas as fases (líquido e sólido) coexistirão.

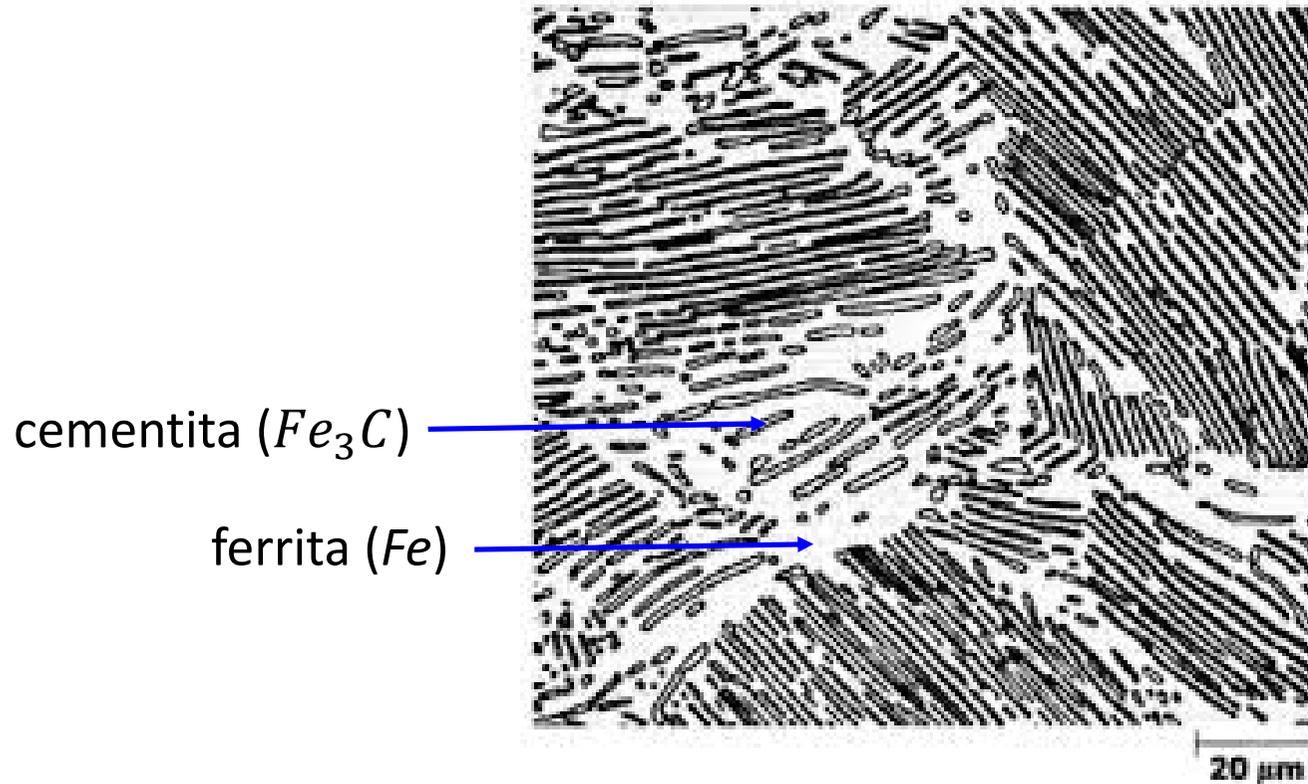
► Para o caso de um ponto no interior do diagrama dentro da região de uma única fase ( $P = 1$ ).

$$1 + F = 1 + 2$$

$$F = 2$$

Dois graus de liberdade, isto é, as duas variáveis podem ser variadas independentemente e o sistema se manterá como uma fase.

## Microestrutura (2 fases e 2 componentes)



**Perlita:** lamelas de cementita ( $Fe_3C$ ) em uma matriz de ferrita ( $\alpha$ )  
(liga (aço) Fe–C (0,76 % C))

Muitos dos diagramas de fases são binários, envolvendo dois componentes, onde são representados por um diagrama temperatura vs. composição. A pressão é mantida constante, usualmente a 1 atm. Neste caso,  $N = 1$  e a equação de regras das fases de Gibbs é simplificada e será dada por:

$$P + F = C + 1$$

# Diagramas de fases binários (ligas de dois metais)

## Sistemas isomorfos binários

Dois elementos devem ter solubilidade completa um no outro no estado sólido e líquido e seguir as seguintes regras (Regras de Hume – Rothery):

1. O tamanho dos átomos (diâmetro) de cada um dos dois elementos não podem diferir em 15 %,
2. Os elementos não podem formar compostos um com o outro, isto é, não devem apresentar diferenças apreciáveis na eletronegatividade,
3. Os elementos devem ter as mesmas valências,
4. A estrutura cristalina de cada um dos elementos deve ser a idêntica, que por sua vez deve permanecer a mesma na solução sólida.

