



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Escola Politécnica

DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Ciência dos Materiais

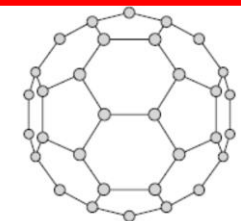
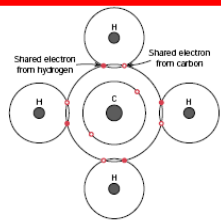
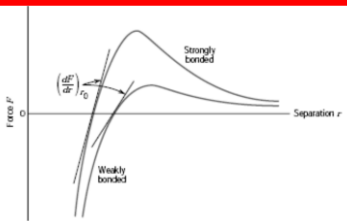
Unidade II

Falhas em Materiais, Mecanismos de Aumento de Resistência, Diagramas de Fases

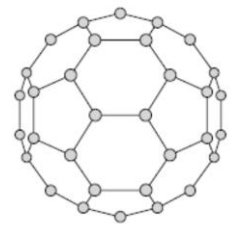
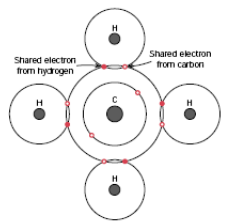
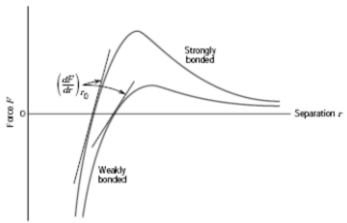
Prof. Dr. Marcelo Strozi Cilla

marceloscilla@gmail.com

IA		IIB																III										IV										V										VI										VII										VIII										IX										X										XI										XII																																																																																																																																			
H		Li		Na		K		Rb		Cs		Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr		La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr		Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe		Ba		La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn		Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr	

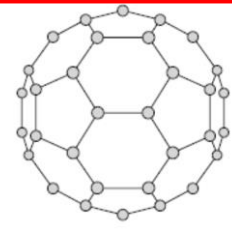
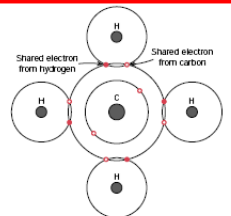
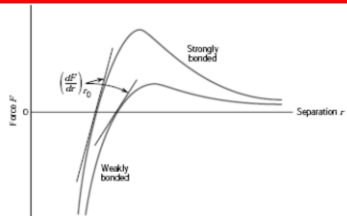


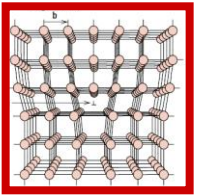
IA		IIA										IIIB										IIIC										IIV										IIV										IIB																																																																																																																																																																																											
IA		IIA										IIIB										IIIC										IIV										IIV										IIB																																																																																																																																																																																											
1	H	2	He	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe	55	Cs	56	Ba	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	Lv	103	Uu	104	Ll	105	Uub	106	Llc	107	Uuc	108	Llu	109	Uub	110	Uut	111	Uuq	112	Uuq	113	Uuq	114	Uuq	115	Uuq	116	Uuq	117	Uuq	118	Uuq	119	Uuq	120	Uuq



Tipos e Mecanismos de Fratura

IA		IIA										IIIB										IIIC										IIV										IIV										IIB																																																																																																																																																																																											
IA		IIA										IIIB										IIIC										IIV										IIV										IIB																																																																																																																																																																																											
1	H	2	He	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe	55	Cs	56	Ba	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	Lv	103	Uu	104	Ll	105	Uub	106	Llc	107	Uuc	108	Llu	109	Uub	110	Uut	111	Uuq	112	Uuq	113	Uuq	114	Uuq	115	Uuq	116	Uuq	117	Uuq	118	Uuq	119	Uuq	120	Uuq



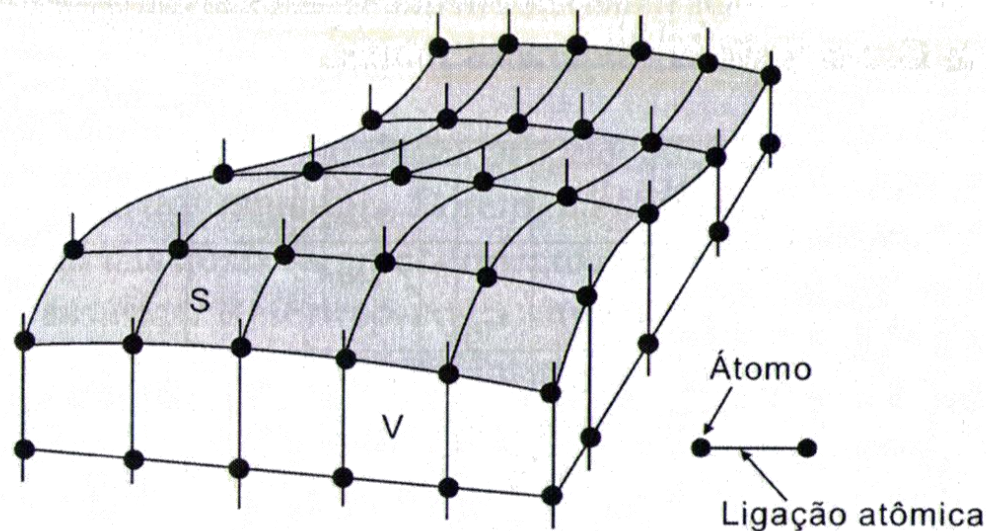


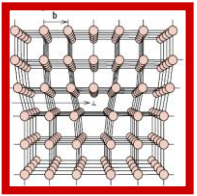
Fratura

- Energia de fratura (G) X Energia Superficial (γ)

$$G \geq 2.\gamma$$

- γ tem origem nas ligações atômicas de ligação interrompidas, isto é, f(densidade atômica)

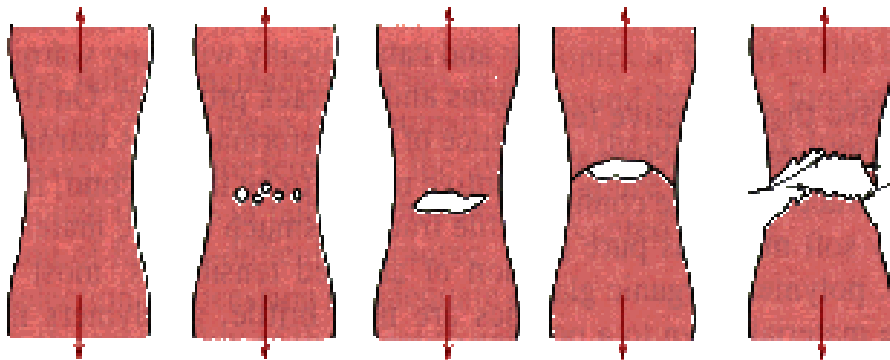


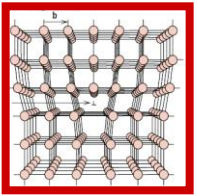


Fratura

- **Fratura Dúctil:**

- o material se deforma substancialmente antes de fraturar;
- O processo se desenvolve de forma relativamente lenta à medida que a trinca propaga;
- Este tipo de trinca é denominada estável, pois ela resiste a qualquer extensão adicional a menos que exista um aumento na tensão aplicada.



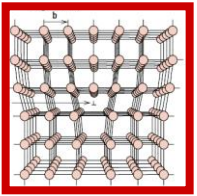


Fratura

- **Fratura Frágil:**

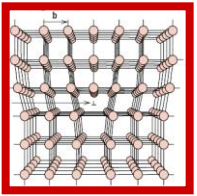
- o material se deforma pouco, antes de fraturar;
- O processo de propagação pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas;
- A partir de um certo ponto, a trinca é dita instável, pois ela se propagará mesmo sem aumento na tensão aplicada.



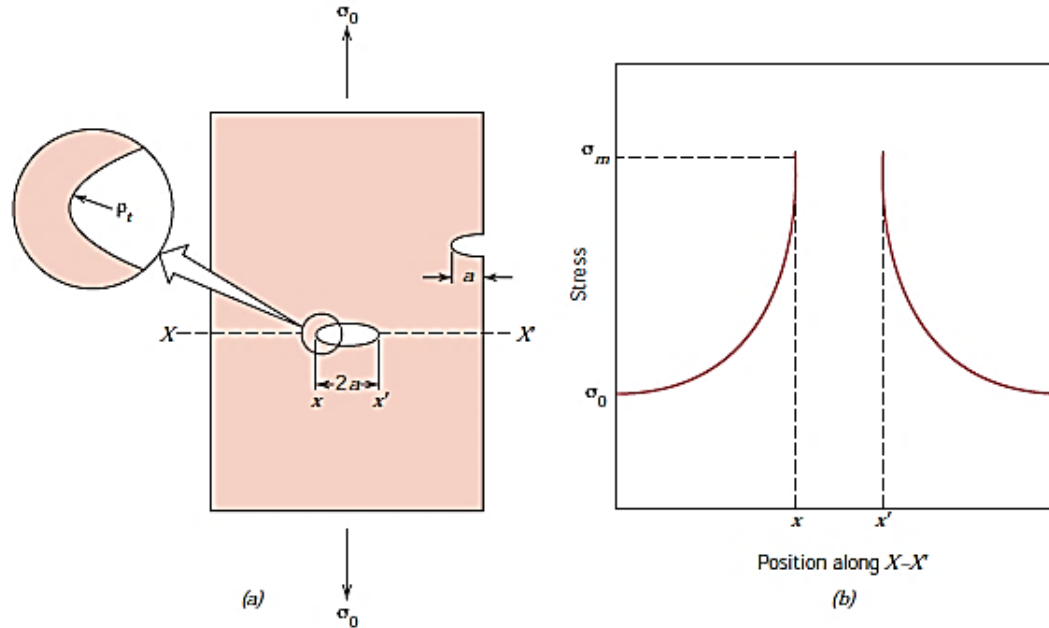


Mecânica da Fratura

- A resistência à fratura de um material sólido é uma função das forças de coesão que existem entre os átomos;
- Resistência coesiva teórica = $E/10$
 - Valor real = 10 a 1000 vezes menor
- Concentração de Tensões
 - Presença de Defeitos (poros, trincas ou imperfeições);
 - f (geometria e orientação da trinca).



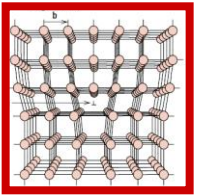
Mecânica da Fratura



- Trinca com formato elíptico;
- Fator de concentração de tensões (K_t).

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$



Mecânica da Fratura

- Teoria de Griffith

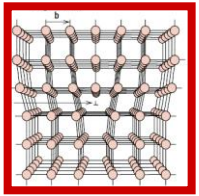
- Todos os materiais frágeis possuem uma grande quantidade de defeitos e trincas;
- A fratura ocorrerá quando a resistência à tração teórica do material for excedida na extremidade de um desses defeitos;
- A tensão crítica exigida para a propagação da trinca:

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

E = módulo de elasticidade

γ_s = energia superficial específica

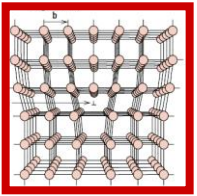
a = metade do comprimento de uma trinca interna



Fadiga

- Falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes;
- É possível a ocorrência de uma falha em um nível de tensão consideravelmente abaixo do LRT e ao limite de escoamento para uma carga estática;
- Ocorre normalmente após um longo período de tensão repetitiva ou ciclo de deformação;
- É responsável por cerca de 90% das falhas metálicas;
- É catastrófica e traiçoeira (frágil).





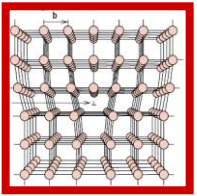
Fadiga

- **Ensaio de fadiga: diversas normas.**

- Normas ASTM:

- E466 Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.
- E467 Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System.
- E468 Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials.
- E606 Strain-Controlled Fatigue Testing.
- E647 Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- E739 Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (S-N) Fatigue Data.





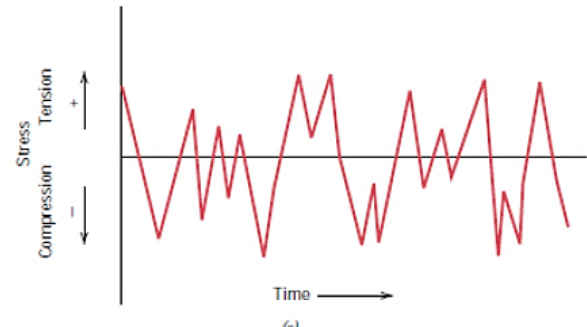
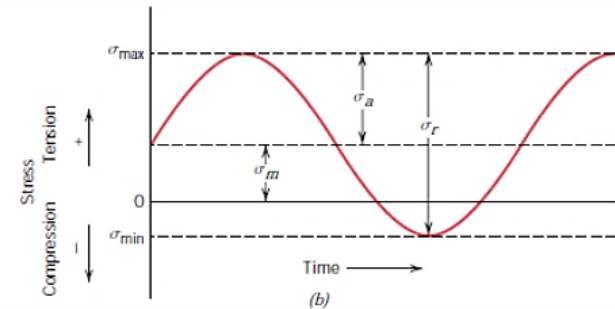
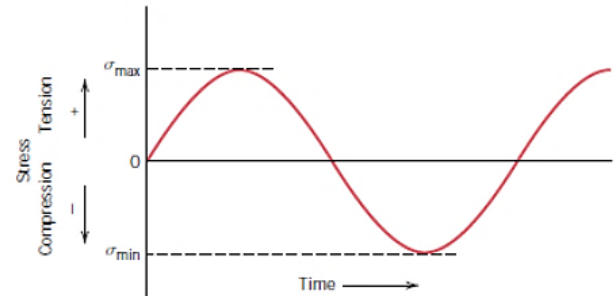
Fadiga

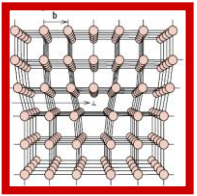
- Modalidades de tensão oscilante-tempo.

- Ciclo de Tensões Alternadas
(simetria: $\sigma_m = 0$)

- Ciclo de Tensões Repetidas
(assimetria: $\sigma_m \neq 0$)

- Ciclo de Tensões Aleatórias





Fadiga

• Tensões Cíclicas

- Tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Convenção:

tração → +

comp. → -

- Faixa de tensão:

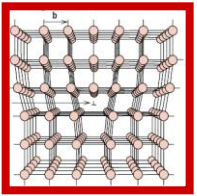
$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

- Amplitude de tensão:
(tensão alternada)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

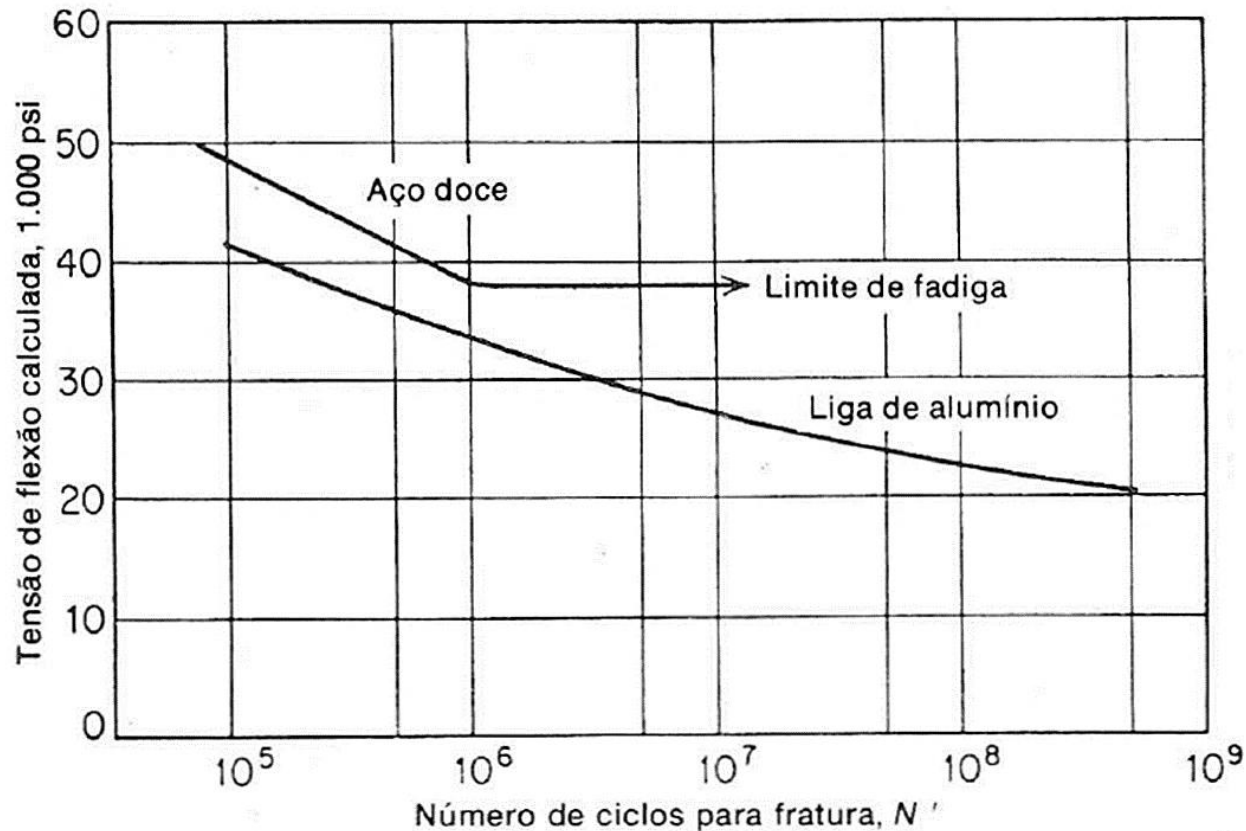
- Razão de tensão:

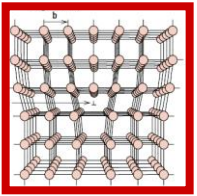
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



Fadiga

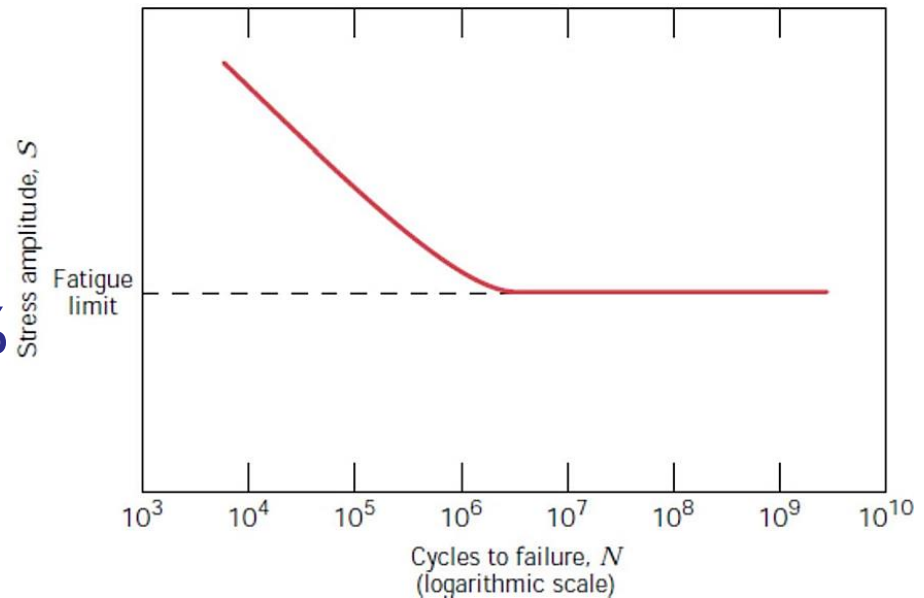
- Comportamento Tensão - N° de ciclos ($\sigma - N$)
- 2 Tipos Possíveis: com ou sem limite de fadiga.

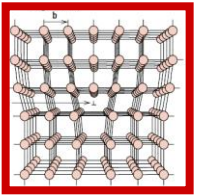




Fadiga

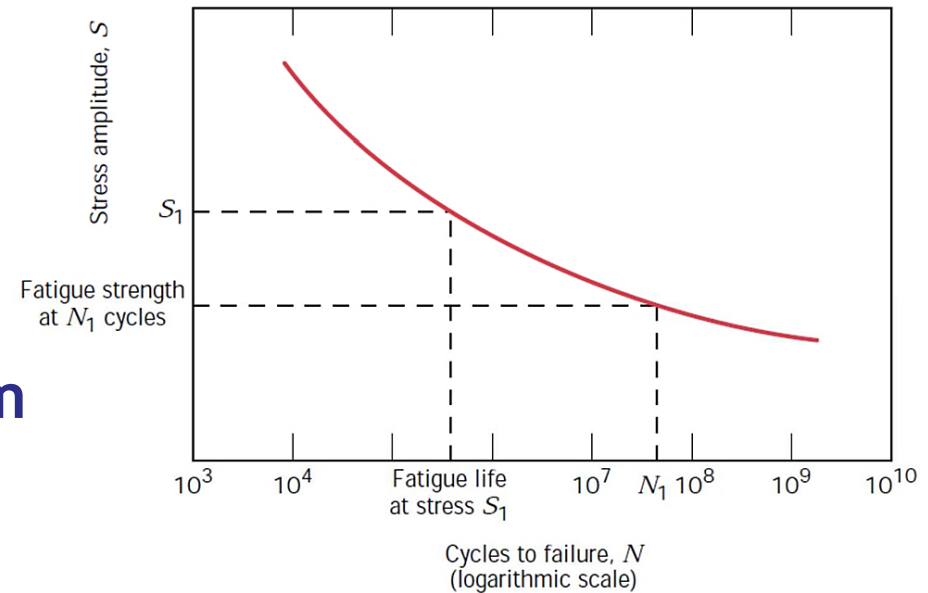
- **Limite de fadiga:** abaixo desse valor de tensão, não irá ocorrer falha
- Para vários tipos de aços: limite por volta de 35-60 % da tensão de escoamento.
- Limite de fadiga observado em aços e ligas a base de Ti.