DIAGRAMA

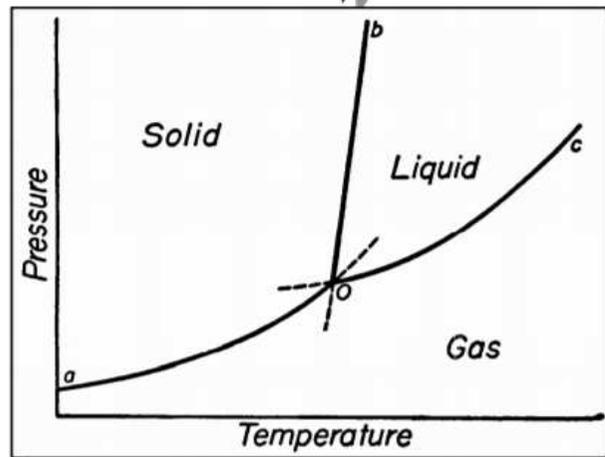


DE

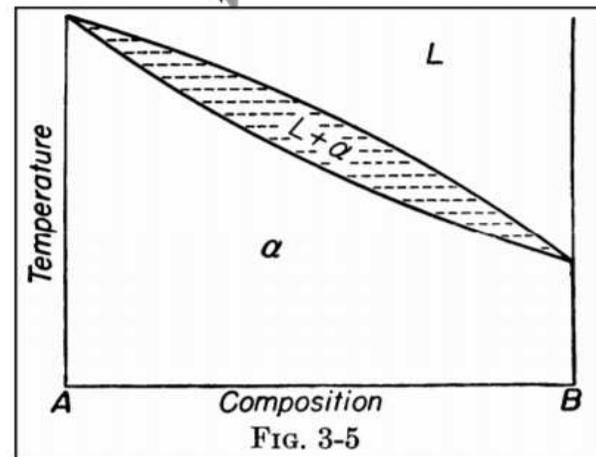
Variáveis termodinâmicas

- Pressão
- Temperatura
- Composição

FASE



Componente único, exemplo: Água



Dois componentes: A – B

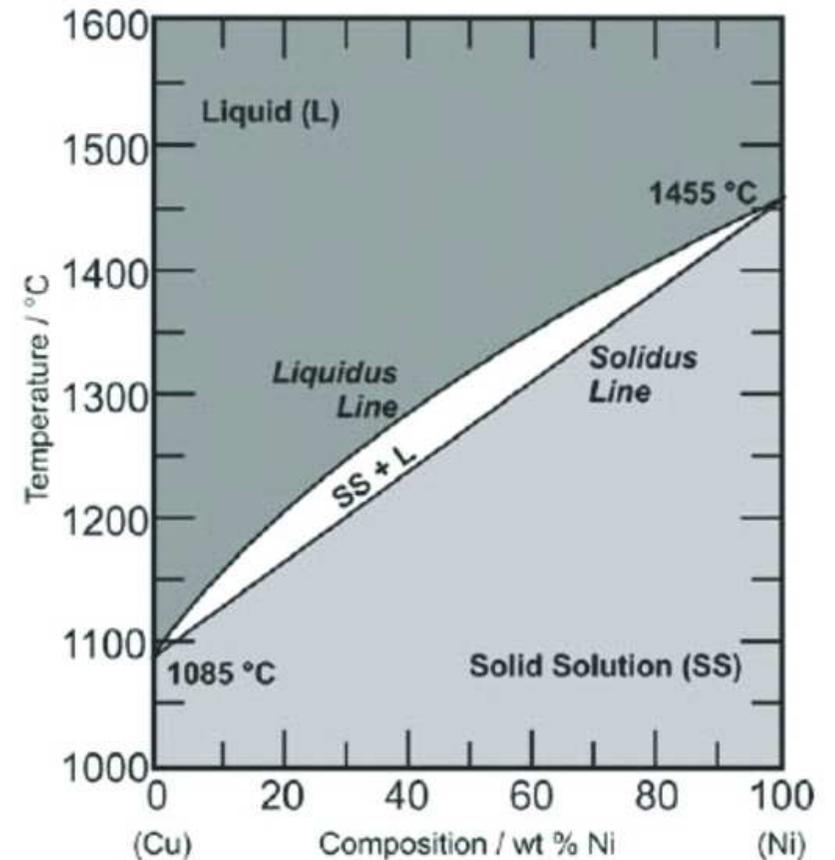