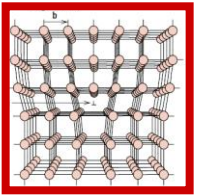




Fadiga

- Materiais que geralmente não apresentam limite de fadiga: ligas a base de Al, Cu e Mg.
- Nesses casos, definimos um **valor de resistência à fadiga em X ciclos** ou **de vida em fadiga sob tensão X**.



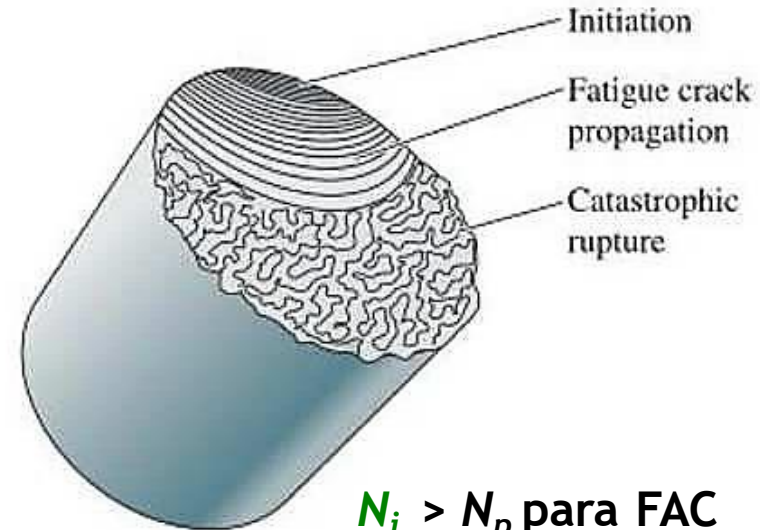


Fadiga

- **Etapas da Falha por Fadiga**

- Iniciação da Trinca;
- Propagação da Trinca;
- Fratura Catastrófica.

- **Vida em Fadiga (iniciação + propagação)**



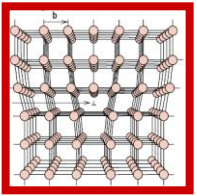
$N_i > N_p$ para FAC
 $N_p > N_f$ para FBC

$$N = N_i + N_p$$

Ciclos necessários para
iniciação da trinca

Ciclos necessários para
propagação da trinca

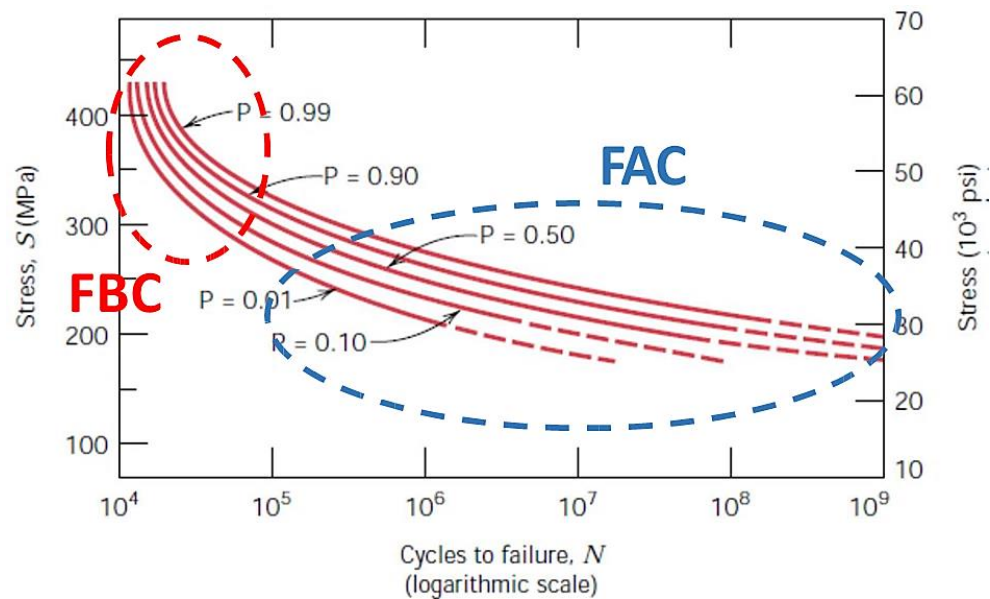
- **Comumente se iniciam na superfície devido a um concentrador de tensões.**

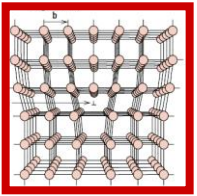


Fadiga

- Classificação do comportamento em fadiga:
- **Fadiga de baixo ciclo (FBC):** 10^4 a 10^5 ciclos, associada com deformações elásticas e plásticas, altas tensões.
- **Fadiga de alto ciclo (FAC):** $> 10^5$ ciclos, apenas deformações elásticas envolvidas, grande número de ciclos.

Resultados para liga
de alumínio 7075-T6



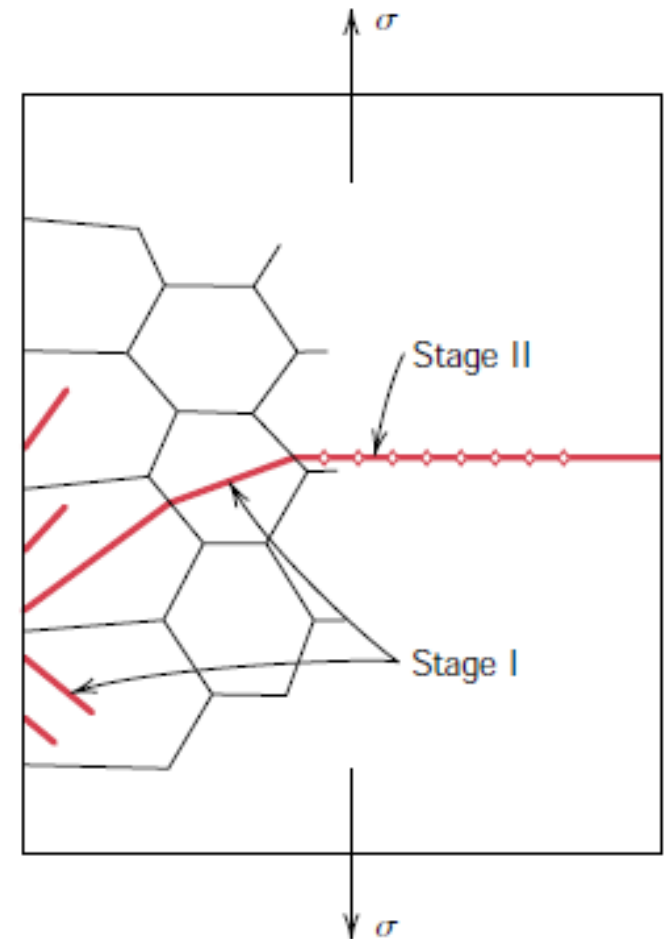


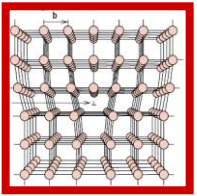
Fadiga

• Estágios de Propagação da Trinca

- Estágio I:

- Propagação lenta em planos cristalográficos sob alta tensão de cisalhamento;
- Alta tensão aplicada e/ou alta concentração de tensão diminui o número de ciclos nesse estágio;
- Superfície de fadiga possui aparência plana.



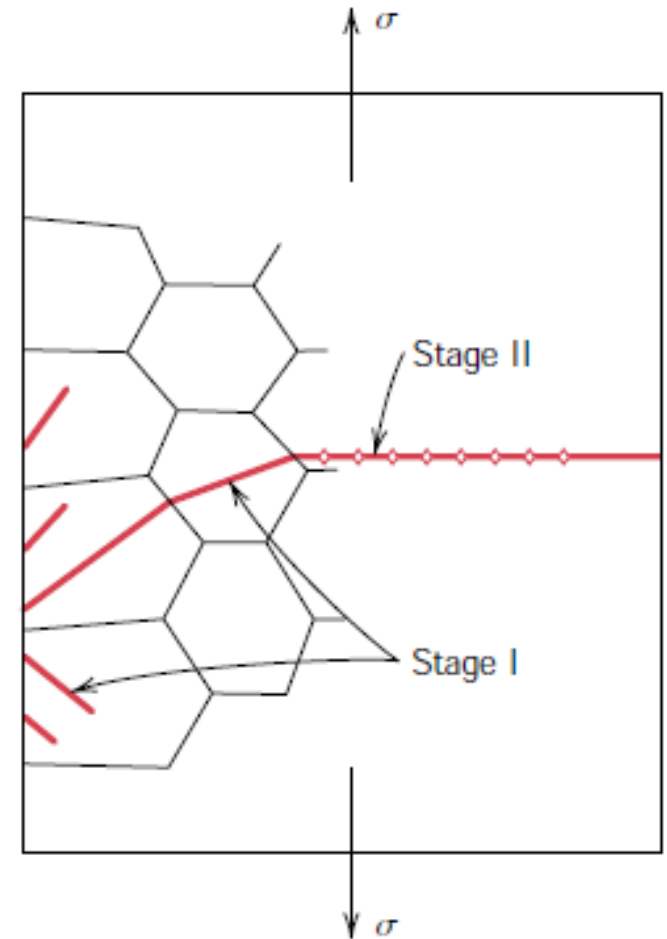


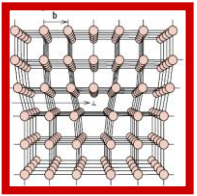
Fadiga

• Estágios de Propagação da Trinca

- Estágio II:

- Taxa de extensão da trinca aumenta significativamente.
- Mudança de direção da trinca para direção aprox. perpendicular a tensão aplicada.
- Trinca propaga-se geralmente de forma transgranular;
- No estágio II, dois tipos de marcas são formadas na superfície de fratura: **estrias** e **marcas de praia**

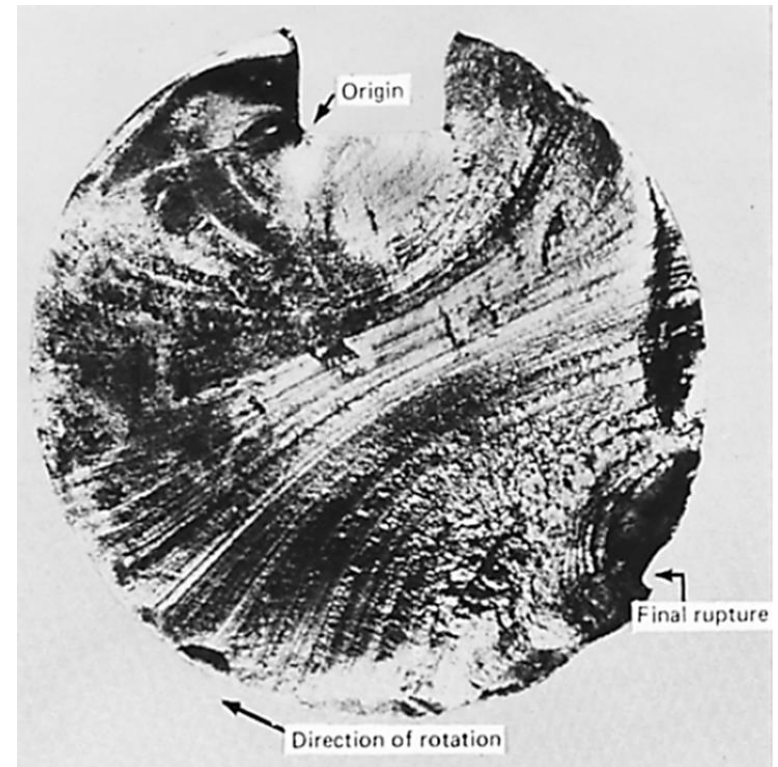


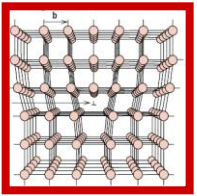


Fadiga

- **Marcas de praia**

- Pode ser observada com os olhos;
- Marcas concêntricas a origem da fratura;
- Causadas por carregamentos interrompidos, e.g. máquina sendo ligada e desligada.



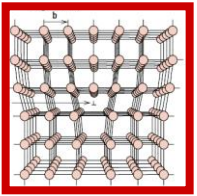


Fadiga

- **Estrias de fadiga**

- microscópicas = requer observação em microscópio.
- Cada marca de praia é composta por várias estrias.
- Resulta do avanço incremental da trinca durante estágio II.





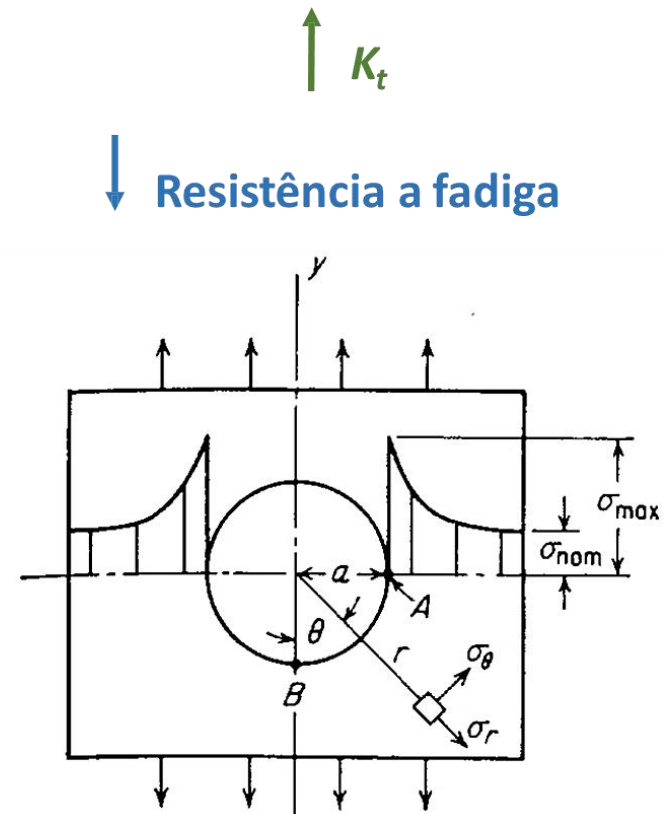
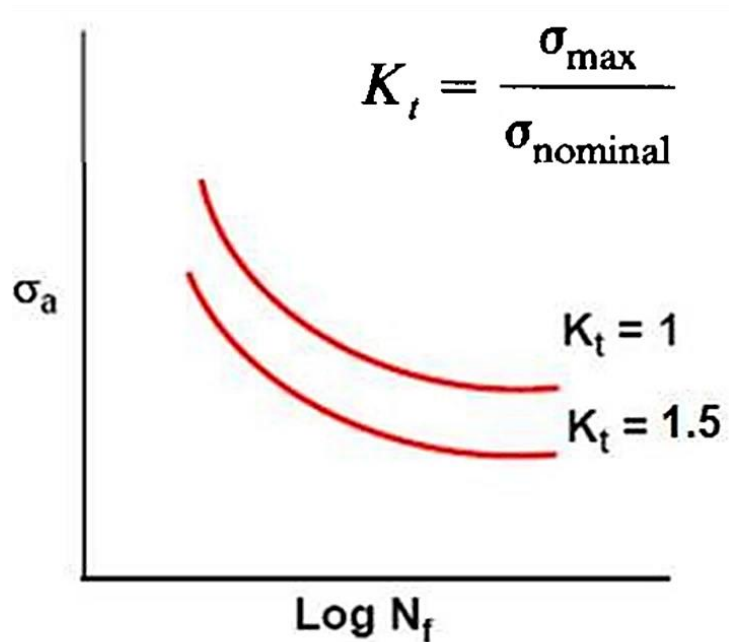
Fadiga

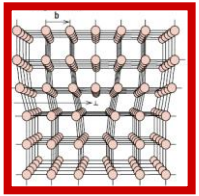
- Fatores que influenciam a Vida em Fadiga

- Tensão Média

$\uparrow \sigma_m \rightarrow \downarrow N_f$

- Concentração de tensão





Fadiga

- Fatores que influenciam a Vida em Fadiga

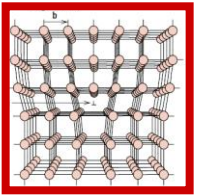
- Tamanho ↑ Tamanho ↓ Resistência a fadiga

Maior tamanho: i) maior área superficial, maior probabilidade de encontrar defeitos

Escala experimental \neq escala industrial

Tabela 12.2 Limite de fadiga de aço-carbono normalizado em flexão alternada

<i>Diâmetro da amostra, mm</i>	<i>Limite de fadiga kgf/mm²</i>
7,62	25,30
38,10	20,40
152,40	14,80



Fadiga

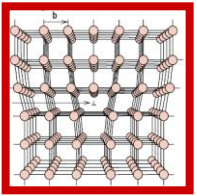
- **Fatores que influenciam a Vida em Fadiga**

- **Efeitos do Ambiente**

Fadiga térmica: Ocorre quando o metal é sujeito a temperaturas variantes, produzindo tensão térmicas cíclicas → restrições a mudança no volume.

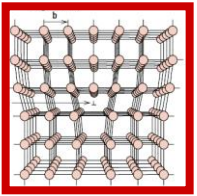
choque térmico \neq fadiga térmica.

Fadiga associada à corrosão: ocorre quando o material é sujeito a tensão cíclica em ambientes corrosivos; corrosão produz cavidades (pitting) na superfície que atuam como concentradores de tensão.



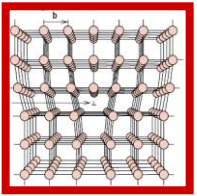
Fluência

- Problemas de metais a temperaturas elevadas:
- Maior mobilidade atômica: processos controlados por difusão.
- Mudanças microestruturais: transformação de fases, crescimento dos grãos, precipitação, oxidação, recristalização.
- Maior mobilidade de discordâncias: **escalagem (movimentação fora do plano de deslizamento)**.
- Sistemas de escorregamento mudam ou novos sistemas passam a ocorrer.
- Resistência mecânica dependente da taxa de deformação e tempo de exposição.



Fluência

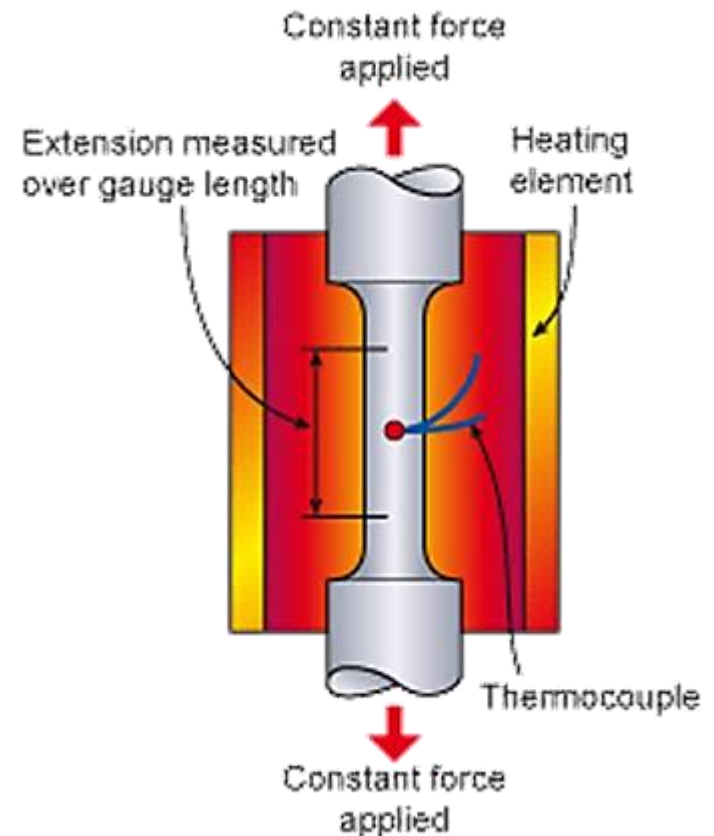
- **Fluência:** ocorre quando o material é sujeito a uma carga constante a temperaturas elevadas → def. dependente do tempo.
 - Acontece geralmente para temperaturas acima de $0.5 T_m$.
 - Temperatura homóloga: razão entre a temperatura atual e a temperatura de fusão (T_m).
- **Dois tipos de teste: teste de fluência e de ruptura.**
 - **Teste de fluência:** mede as mudanças dimensionais quando o material é sujeito a altas temperaturas.
 - **Teste de ruptura:** similar ao teste de fluência, com a exceção de que o teste é conduzido até a ruptura do material.

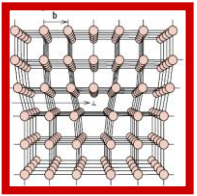


Fluência

Um ensaio típico de fluência consiste em submeter um corpo-de-prova a uma carga ou tensão constante, ao mesmo tempo em que se mantém a temperatura constante.

Este teste é conduzido através da aplicação de uma carga constante (tração) a uma determinada temperatura (*ASTM E139 - 11 - Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials*).

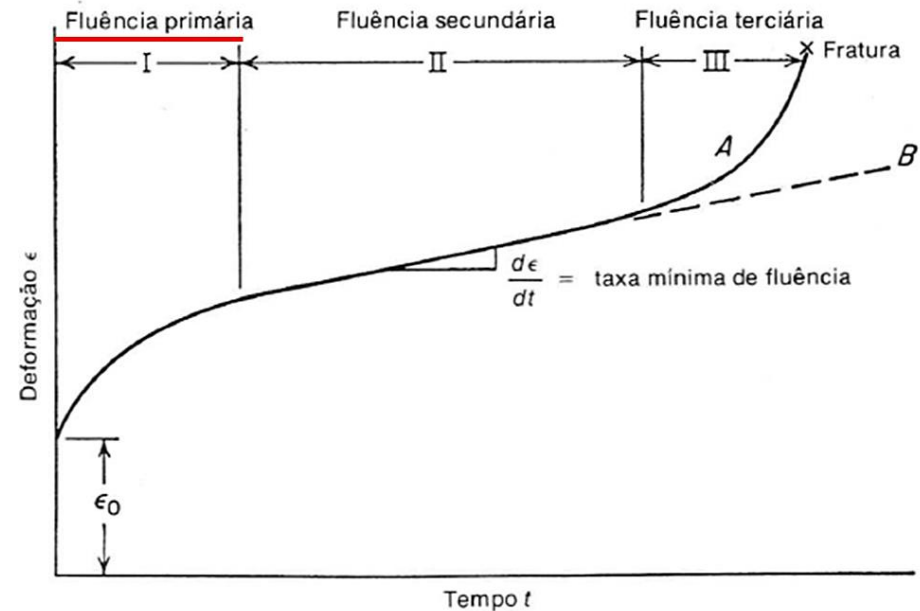




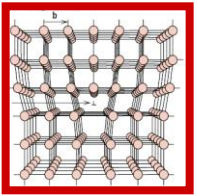
Fluência

• Fluência Primária

- i. Ocorre depois de uma deformação instantânea ϵ_0 .
- ii. Diminuição progressiva da taxa de fluência.
- iii. A resistência a fluência aumenta devido ao encruamento.



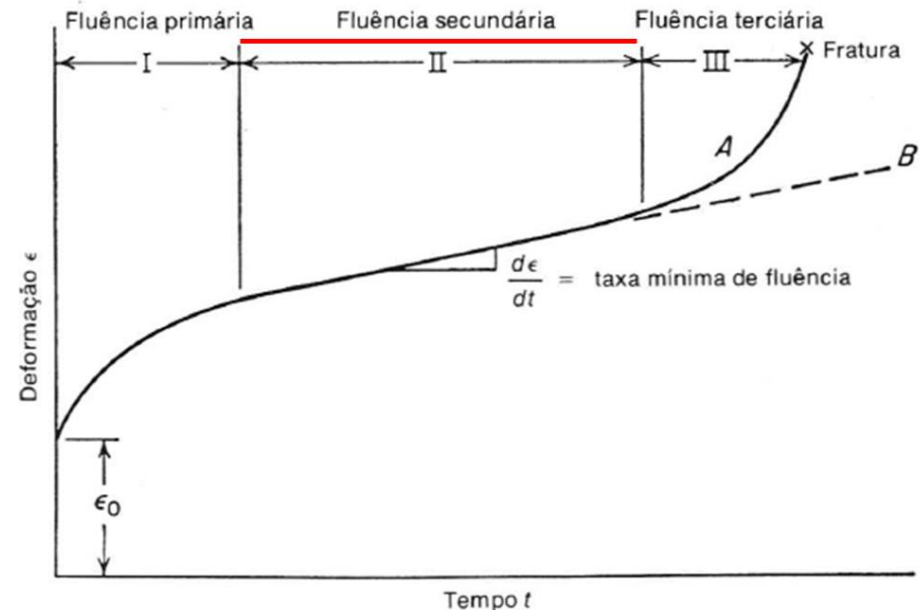
Curva típica de fluência



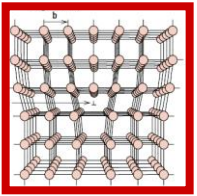
Fluência

- **Fluência Secundária (estado estacionário)**

- Taxa de fluência constante, chamada taxa de fluência mínima.
- Balanço entre encruamento e recuperação.



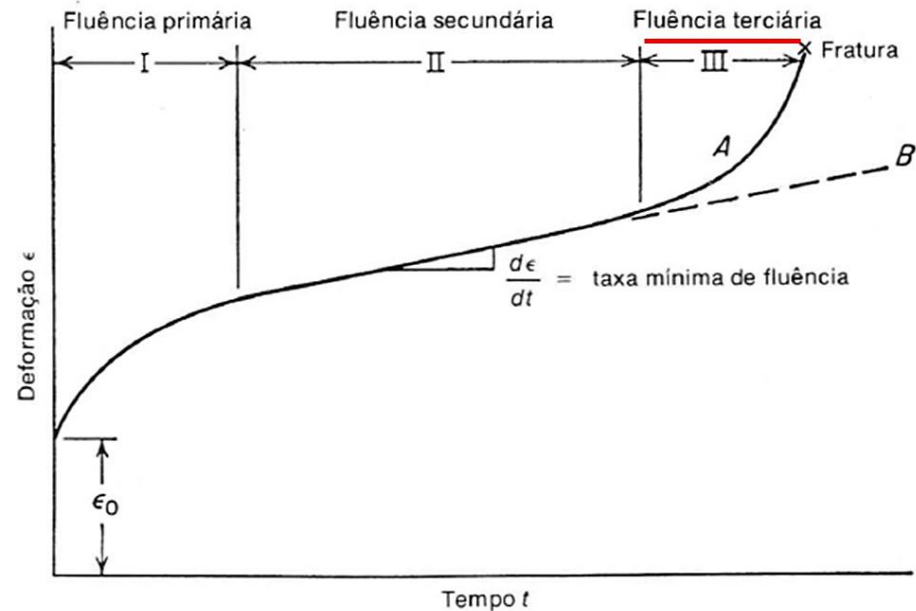
Curva típica de fluência



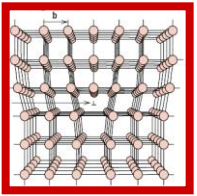
Fluência

• Fluência Terciária

- i. Rápido aumento da taxa de fluência.
- ii. Redução da área da secção transversal da amostra e formação de vazios internos nos contornos.
- iii. Mudanças microestruturais como crescimento de precipitados, recristalização, etc.



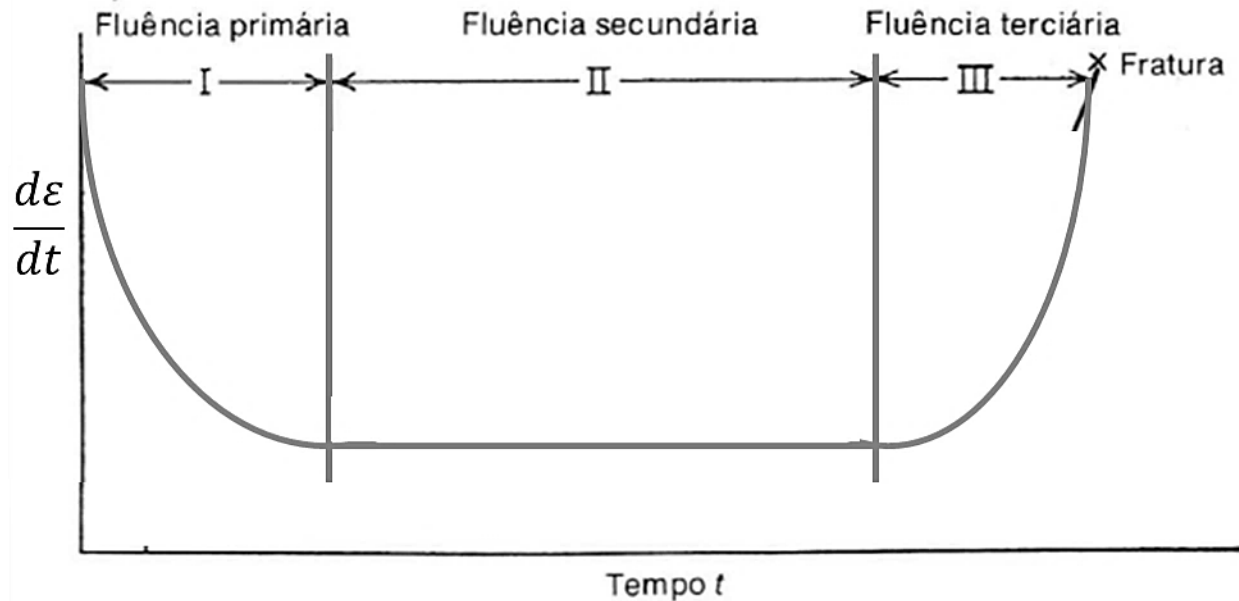
Curva típica de fluência



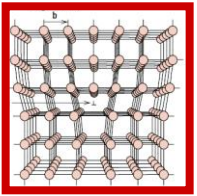
Fluência

- Taxa de Fluência

- A taxa de fluência em regime estacionário ($d\varepsilon/dt$) é constante durante o estágio II



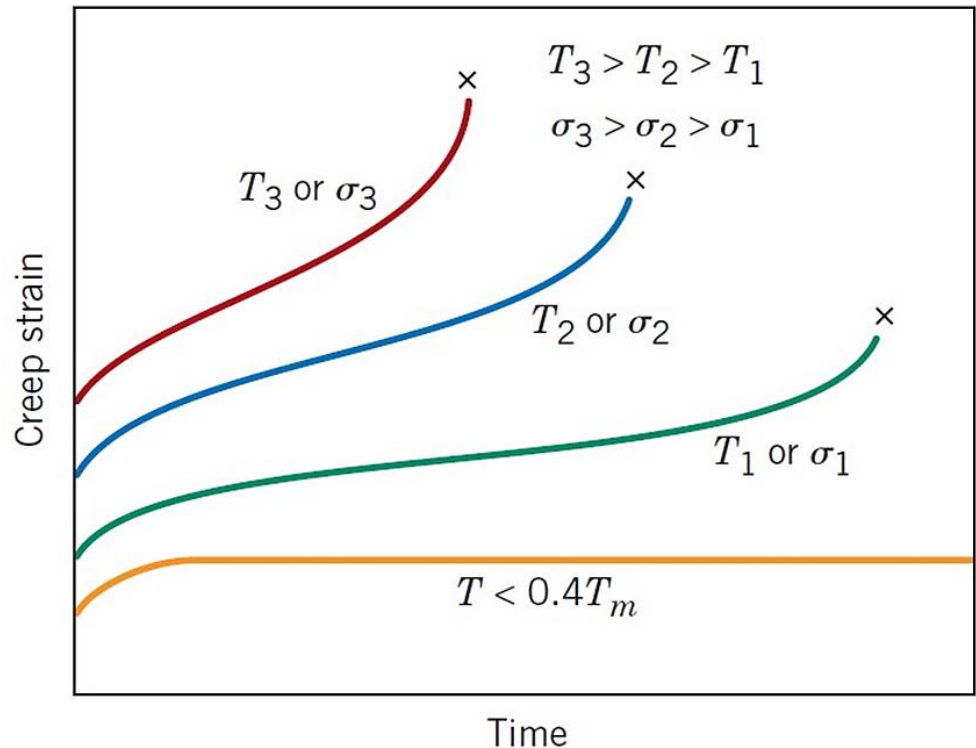
Comportamento da taxa de fluência



Fluência

• Efeito da tensão e da temperatura

- Maior tensão aplicada e maior temperatura → maior deformação instantânea, maior taxa de deformação mínima e menor tempo para ruptura.
- Fluência acontece mais rapidamente a altas temperaturas pois taxa de difusão é maior.
- Maior tensão, maior força motriz para movimentação de discordâncias.





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

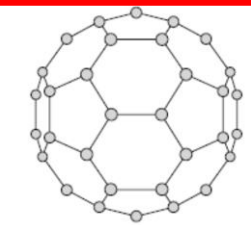
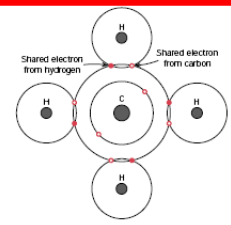
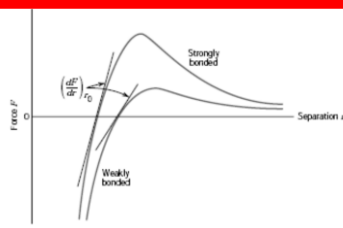
Escola Politécnica

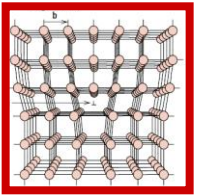
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Mecanismos de Aumento da Resistência

“restringir ou impedir o movimento de discordâncias confere maior dureza e mais resistência ao material”.

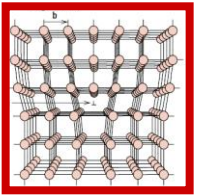
Key		Elemental																Intermetallic																																																																																																																																																																																																																									
Color		Metal																Nonmetal																																																																																																																																																																																																																									
Symbol		Metal																Nonmetal																																																																																																																																																																																																																									
1	H	2	He	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Au	48	Hg	49	Tl	50	Pb	51	Bi	52	Po	53	At	54	Rn	55	Cs	56	Ba	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tm	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Mendelevium	102	Nobelium	103	Lutetium	104	Rutherfordium	105	Dubnium	106	Rutherfordium	107	Dubnium	108	Rutherfordium	109	Dubnium	110	Rutherfordium	111	Dubnium	112	Rutherfordium	113	Dubnium	114	Rutherfordium	115	Dubnium	116	Rutherfordium	117	Dubnium	118	Oganesson





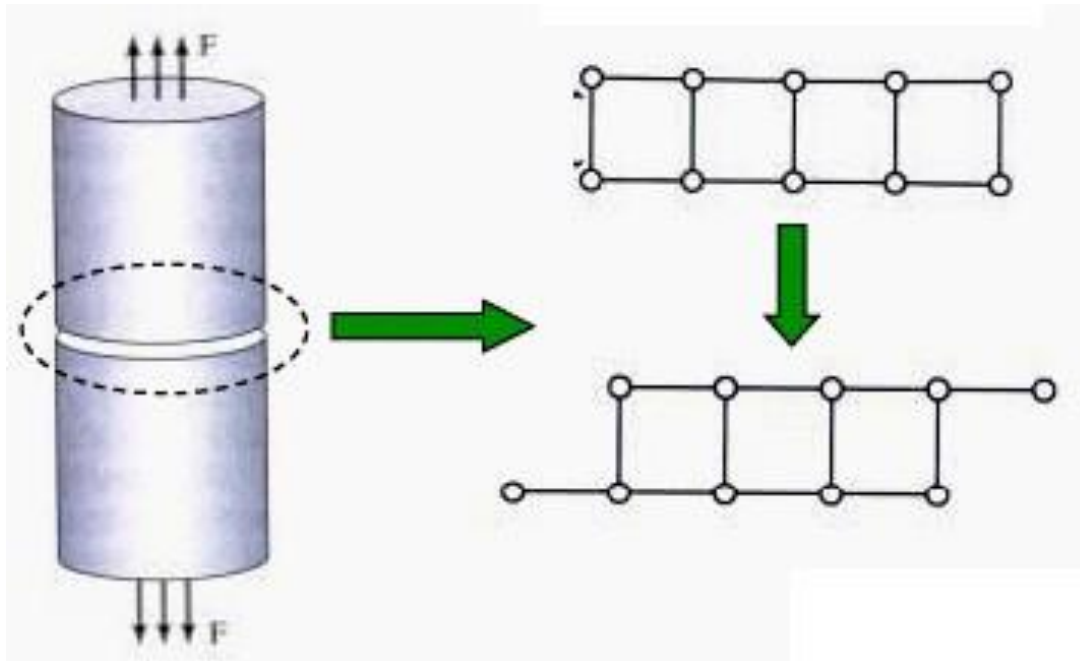
Introdução

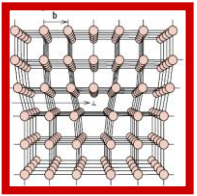
- Por que a resistência medida dos materiais é muito menor do que aquela predita pelos cálculos teóricos, baseados na força de ligação dos átomos de um cristal perfeito do material?
 - Ex: a resistência ao cisalhamento teórica do cobre é maior que 1000 MPa, mas o valor medido é uma ordem de grandeza menor que este.
- Por que os metais se deformam plasticamente?
- Por que a deformação plástica dos metais pode resultar em profundas alterações nas propriedades mecânicas do material?



Introdução

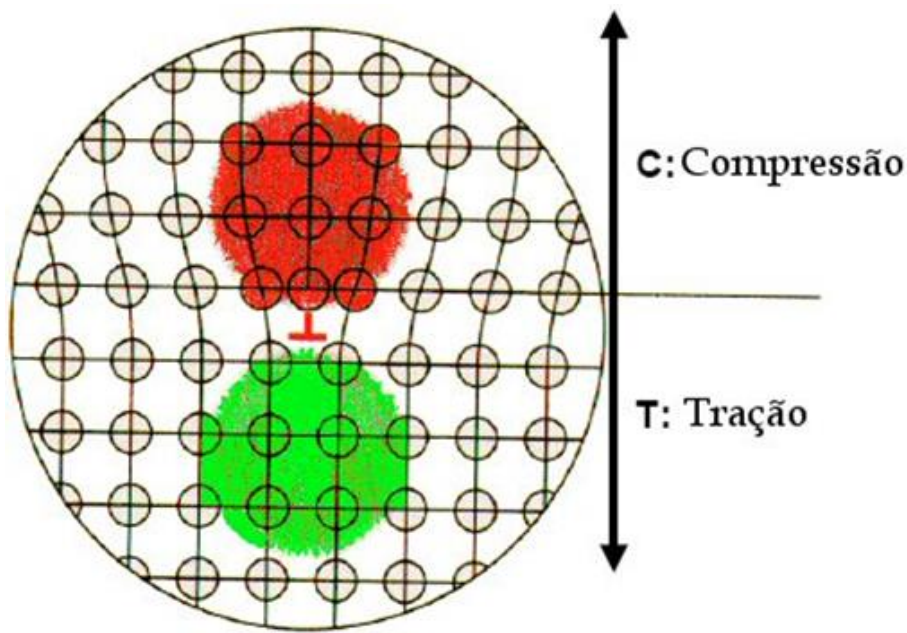
- **Resposta:** *Por conta da existência de discordâncias e defeitos na rede cristalina dos materiais!*



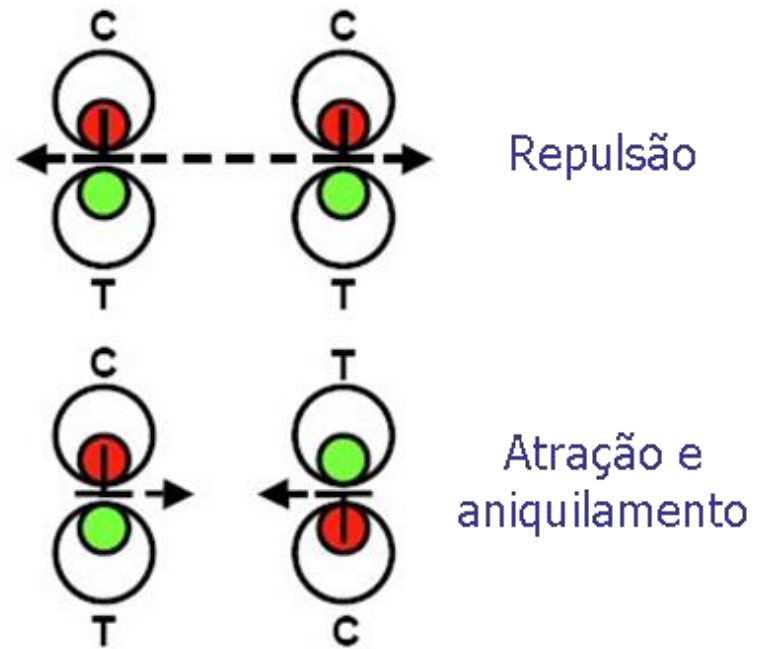


Deformação Plástica

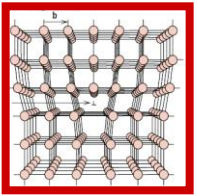
- Interação entre discordâncias: esforços envolvidos.



Regiões de tração e compressão ao redor da discordância

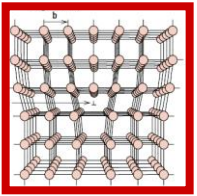


Interação entre discordâncias



Mecanismos de ...

- Aumento da resistência por redução do tamanho de grão;
- Aumento da resistência por adição de elemento de liga (formação de solução sólida ou precipitação de fases);
- Aumento da resistência por encruamento (trabalho a frio);
- Aumento da resistência por precipitação com tratamento térmico (transformação de fase).



Redução do Tamanho do Grão

- O contorno de grão interfere no movimento das discordâncias;
- Grãos menores possuem uma área total maior de contornos de grão em um mesmo volume de material.