# Diagrama de fase Binário Cu-Ni

## *Sistema isomorfo:*

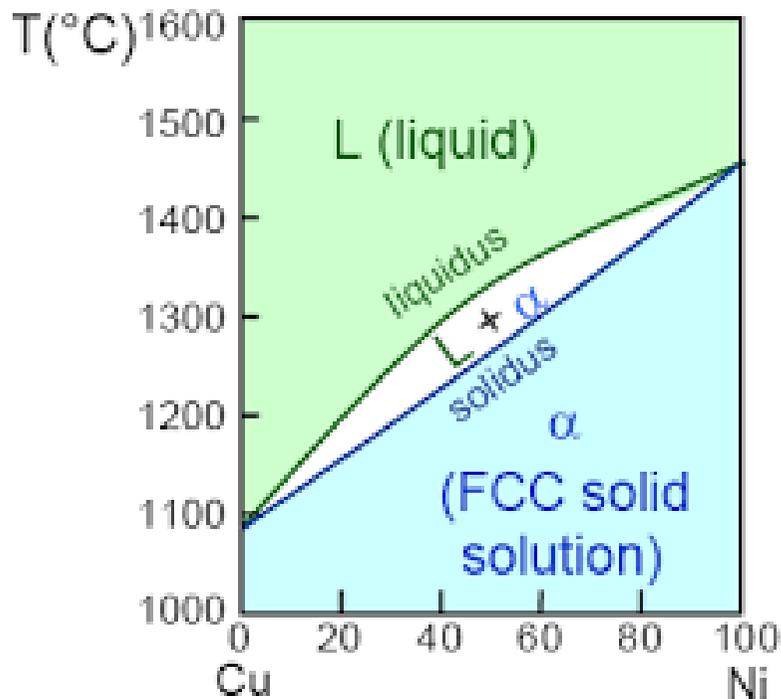
É o sistema binário mais simples onde ocorre um único tipo de estrutura cristalina para todas as proporções dos dois componentes totalmente miscíveis que compõe a liga, ou seja, para quaisquer proporções apresentam-se como soluções sólidas.