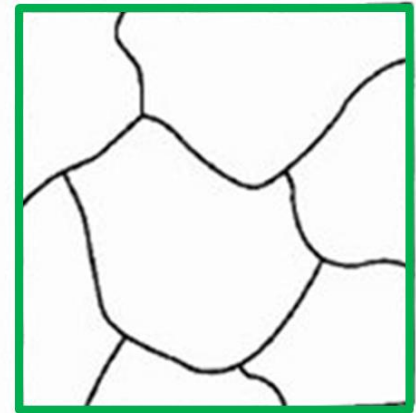
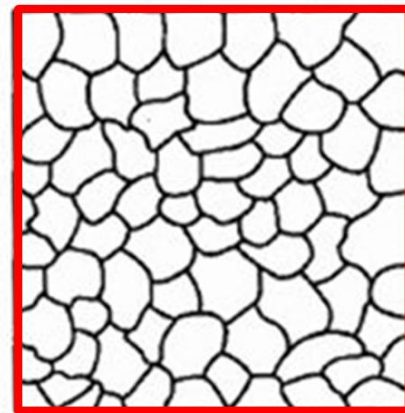
↓ Tamanho de grão

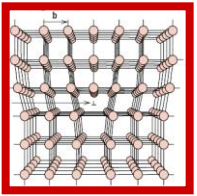


↑ Contorno de grão



↑ Restrição ao movimento





Redução do Tamanho do Grão

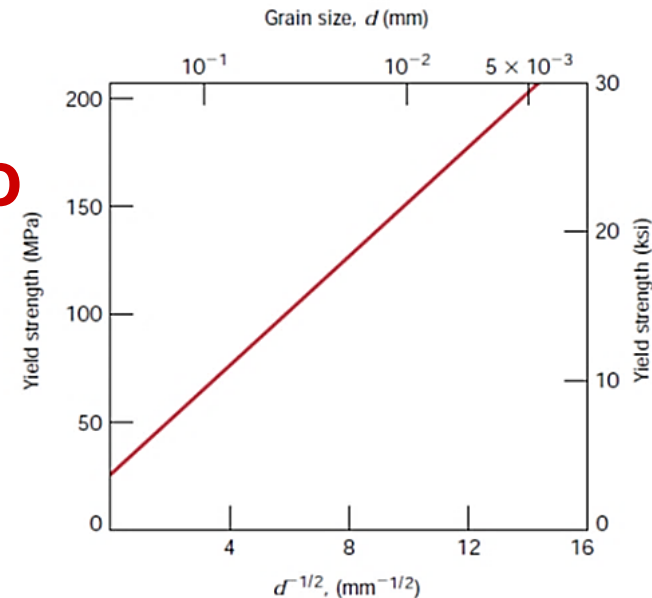
- O contorno de grão → barreira para a continuação do movimento das discordâncias.

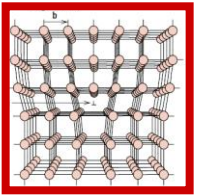
- Diferentes orientações presentes e também devido às inúmeras descontinuidades presentes no contorno de grão.

- Redução do tamanho do grão

- Equação de Hall-Petch

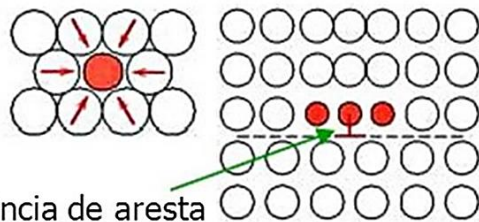
$$\sigma_y = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2}$$





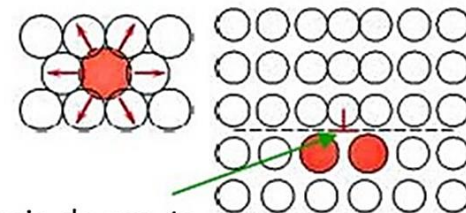
Solução Sólida

- Quando um átomo de uma impureza está presente, o movimento da discordância fica restringido, ou seja, deve-se fornecer energia adicional para que continue havendo escorregamento;
- Por isso soluções sólidas de metais são sempre mais resistentes que seus metais puros constituintes.



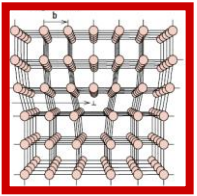
Discordância de aresta

Tensão causada por átomos substitucionais menores que os do metal hospedeiro



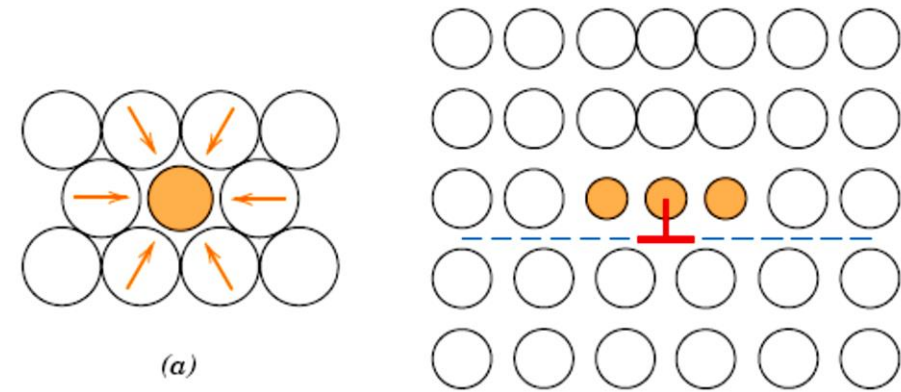
Discordância de aresta

Compressão causada por átomos substitucionais maiores que os do metal hospedeiro

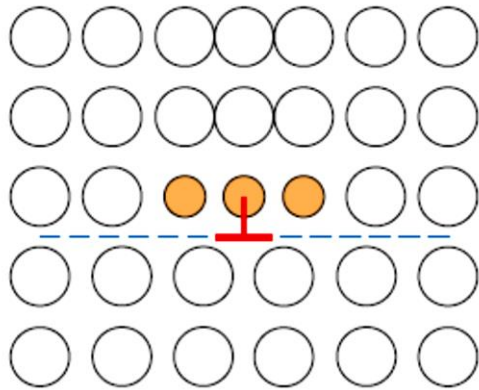


Solução Sólida

- Átomos de impureza (solução sólida) → deformações na rede cristalina;
- Interações dos campos de deformação da rede cristalina e discordâncias → movimento de discordâncias restringido.

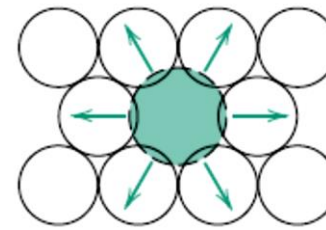


(a)

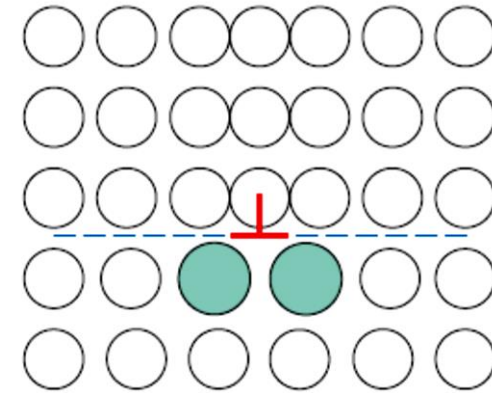


(b)

a) Deformações da rede por tração imposta sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de menor tamanho; b) Possíveis localizações de átomos de impureza menores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações da rede impureza-discordância.

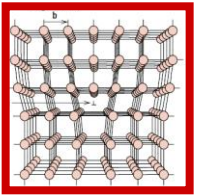


(a)



(b)

a) Deformações compressivas impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de maior tamanho; b) Possíveis localizações de átomos de impureza maiores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações da rede impureza-discordância.

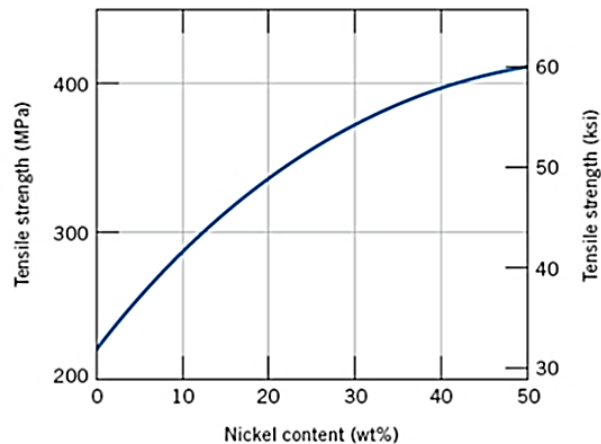


Solução Sólida

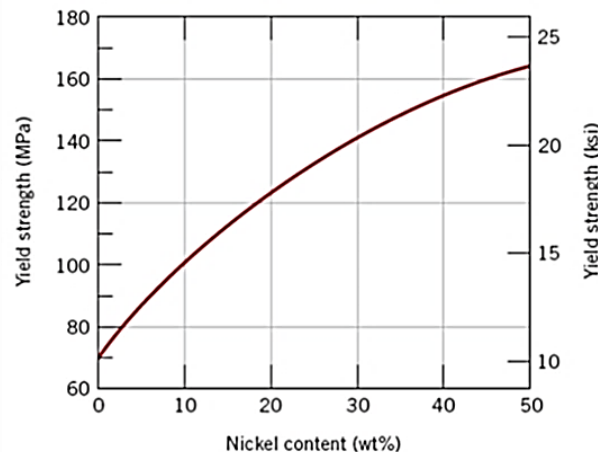
• Formação de Ligas por Solução Sólida

- Formação de ligas com átomos de impurezas que entram em solução sólida intersticial ou substitucional.

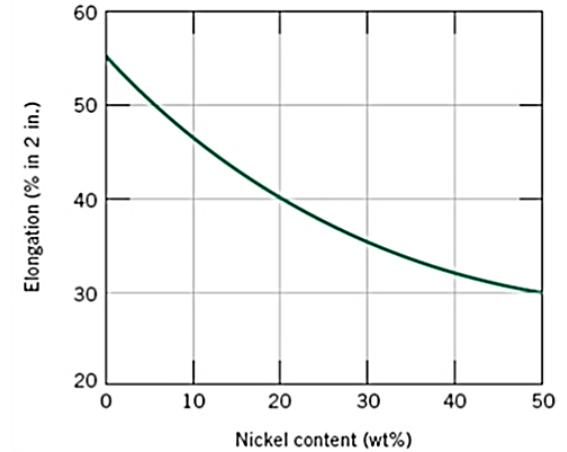
a)



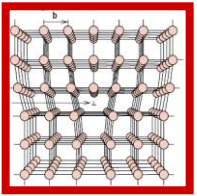
b)



c)

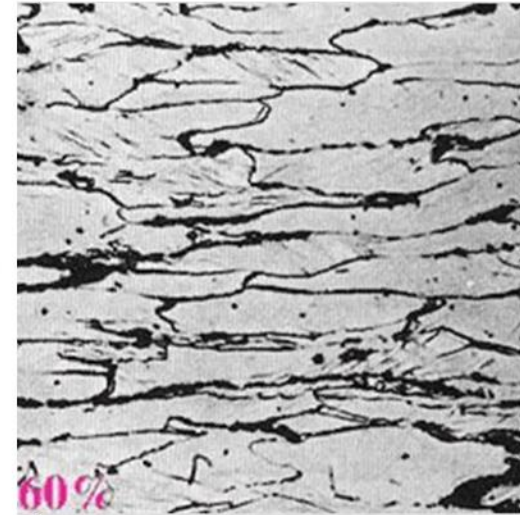
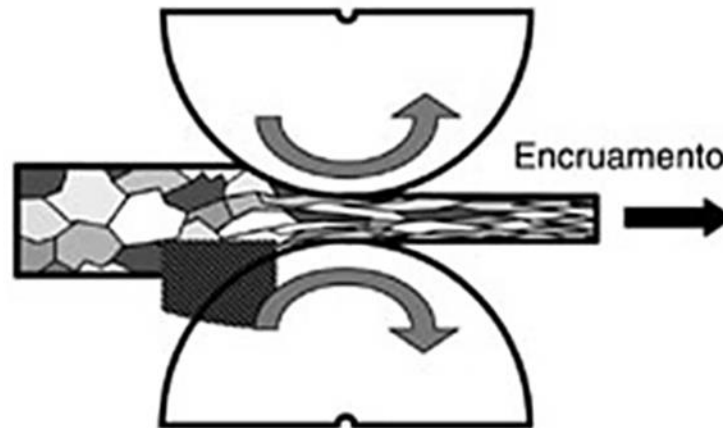
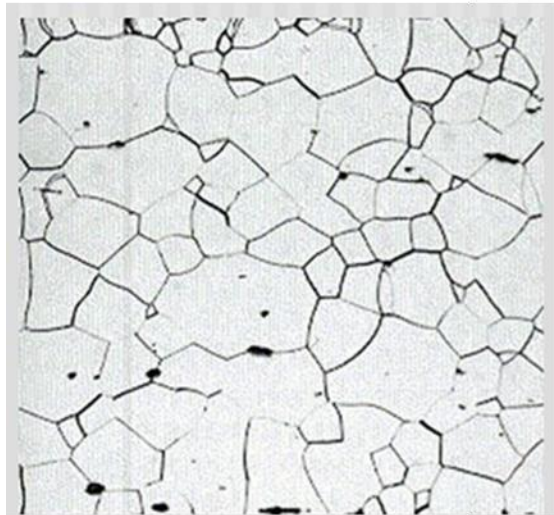


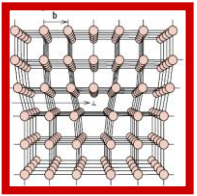
Variação do (a) limite de resistência a tração, (b) limite de escoamento, e (c) ductilidade (AL%) em função do teor de níquel para ligas de cobre-níquel mostrando aumento de resistência



Encruamento

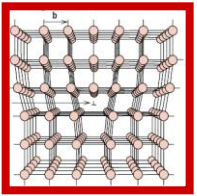
- Conhecido como *Trabalho a frio*.
- Ocorre abaixo da temperatura de recristalização (próximo à temperatura ambiente);





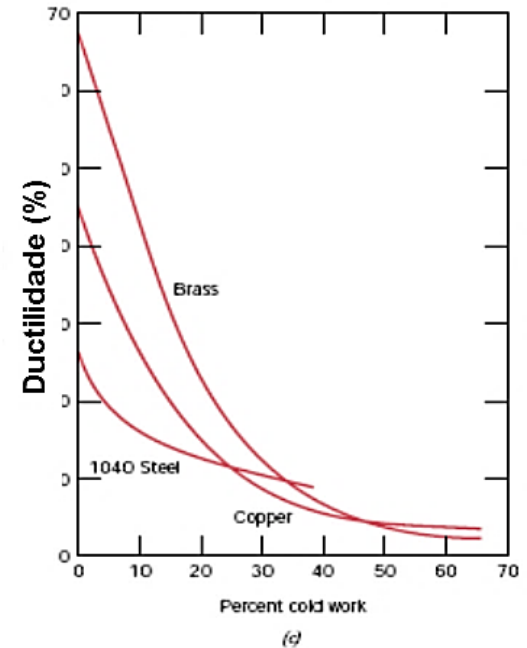
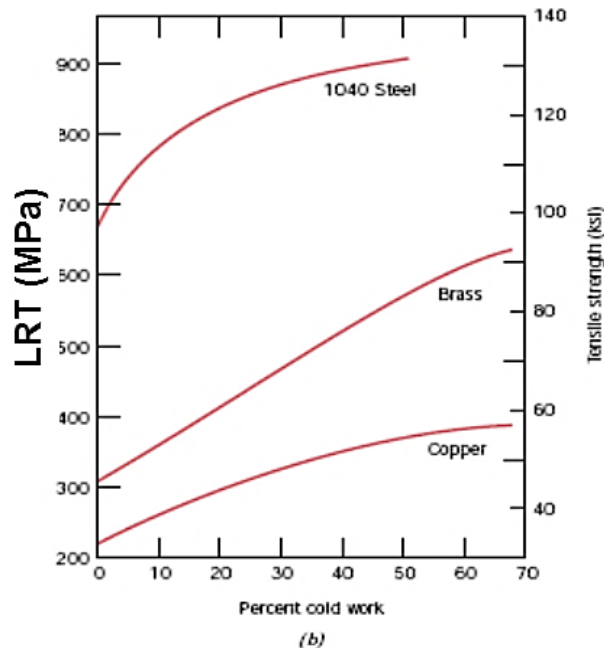
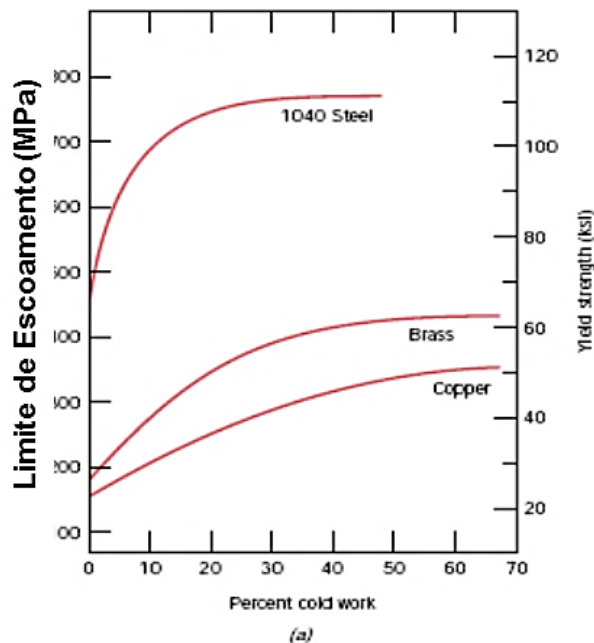
Encruamento

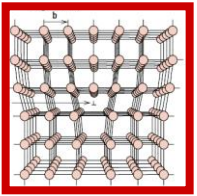
- Aumento da resistência por deformação plástica;
 - A densidade de discordâncias aumenta com a deformação, devido à multiplicação das existentes ou à formação de novas discordâncias;
 - O aumento de discordâncias impede o escorregamento dos planos atômicos.
- Quanto maior o encruamento, maior é a força necessária para produzir uma maior deformação.



Encruamento

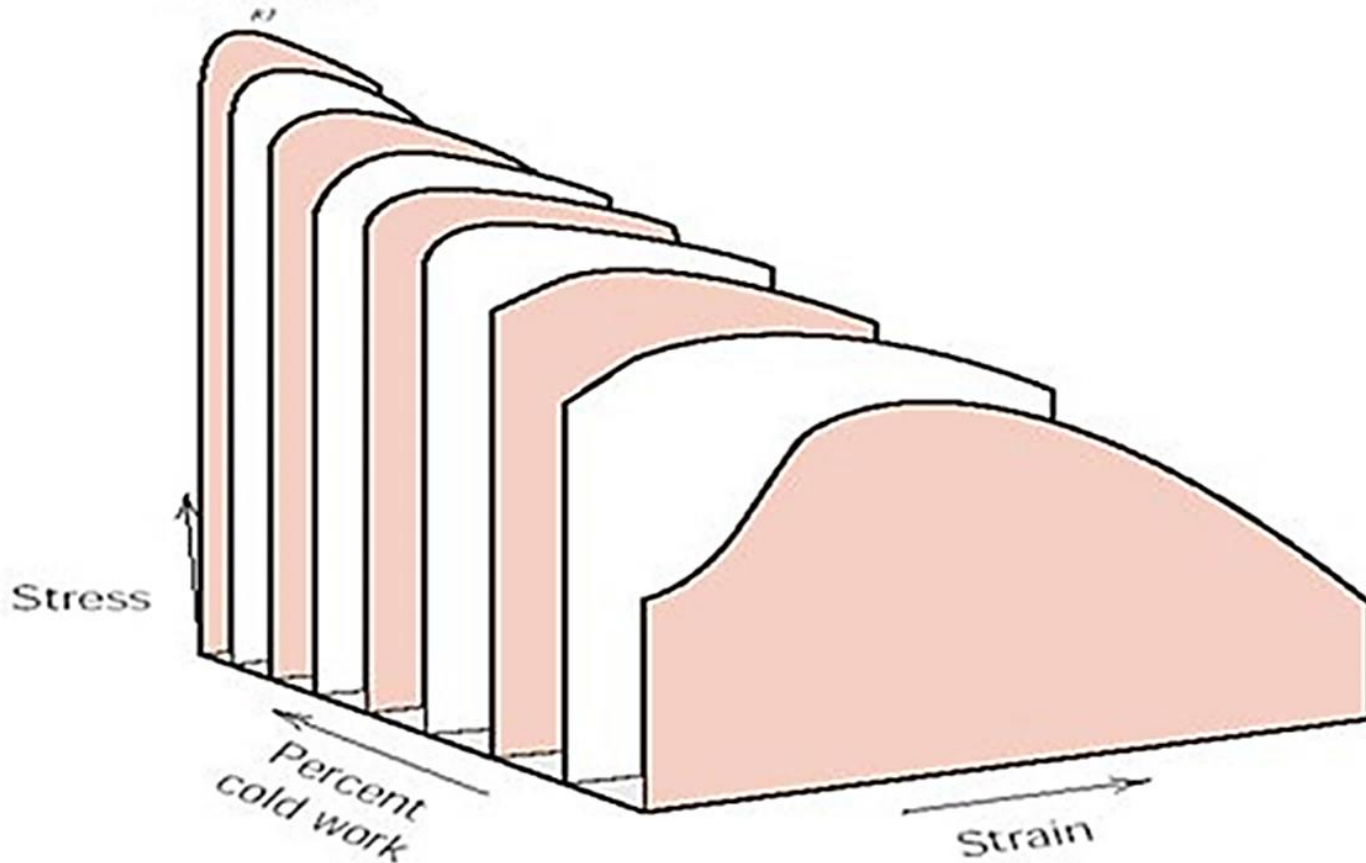
- Melhor controle dimensional;
- Produz melhor acabamento superficial;
- O encruamento pode ser removido por tratamento térmico (recristalização).

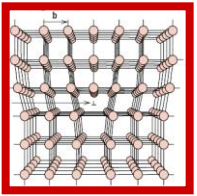




Encruamento

Percentual de Trabalho a Frio (%TF)
X
Propriedades

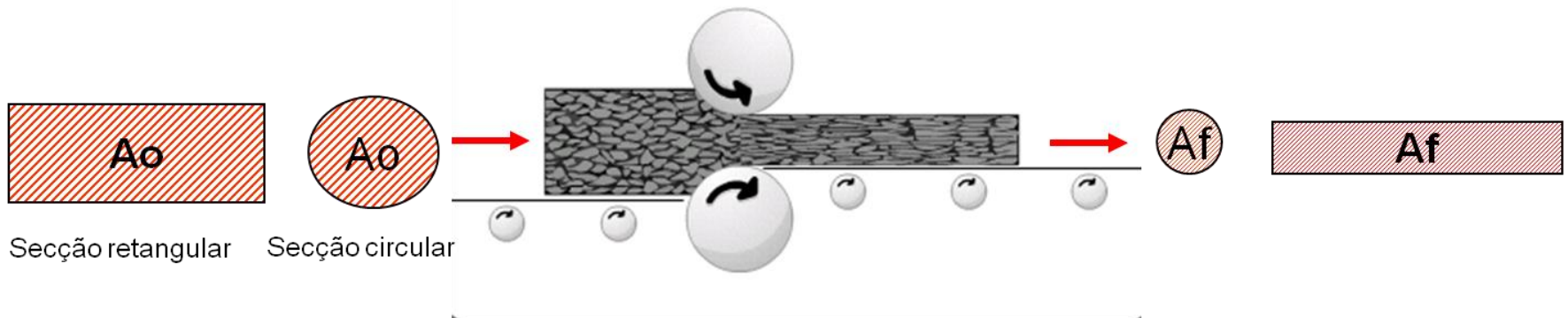


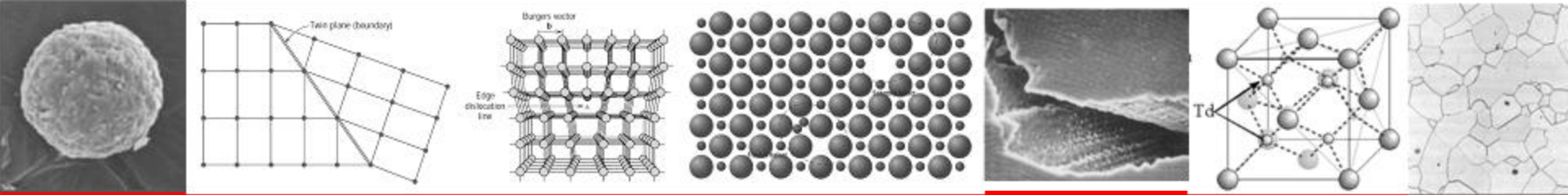


Encruamento

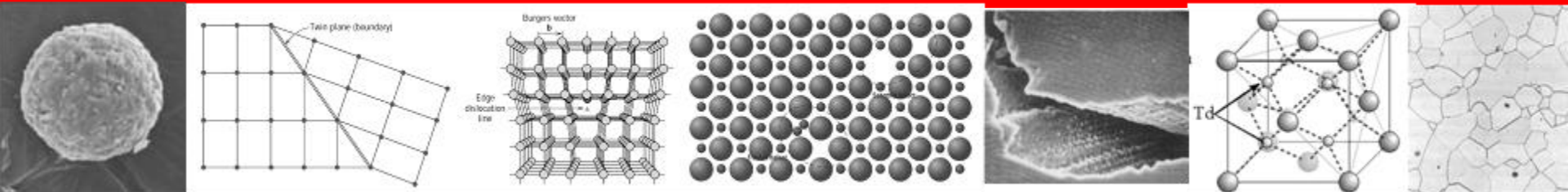
- Expressa-se o grau de deformação plástica com um percentual de trabalho a frio (%TF), definido como:

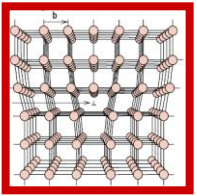
$$\%TF = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100$$





Diagramas de Equilíbrio de Fases



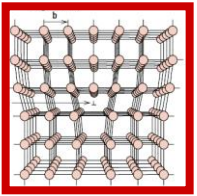


Introdução

- **Por que estudar Diagramas de Fases?**
- Os diagramas de fases (também chamados de diagrama de equilíbrio) relacionam temperatura, composição química e quantidade das fases em equilíbrio;

Um diagrama de fases é um “mapa” que mostra quais fases são as mais estáveis nas diferentes composições, temperaturas e pressão.

- A microestrutura dos materiais pode ser relacionada diretamente com o diagrama de fases;
- Existe uma relação direta entre as propriedades dos materiais e as suas microestruturas.



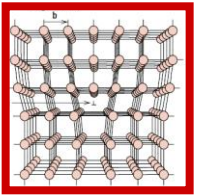
Introdução

- **Importância**

Conhecendo as fases pode-se estimar o tipo de microestrutura presente, e daí as propriedades e aplicações.

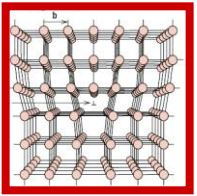
FASES PRESENTES
COMPOSIÇÃO DAS FASES
PROPORÇÃO DAS FASES





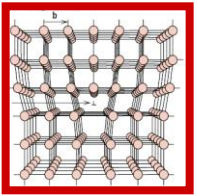
Introdução

- **Definições e conceitos básicos**
 - **Componente:** constituinte químico (elemento ou composto) que compõem um material.
 - **Sistema:** série de possíveis ligas com os mesmos componentes.
 - **Solução sólida:** átomos de soluto adicionados ao solvente sem que a estrutura cristalina deste último se altere.



Introdução

- **Definições e conceitos básicos**
 - Fase: porção homogênea de um sistema com características químicas e físicas uniformes.
 - Microestrutura: característica estrutural de um sistema, com influência direta sobre as propriedades físicas.



Introdução

- **Equilíbrio**

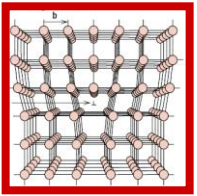
- **Em termos “macroscópicos”**

- Um sistema está em equilíbrio quando suas características não mudam com o tempo, e tende a permanecer nas condições em que se encontra indefinidamente, a não ser que seja perturbado externamente.

- **Em termos termodinâmicos**

- 1) Um sistema está em equilíbrio quando sua energia livre é mínima, consideradas as condições de temperatura, pressão e composição em que ele se encontra.

- 2) Variações dessas condições resultam numa alteração da energia livre, e o sistema pode espontaneamente se alterar para um outro estado de equilíbrio (no qual a energia livre seja mínima para as novas condições de T, P e composição).



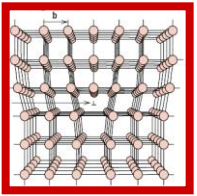
Termodinâmica

- Como a estabilidade de Fases ou Equilíbrio pode ser medida?
- A estabilidade pode ser medida por meio da Termodinâmica. Para transformações em temperatura e pressão constantes, a estabilidade relativa de um sistema é definida pela Energia Livre de Gibbs (G), conforme equação:

$$G = H - TS$$

Onde:

- H é a entalpia,
- T é a temperatura absoluta,
- S é a entropia.

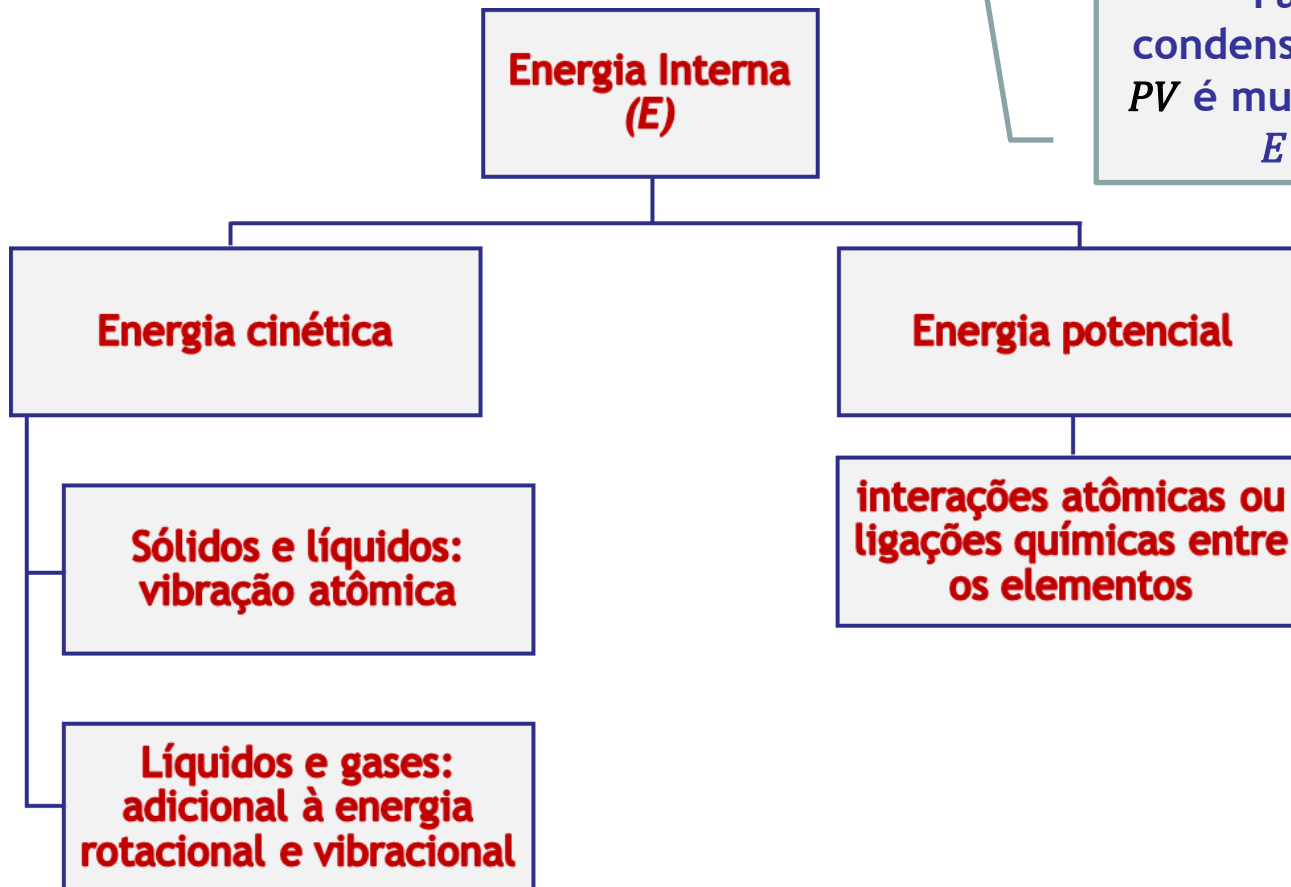


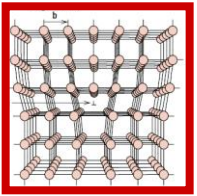
Termodinâmica

- A entalpia (**H**) é uma medida do conteúdo de calor do sistema e é dada por:

$$H = E + PV$$

Para fases condensadas, o termo PV é muito menor que $E \therefore H \sim E$.

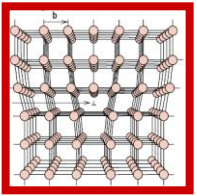




Termodinâmica

- Como a estabilidade de Fases ou Equilíbrio pode ser medida?
- Um sistema é dito em equilíbrio, quando este é o estado mais estável, ou seja, não há tendência de mudança de equilíbrio em um tempo infinitamente grande.
- Para temperatura e pressão constantes, um sistema fechado (uma composição fixa) estará em equilíbrio estável se tiver o menor valor possível de Energia Livre de Gibbs, ou em termos matemáticos:

$$dG = 0$$

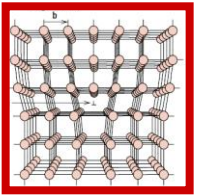


Termodinâmica

- Como a estabilidade de Fases ou Equilíbrio pode ser medida?
- Da equação $G=H-TS$, pode-se concluir que o estado de maior estabilidade será aquele que apresentar o melhor compromisso entre entalpia e entropia.

Por exemplo:

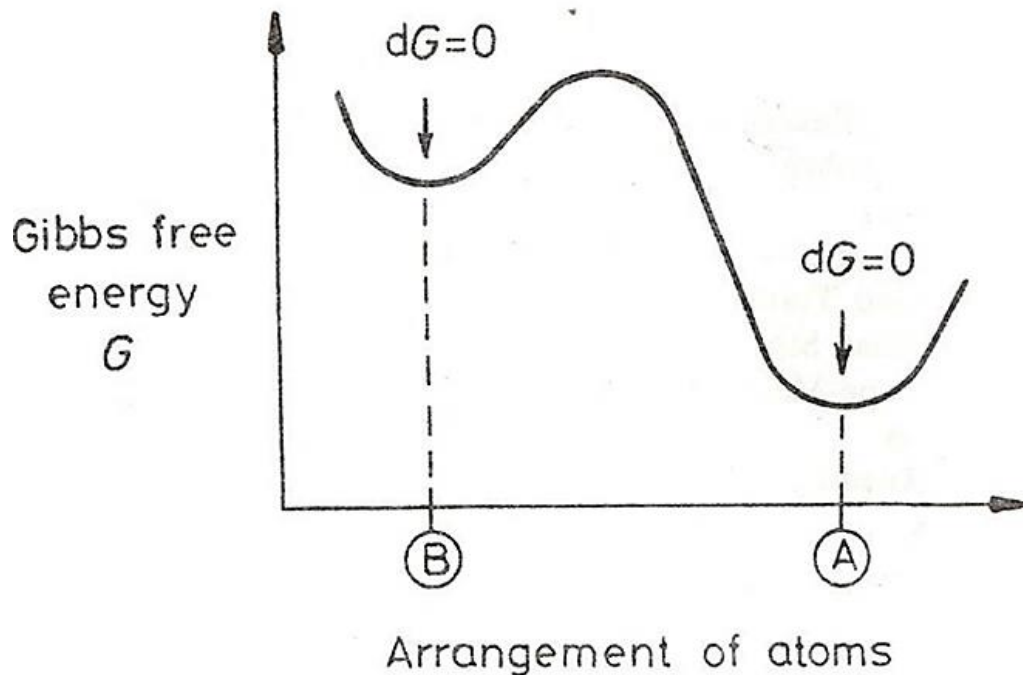
- em baixas temperaturas, as fases sólidas são as mais estáveis, pois apresentam ligações atômicas fortes e, então, as menores energias internas (entalpias).
- em altas temperaturas, as fases líquidas e gasosas são as mais estáveis, pois o termo predominante é o $-TS$ e, desta forma, são as fases com maior liberdade de movimentação atômica.



Termodinâmica

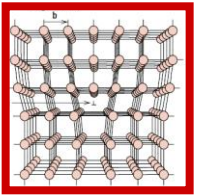
- **Equilíbrio metaestável**

- Uma fase pode apresentar equilíbrio local, que difere do estado de equilíbrio estável ou de maior equilíbrio termodinâmico. Neste caso, dizemos que a fase está em **Equilíbrio metaestável**.



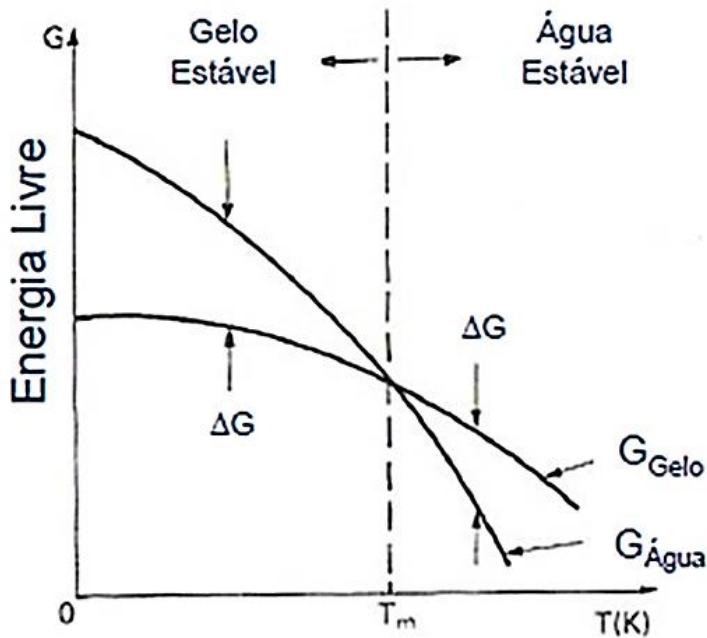
Quando um sistema em equilíbrio metaestável, passar por flutuações térmicas que possam fornecer energia ao sistema, ele rapidamente rearranja e passa ao estado de equilíbrio estável.

$$dG_A < dG_B$$

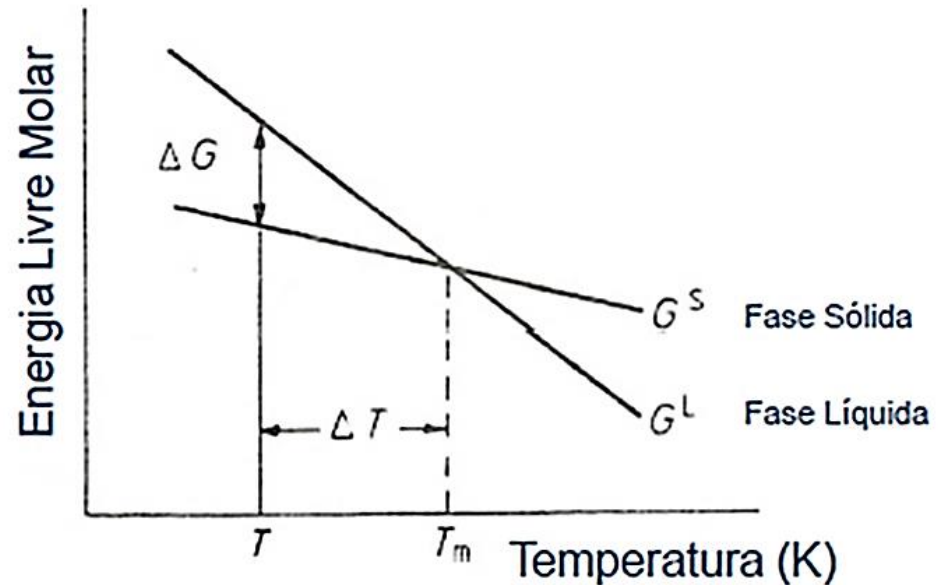


Termodinâmica

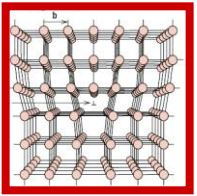
- Energia livre de Gibbs (G) equilíbrio metaestável
- As curvas mostram que a Energia Livre (G) das fases diminui com a temperatura, mostrando a importância do termo $-TS$.



Curvas de Energia Livre de Gibbs - Água

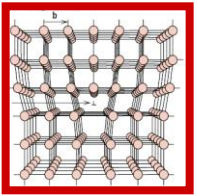


Curvas de Energia Livre de Gibbs - Metal Puro



Termodinâmica

- **Velocidade das transformações**
 - Apesar da termodinâmica determinar a estabilidade das fases de um metal ou liga, a velocidade com que as transformações ocorrem, depende da físico-química ou da **Cinética das Transformações**.
 - Em geral, depende da barreira energética de ativação necessária para iniciar a transformação ou elevação de energia necessária para ir de B para A.



Limite de Solubilidade

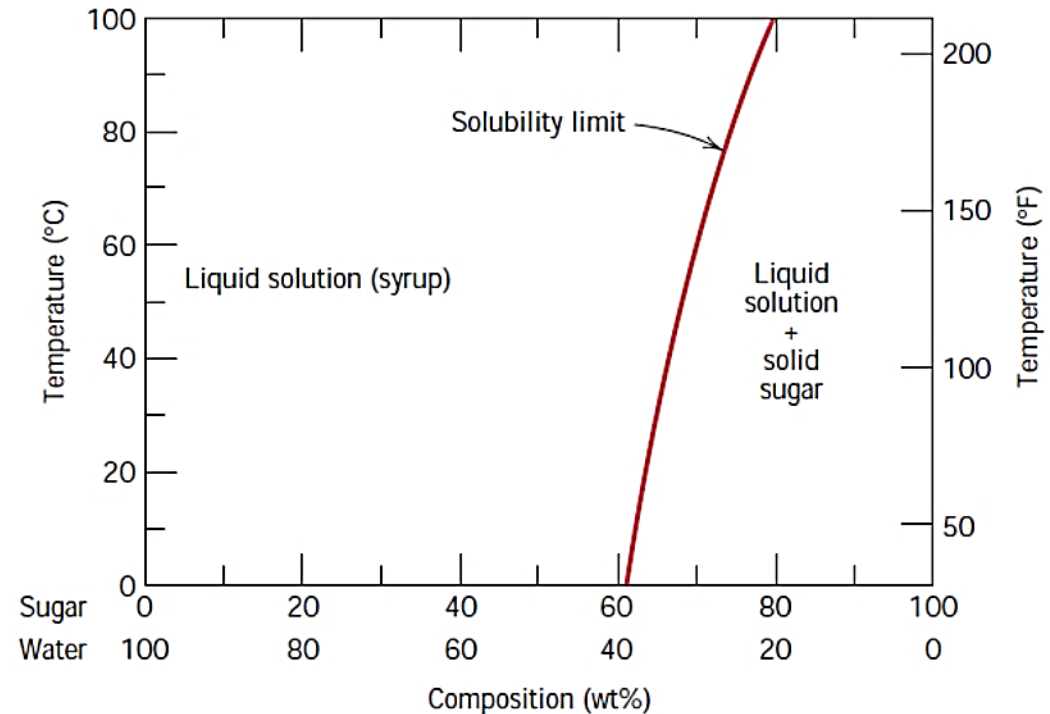
- Para muitos sistemas e para uma determinada temperatura, existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode ser dissolvida no solvente formando uma solução sólida. Essa concentração máxima é chamada limite de solubilidade.