## Regra de Hume-Rothery

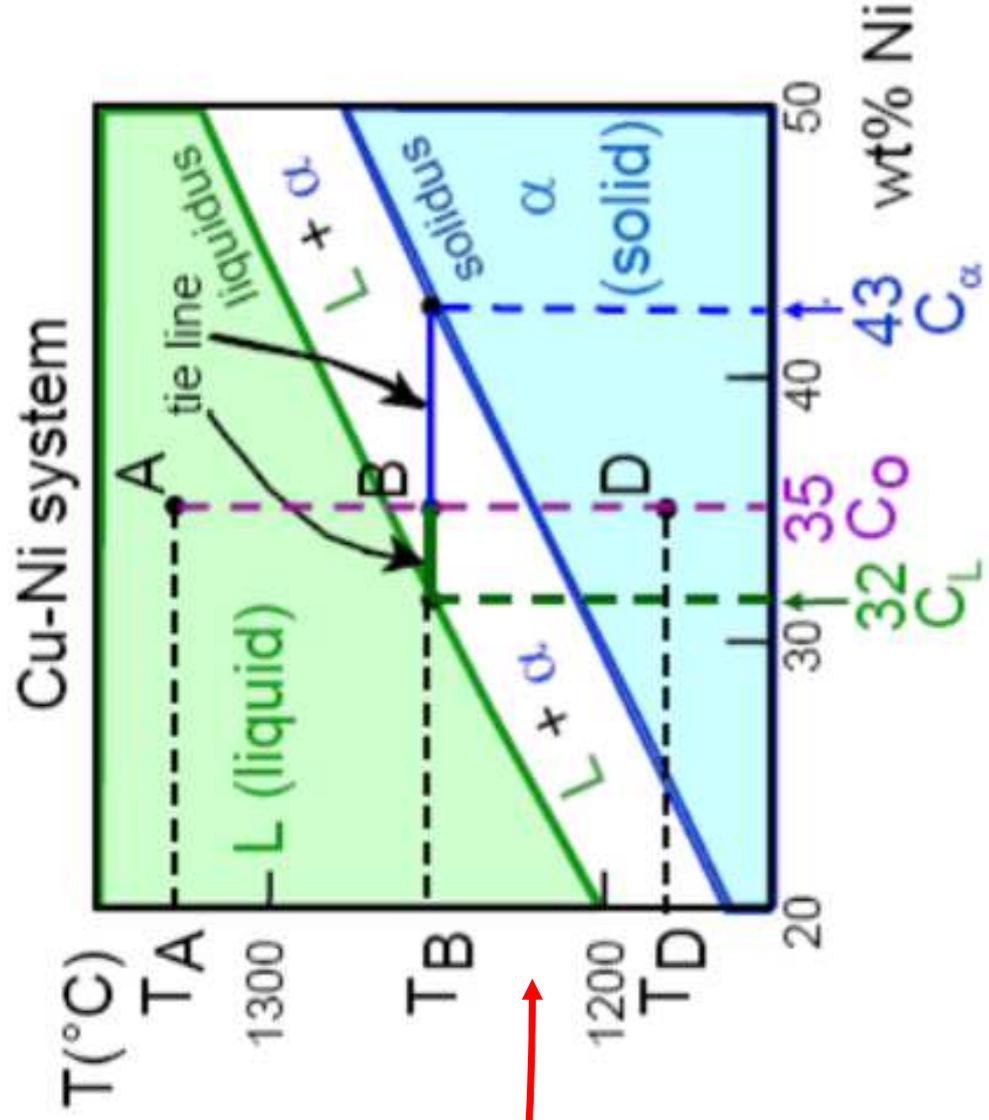
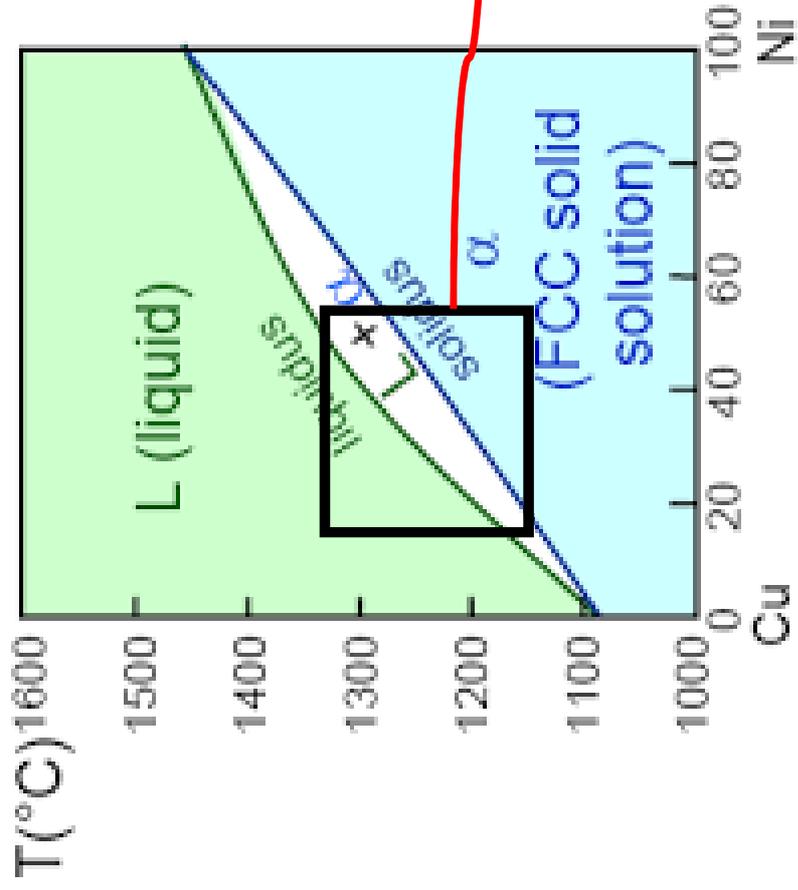
Compon.	Raio atômico	Mis-match	Estrut. crist.	Valên-cia	Eletro-neg.
Ni (solvente)	0,125 nm	2,3%	CFC	2+	1,9
Cu (soluto)	0,128 nm	2,3%	CFC	1+	1,9