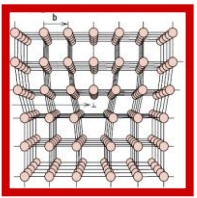
Solubilidade Completa

Solubilidade incompleta

Insolubilidade

Obs.: Quando o limite de solubilidade é ultrapassado forma-se uma segunda fase com composição distinta



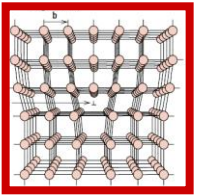


Regra das fases de Gibbs

- Através de considerações termodinâmicas, Gibbs deduziu uma relação entre o **número de fases (P)** que podem coexistir em equilíbrio em um dado sistema, o **número mínimo de componentes (C)** que podem ser usados para formar o sistema e os grau de liberdade ou número de variáveis externas que podem ser controladas sem alterar o equilíbrio (F) e (N) o número de variáveis que não estão relacionados à composição (p. ex. , temperatura e pressão). A relação é apresentada sob a forma da equação:

$$P + F = C + N$$

, que é conhecida como Regra das Fases de Gibbs



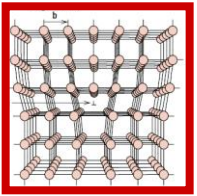
Diagramas Unários

Inorgânicos que apresentam polimorfismo, quer reversíveis (deslocativos) ou irreversíveis (desruptivos), tais como a sílica e a zircônia.

Exemplos:

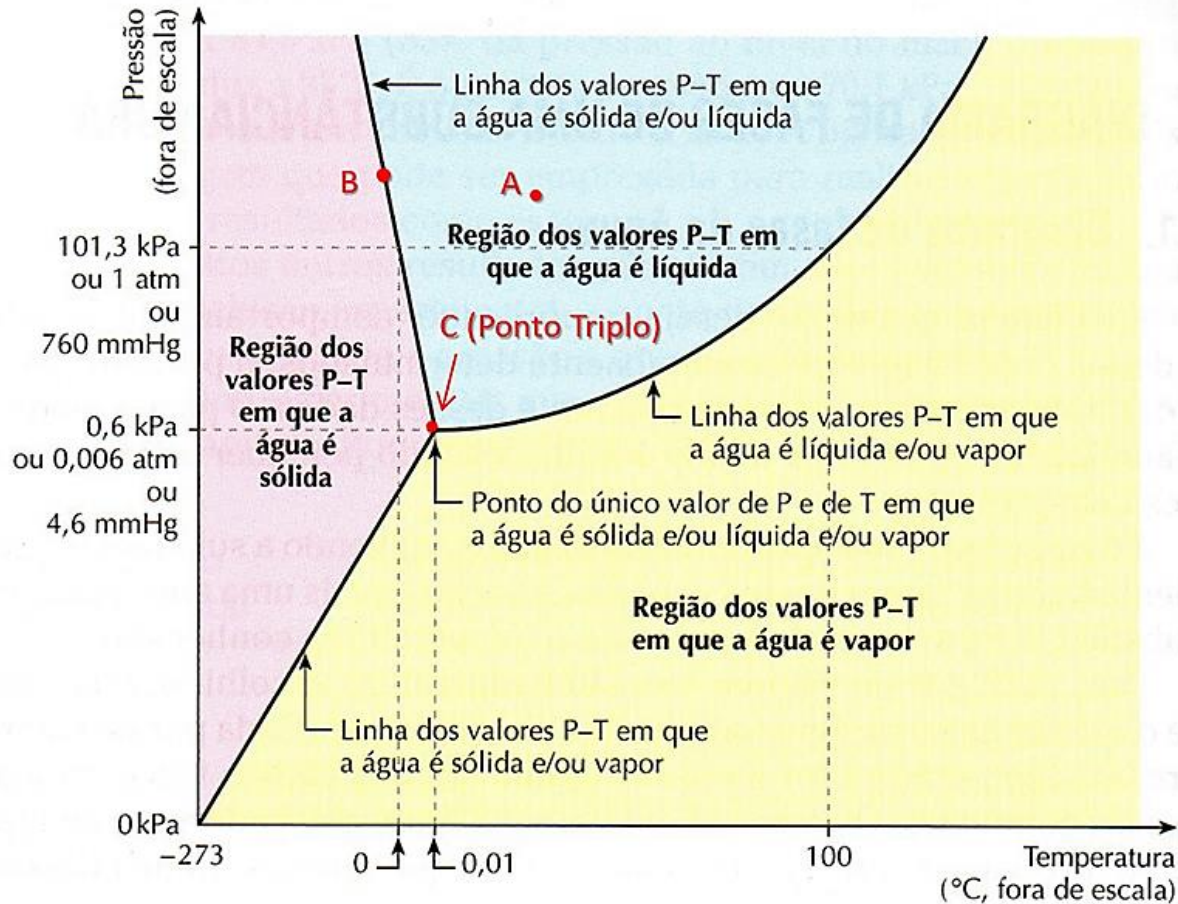
SiO_2 (quartzo de baixa temperatura, alta temperatura, tridimita e cristobalita)

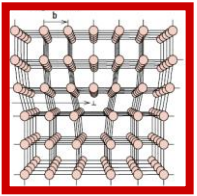
ZrO_2 (cúbica, tetragonal e monoclinica)



Sistema unário

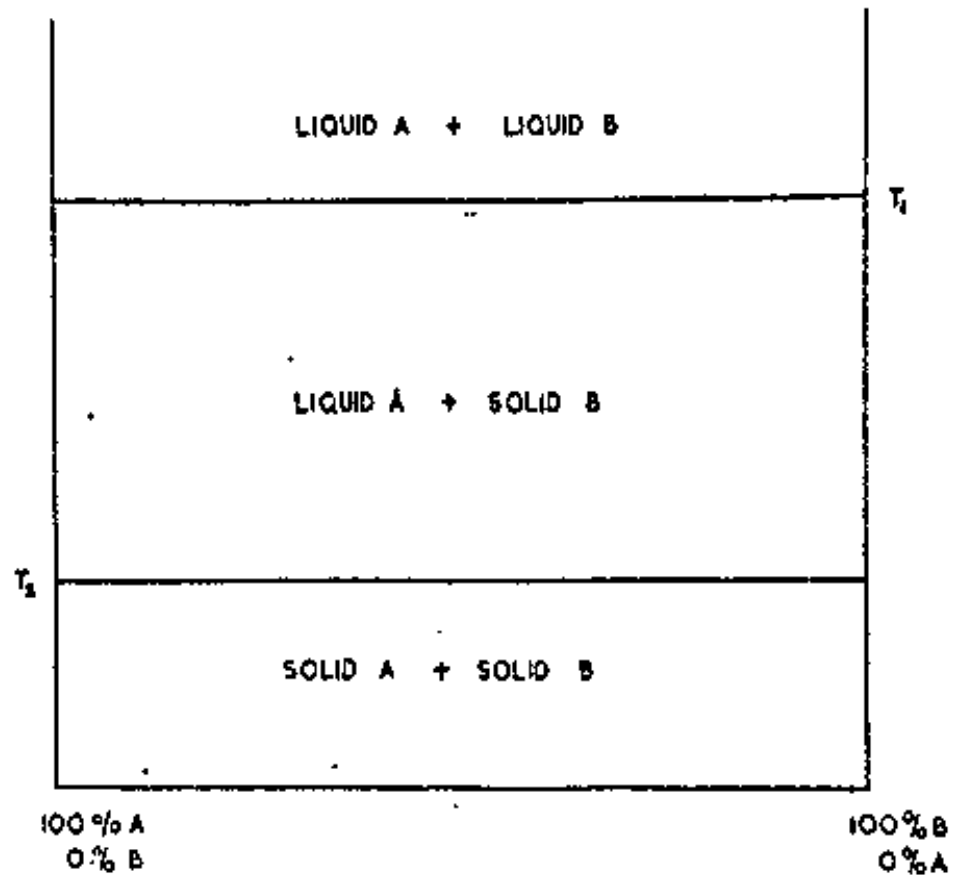
- Uma substância pura como a água pode existir nas fases sólida, líquida e gasosa, dependendo das condições de temperatura e pressão.

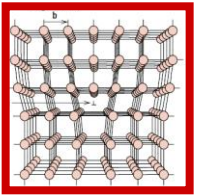




Diagramas Binários

1° Componentes imiscíveis nos estados líq. e sól.





Diagramas Binários

2° Componentes miscíveis no estado líq. e imiscíveis no estado sól.

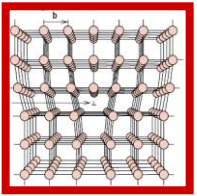
Van't Hoff (1903): 1 mol de uma substância adicionada a 100 g de uma substância pura, abaixa o ponto de fusão da substância pura de:

$$\Delta T = 0,02 T_f^2 / L, \text{ se não houver formação de solução sólida.}$$

onde,

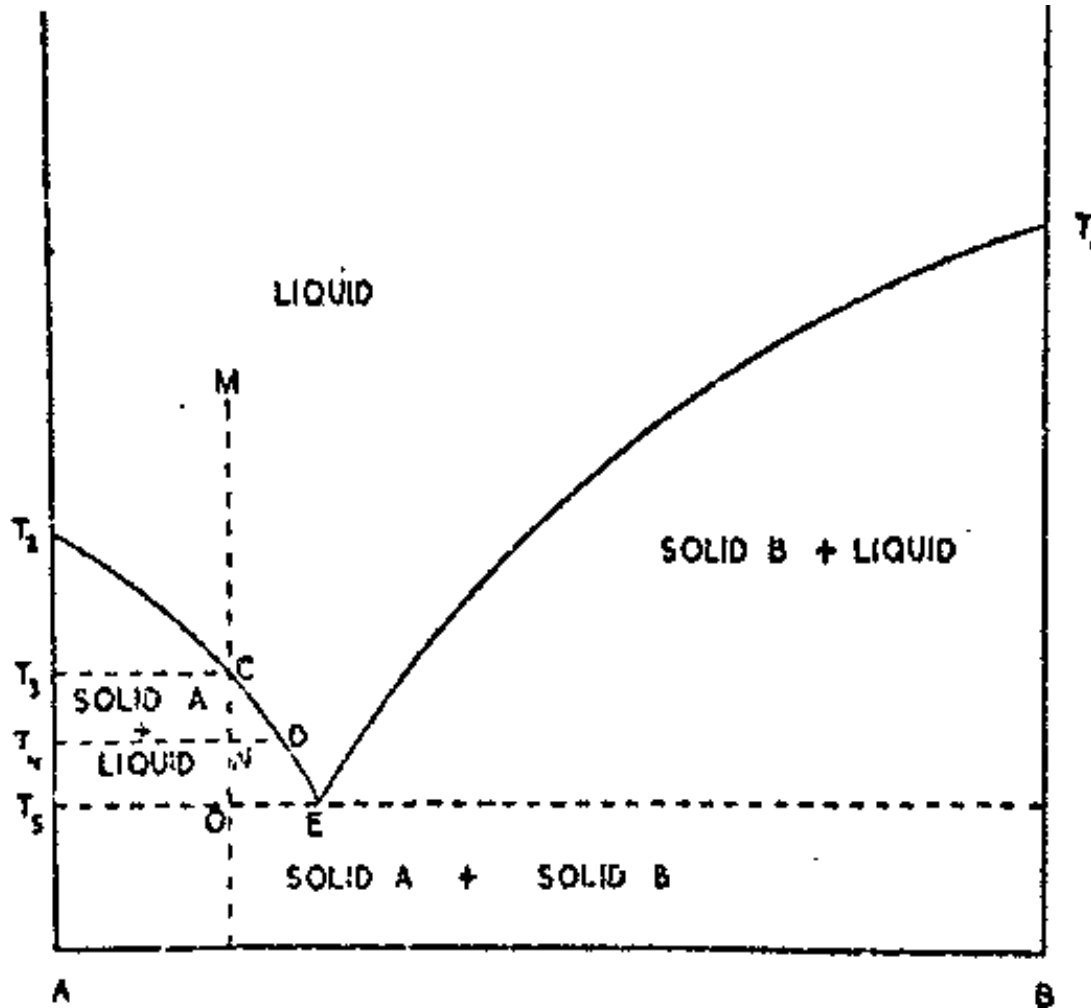
T_f = temperatura de fusão da substância pura

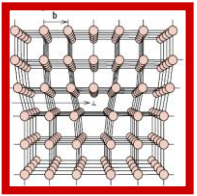
L = calor latente de fusão da substância aditiva



Diagramas Binários

2º Componentes miscíveis no estado líq. e imiscíveis no estado sól.

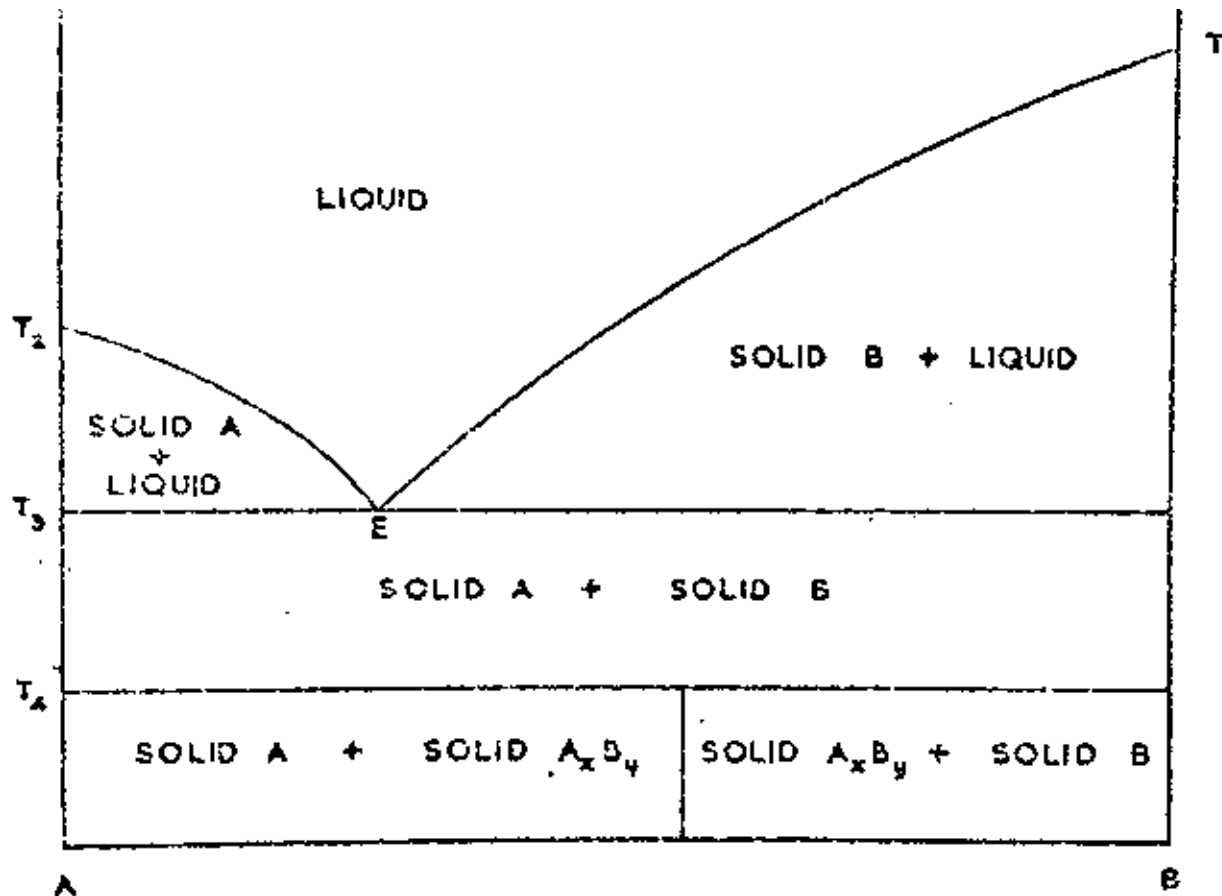


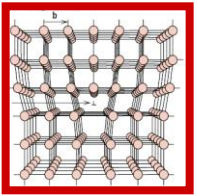


Diagramas Binários

3° Formação de composto:

a) Composto se decompõe abaixo de T_e ($T < T_e$)

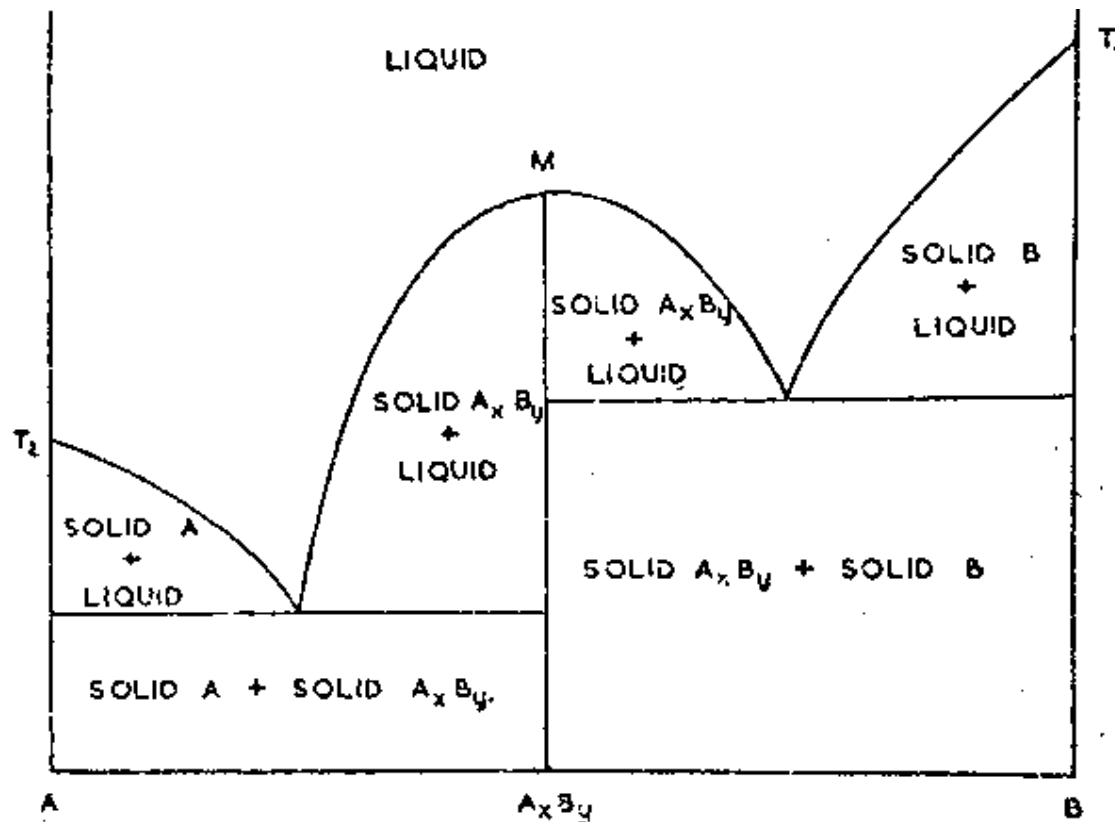


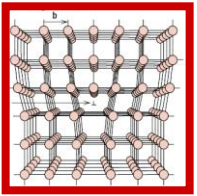


Diagramas Binários

3° Formação de composto:

b) Composto A_xB_y é estável em qualquer temperatura e funde-se congruentemente (sól. de mesma composição do líq.)

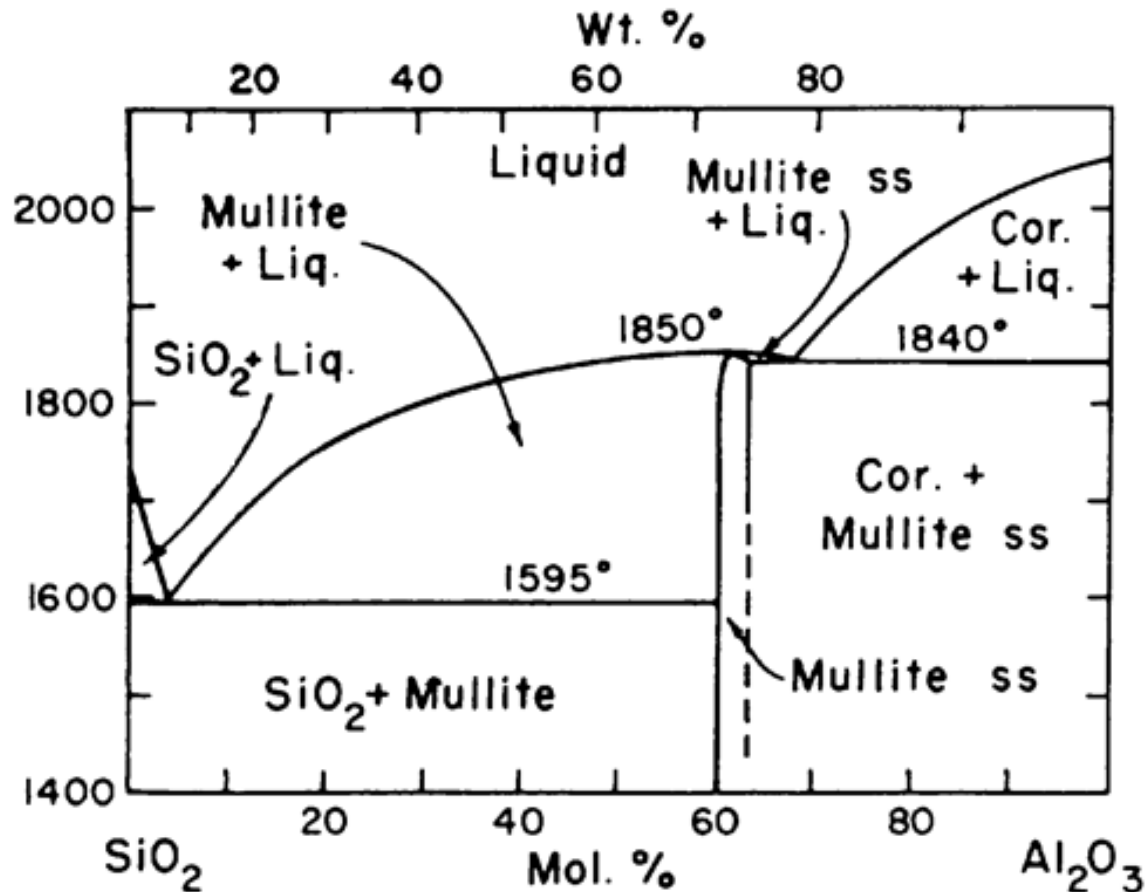


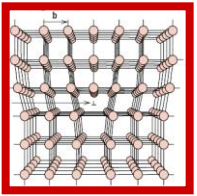


Diagramas Binários

3° Formação de composto:

b) Composto $AxBy$ é estável em qualquer temperatura e funde-se congruentemente (sól. de mesma composição do líq.) – **Aplicação**

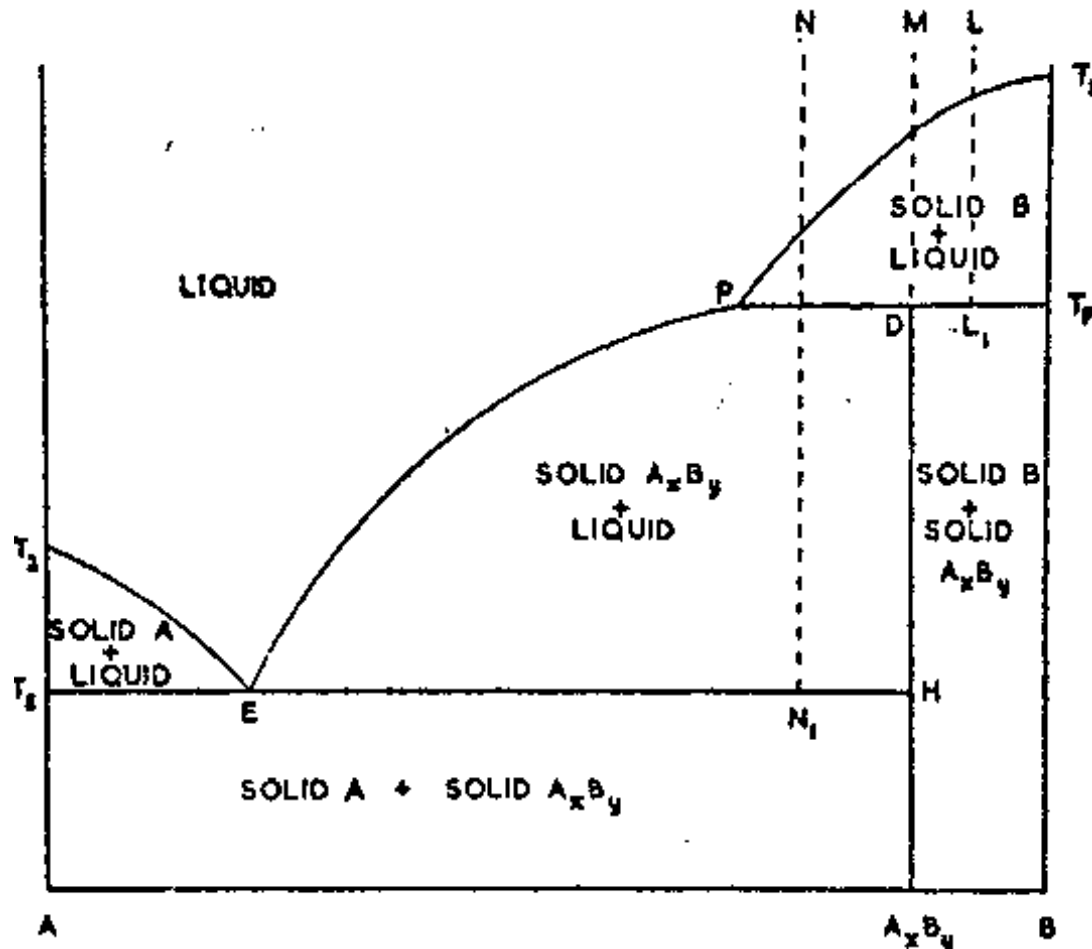


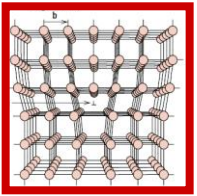


Diagramas Binários

3º Formação de composto:

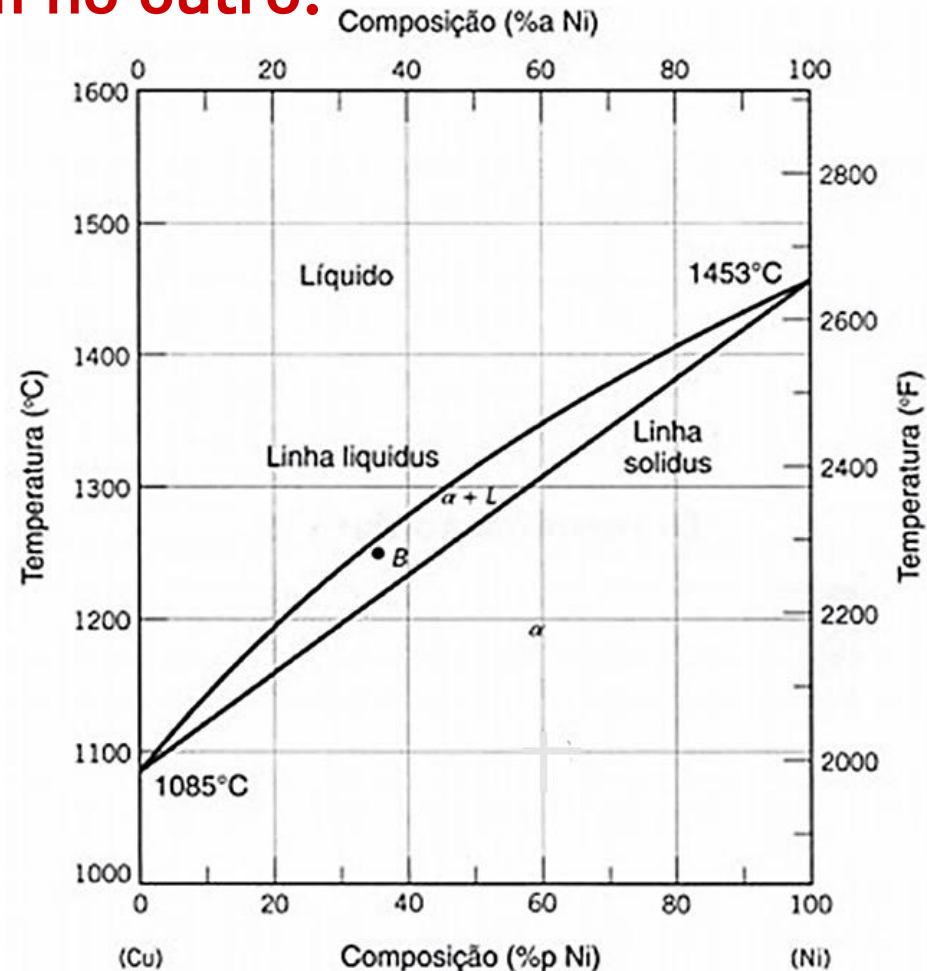
c) Composto se decompõe acima de T_e ($T > T_e$) = fusão incongruente

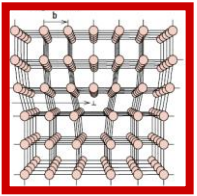




Diagramas Binários

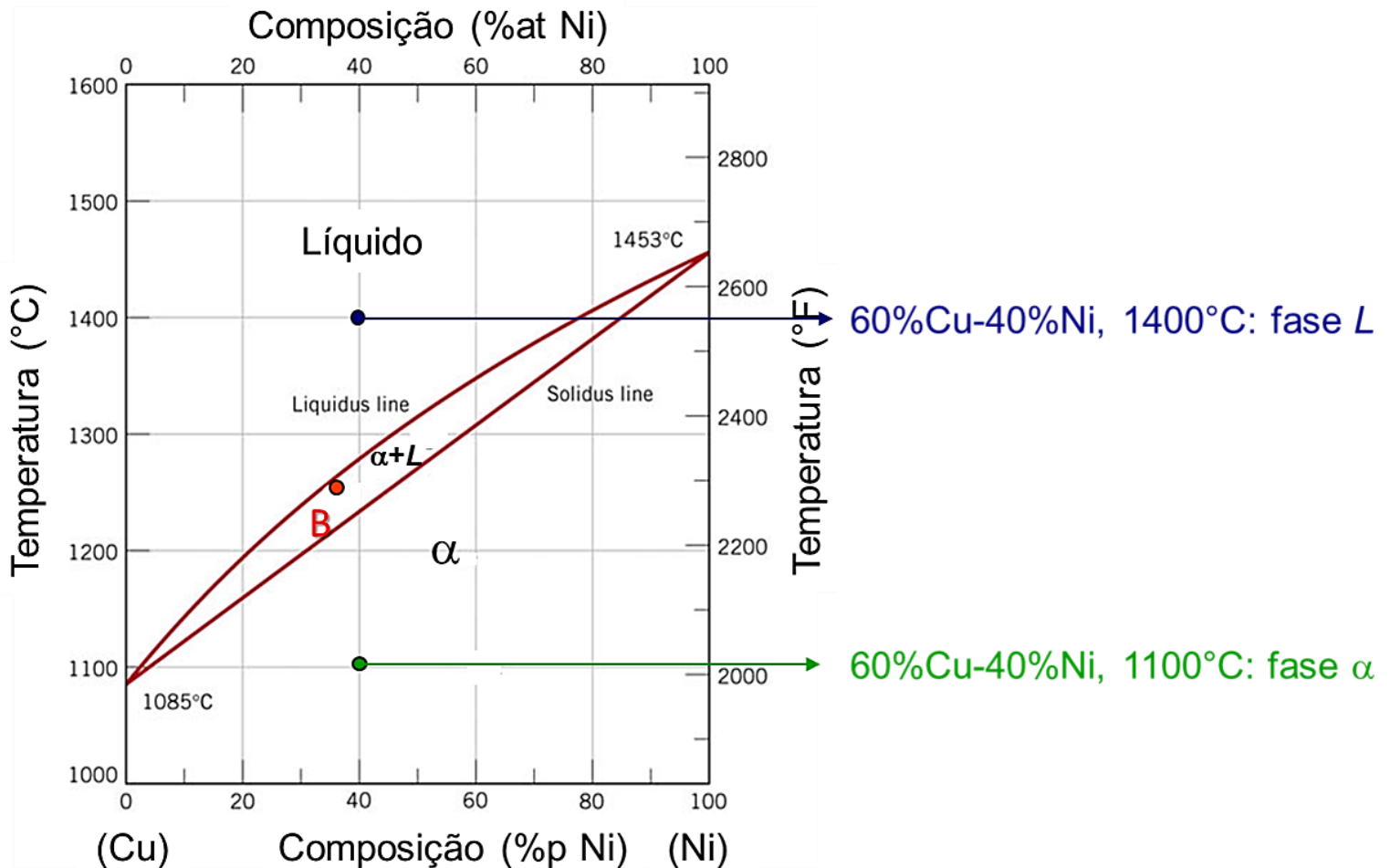
- Num sistema binário isomorfo, os dois componentes são completamente solúveis um no outro.
- A leitura de diagramas isomorfos é feita primeiramente definindo o par composição-temperatura desejado. Esse par define um ponto no diagrama.

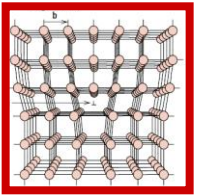




Diagramas Binários

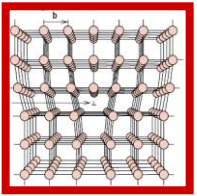
- Se o ponto desejado estiver num campo onde somente existe uma fase, a composição já está definida, e a fase é a indicada no campo do diagrama.





Diagramas Binários

- Se o ponto estiver numa região onde existem duas fases em equilíbrio, a determinação da composição das fases presentes é possível traçando-se um segmento de reta horizontal que passa pelo ponto e atinge as duas linhas que delimitam o campo de duas fases (linhas *liquidus* e *solidus*).
- As composições das fases líquida e sólida são dadas pelas intersecções deste segmento de reta e as respectivas linhas de contorno (Linhas de amarração).

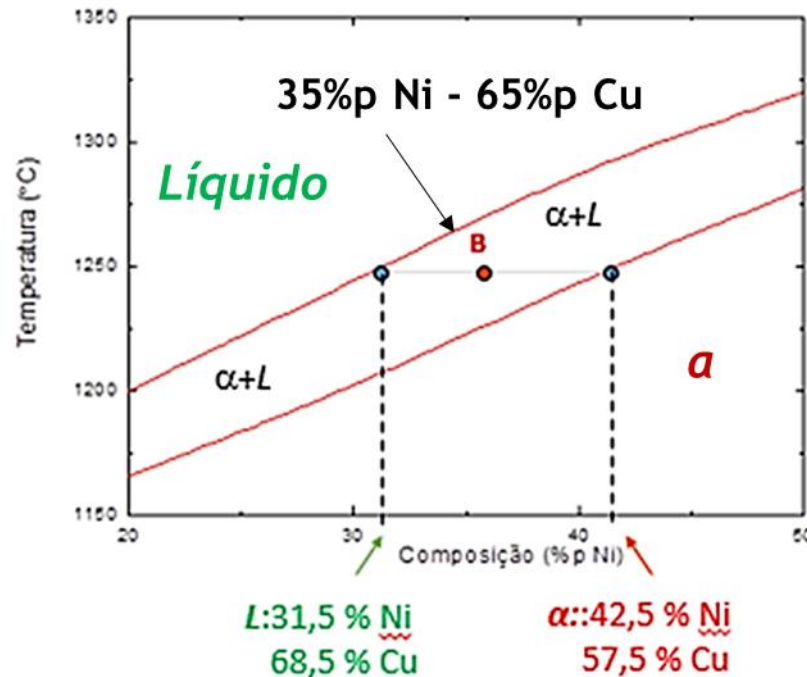


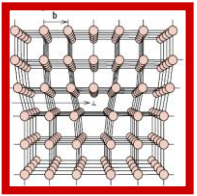
Diagramas Binários

Para o ponto B, deve-se traçar uma linha horizontal, a linha de amarração, na temperatura desejada e determinar a intersecção desta reta com as fronteiras entre as fases.

1) Determina-se as intersecções da linha de amarração com as fronteiras entre ambas as fases.

3) Desenha-se linhas verticais dos pontos de intersecção até o eixo horizontal, onde a composição em cada uma das respectivas fases pode ser lida.





Regra da Alavanca

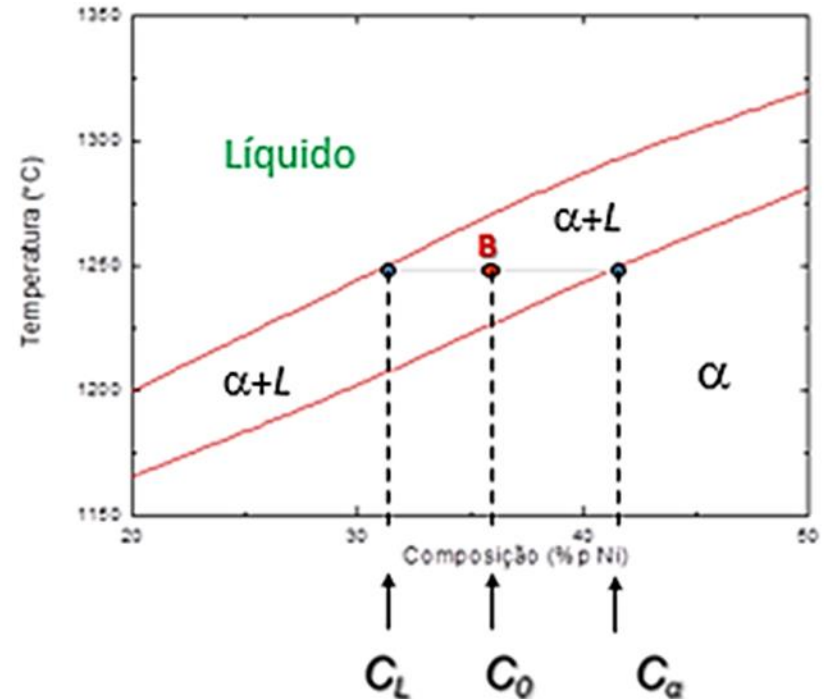
- É usada para se determinar as proporções das fases em equilíbrio em um campo de duas fases.

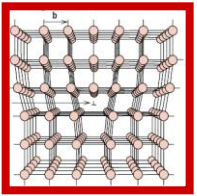
Vamos considerar novamente o exemplo anterior (ponto B do diagrama Cu-Ni). Tomando-se como C_0 a composição global da liga ao longo da linha de amarração, e como W_L e W_α as frações mássicas, respectivamente das fases líquido e α , a Regra da alavanca diz que:

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} = \frac{42,5 - 35,0}{42,5 - 31,5} = 0,7$$

Da mesma forma, para a fase α :

$$W_\alpha = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{35,0 - 31,5}{42,5 - 31,5} = 0,3$$





Diagramas Binários

4° Componentes mutuamente solúveis nos estados sól. e líq.

b) Miscibilidade parcial

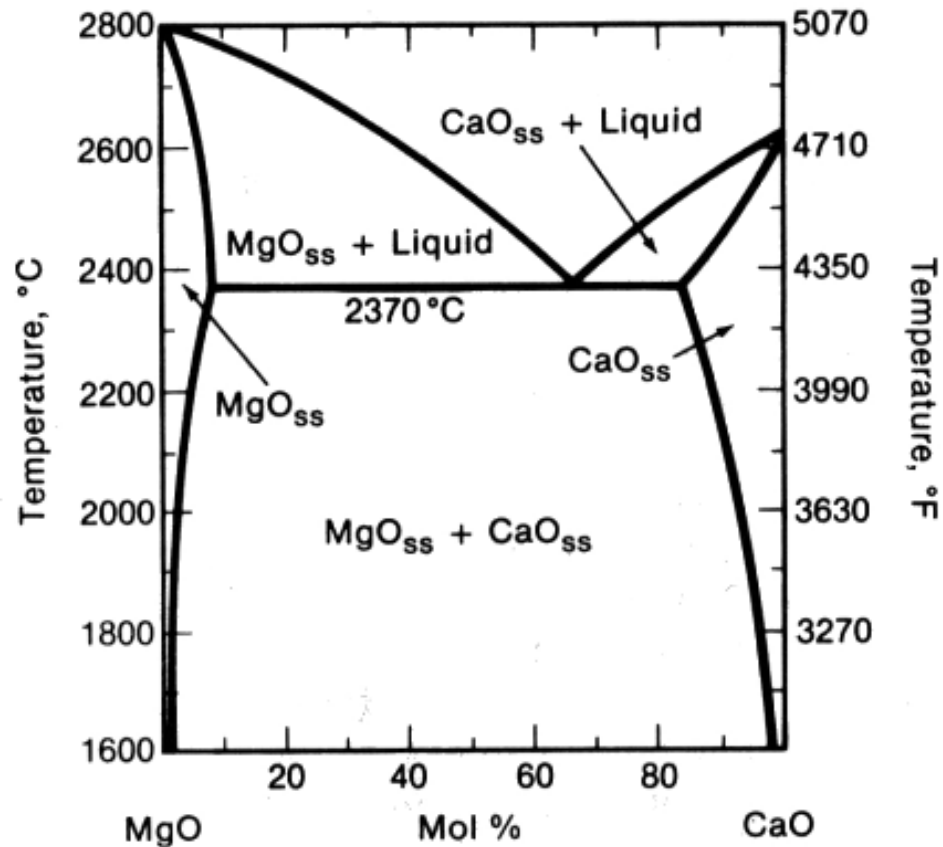
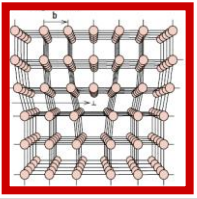


Figura 5.14: Diagrama do sistema MgO-CaO. Reação eutética e solubilidade limitada. Fonte: D. Richerson.