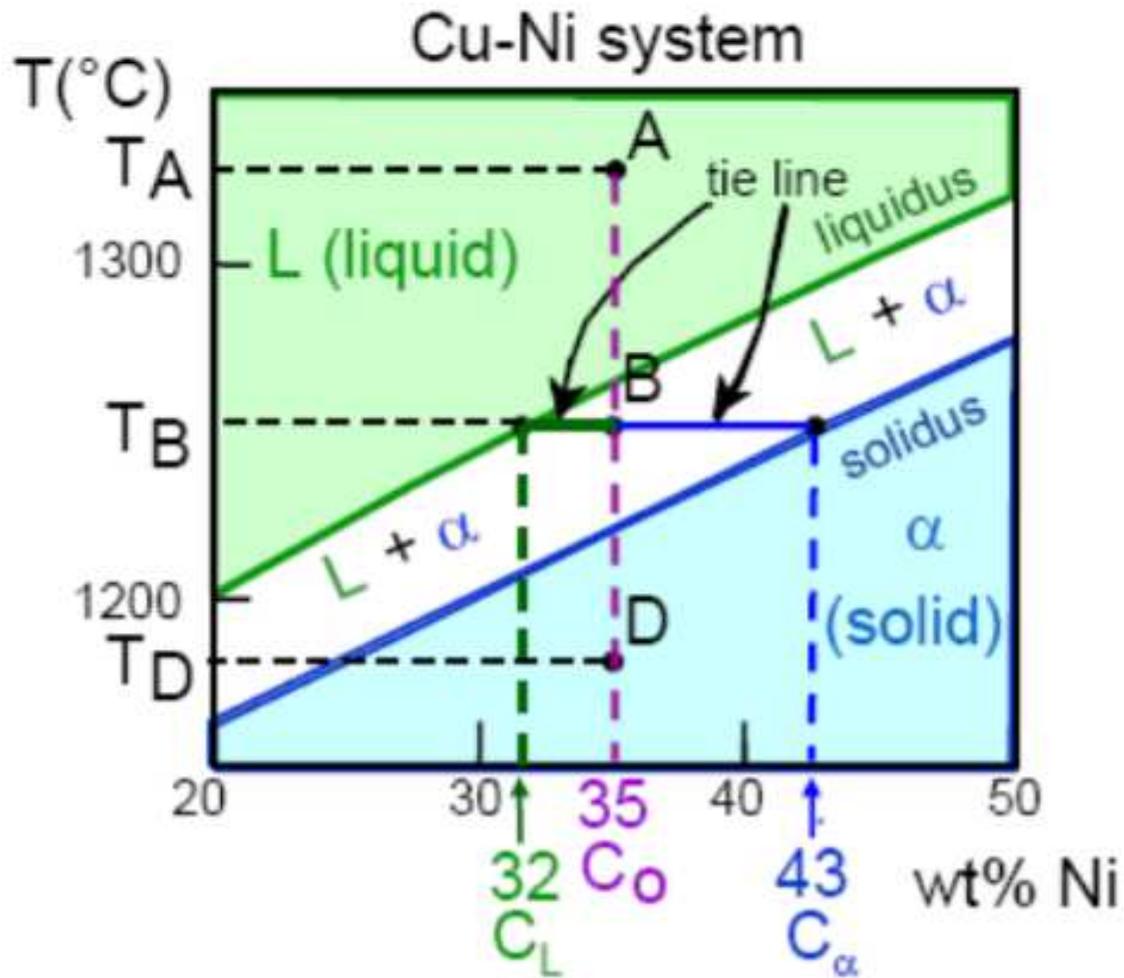


A liga cobre – níquel ( $C = 2$ ), satisfaz essas condições e representa um exemplo de liga binária isomórfica.



A área acima da linha superior do diagrama é chamada de *liquidus*, corresponde a região de estabilidade da fase líquida. A área abaixo da linha inferior, ou *solidus*, representa a região de estabilidade da fase sólida. A região entre as linhas *liquidus* e *solidus*, representa uma região de duas fases onde ambas fases líquida (L) e sólida ( $\alpha$ ) coexistem. Na temperatura de 1050 °C e 20 % de Ni, a microestrutura parece a mesma daquela do metal puro. A fase  $\alpha$  é uma solução sólida substitucional contendo Cu e Ni e possui uma estrutura cristalina CFC como a do Ni e do Cu puros.





### Composições:

- ◆ Em  $T_A$ : somente líquido (L)  
 $C_L = C_0 = 35\%$  Ni
- ◆ Em  $T_D$ : somente sólido ( $\alpha$ )  
 $C_\alpha = C_0 = 35\%$  Ni
- ◆ Em  $T_B$ : L +  $\alpha$   
 $C_L = 32\%$  Ni  
 $C_\alpha = 43\%$  Ni