Dolomita: mineral de carbonato de cálcio e magnésio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$



Regra da Alavanca

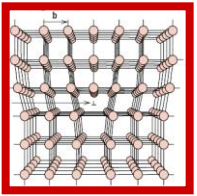
Importante:

Linhas de Amarração

Composição
das fases

Proporção
de cada fase

Regra da Alavanca

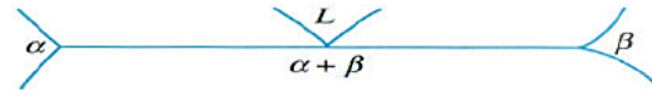


Sistemas Binários

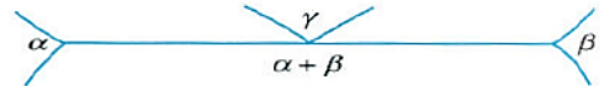
- **Três fases em equilíbrio**
 - Em um sistema binário, quando 3 fases estão em equilíbrio, o número de graus de liberdade F é zero. Assim, o equilíbrio é invariante, ou seja, o equilíbrio entre 3 fases ocorre em uma determinada temperatura e as composições das 3 fases são fixas.

As principais reações, em sistemas binários envolvendo 3 fases são:

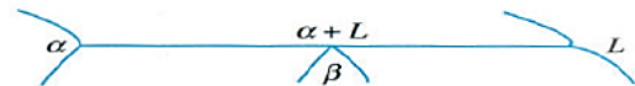
Eutética: $L \rightarrow \alpha + \beta$



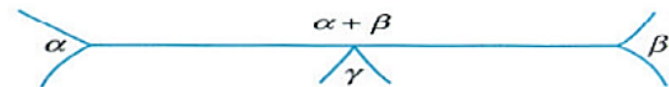
Eutetóide: $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$

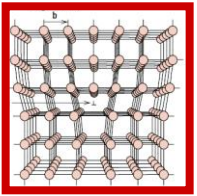


Peritética: $L + \alpha \rightarrow \beta$



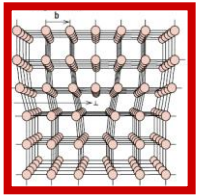
Peritetóide: $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$



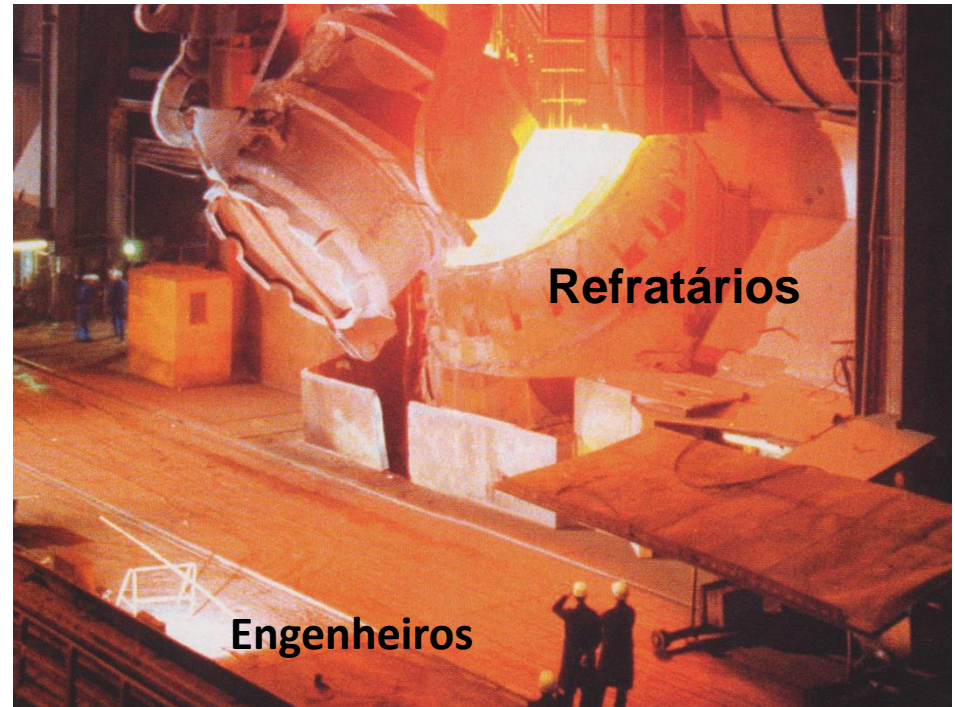


Cerâmicas

- **Pode-se determinar:**
 - T fusão de cada composto puro;
 - Influência na T fusão quando dois compostos são misturados;
 - A presença ou não e o grau de soluções sólidas ;
 - Interações de dois compostos formando outros compostos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ formando a mulita $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$);
 - T onde ocorre troca de estrutura cristalina - polimorfismo;
 - A quantidade e a composição das fases para determinada temperatura e composição;
 - Determinar parâmetros e variáveis para a sinterização.

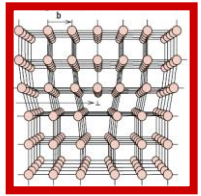


Panelas de Aço fundido



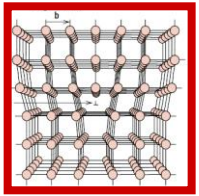
Refratários

Engenheiros

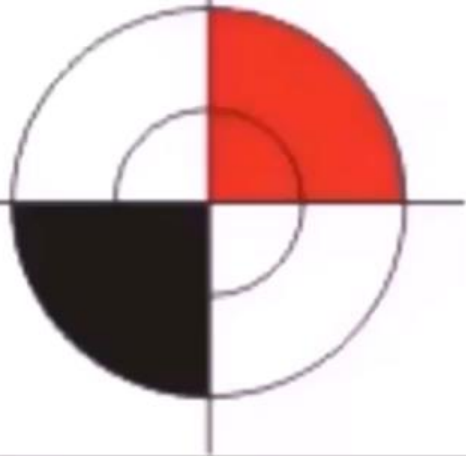


Forno de Cimento

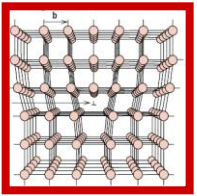




Forno de Cimento



Infracemp
Soluções para Processos Industriais



Diagramas Ternários

- **Noções básicas:**

- Número de componentes $C = 3$ (Gibbs), que podem ser:

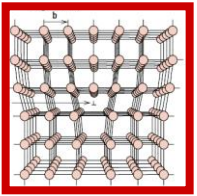
- três matérias primas, três óxidos, três fases cerâmicas

- Representado por um triângulo equilátero onde cada vértice representa 100% de um componente puro e pode ser expresso

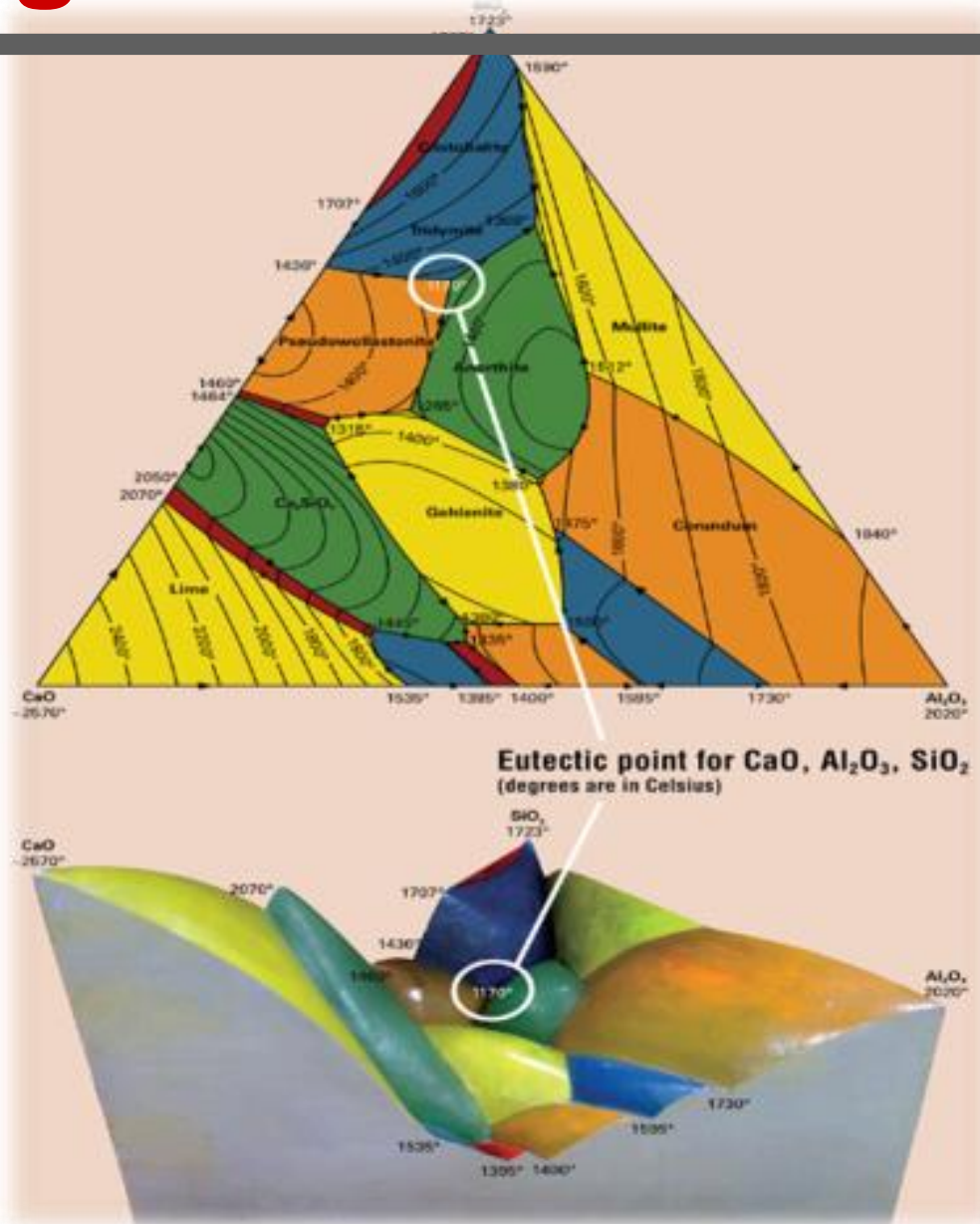
- em %molar ou % em peso.

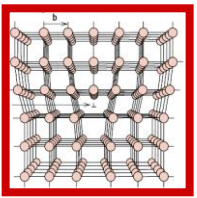
A composição de um sistema ternário fica definida quando temos a fração molar (fração mássica) dos componentes.

$$X_a + X_b + X_c = 1$$



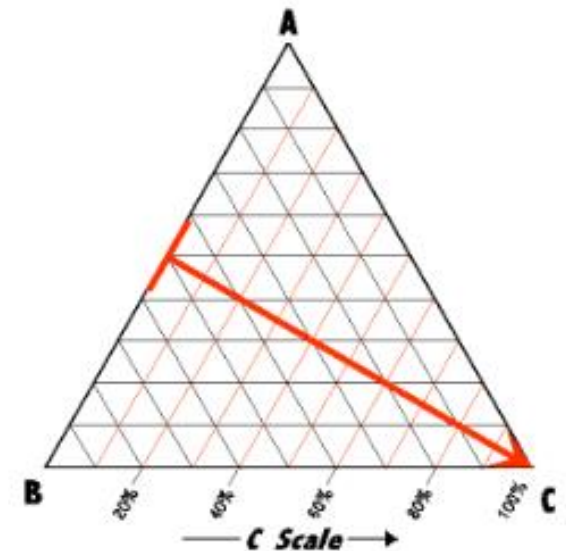
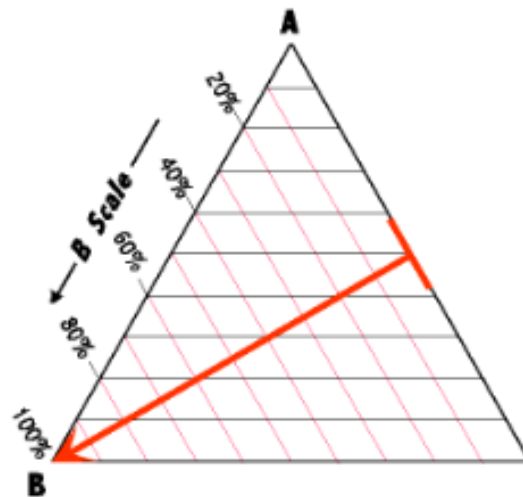
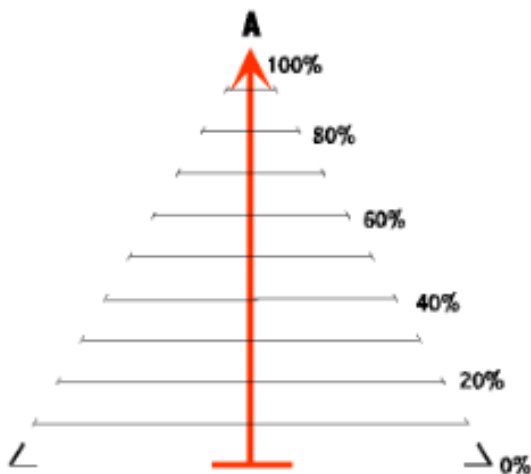
Diagramas Ternários

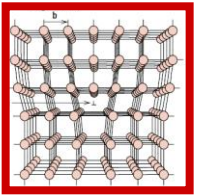




Diagramas Ternários

Se quantidades de um componente são progressivamente adicionadas ou subtraídas de uma mistura ternária e os outros dois componentes são mantidos numa razão constante, a mudança da composição ternária segue uma linha reta.





Diagramas Ternários

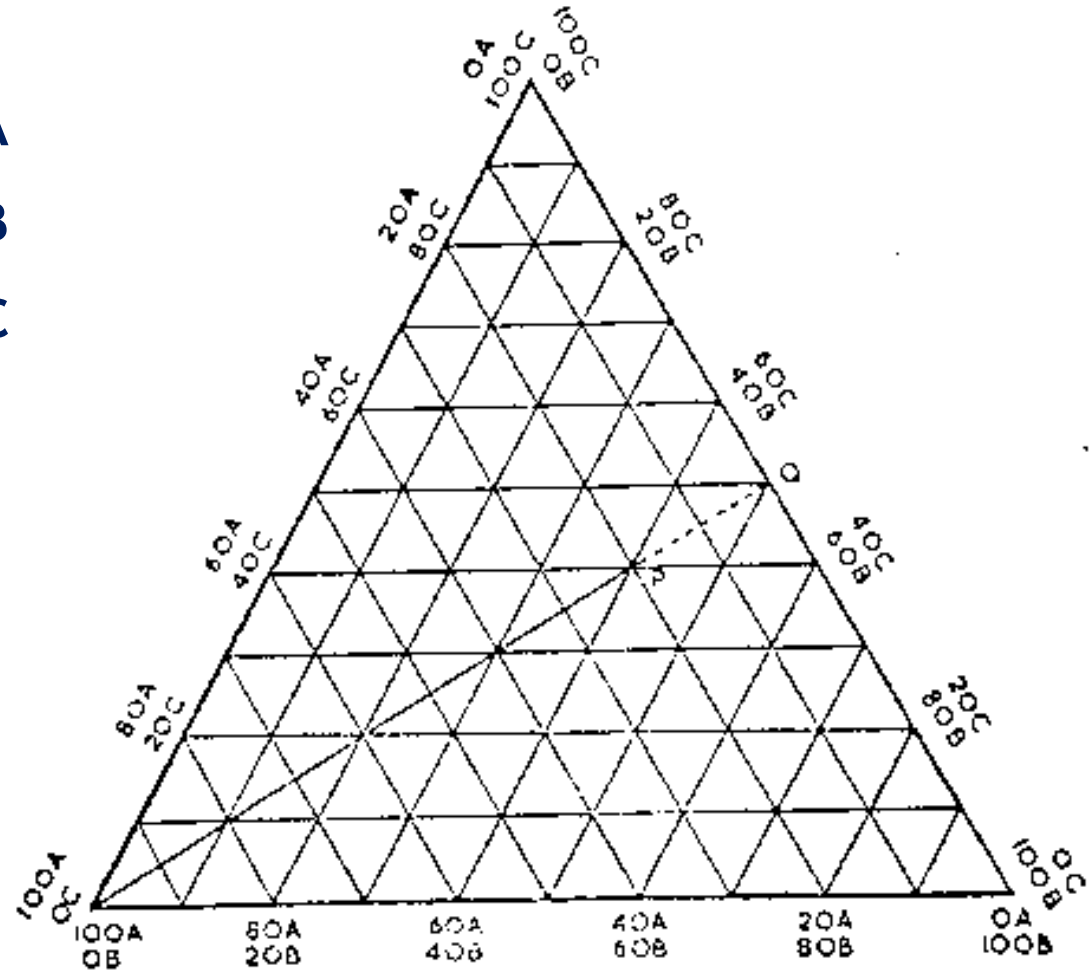
Por exemplo:

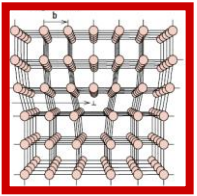
Ponto P: 20% A

40% B

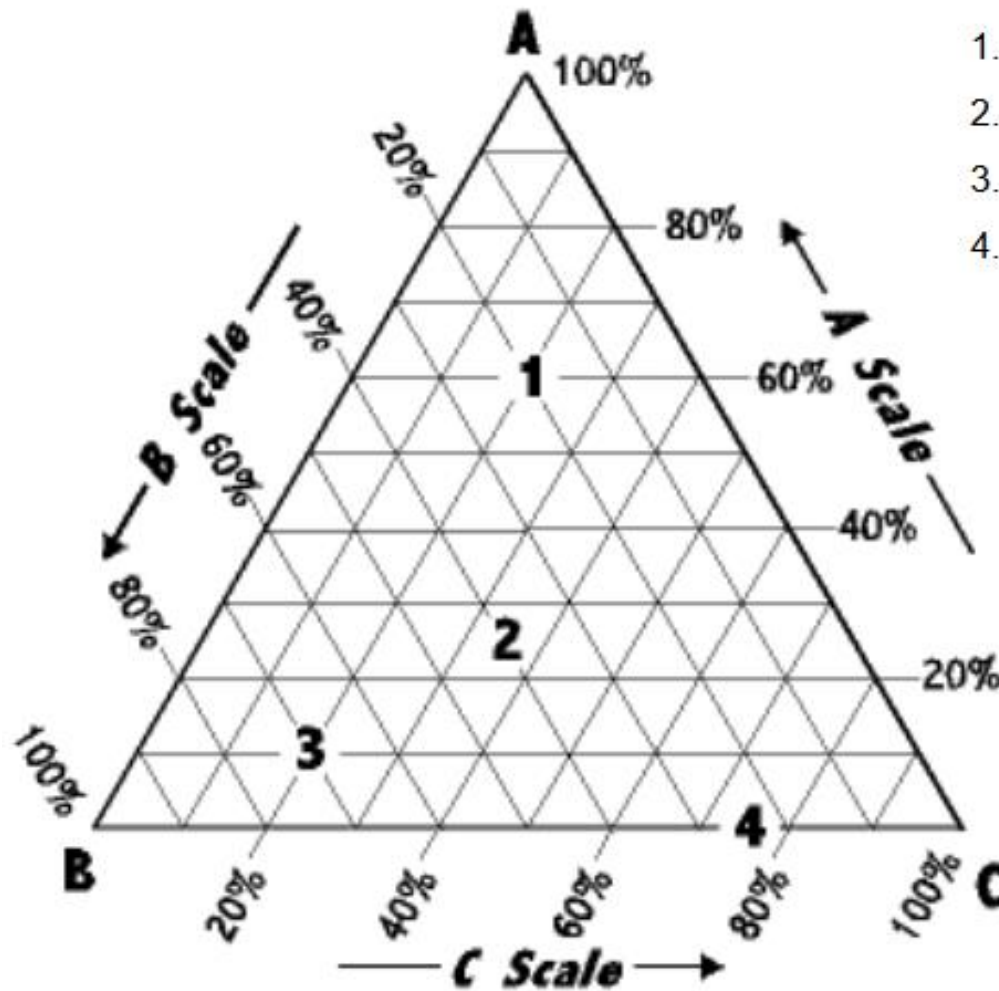
40% C

BASE GEOMÉTRICA

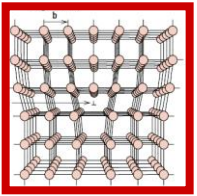




Diagramas Ternários



1. 60% A | 20% B | 20% C = 100%
2. 25% A | 40% B | 35% C = 100%
3. 10% A | 70% B | 20% C = 100%
4. 0.0% A | 25% B | 75% C = 100%



Diagramas Ternários

BASE MATEMÁTICA

Mistura **M** = 70% A + 20% B + 10% C

Mistura **N** = 40% A + 10% B + 50% C

Se foram misturadas uma parte de **M** com três partes de **N**, isto é, **25% M + 75% N**, a mistura resultante terá a composição:

$$0,25 \times 70\% A + 0,75 \times 40\% A = 47,5\% A$$

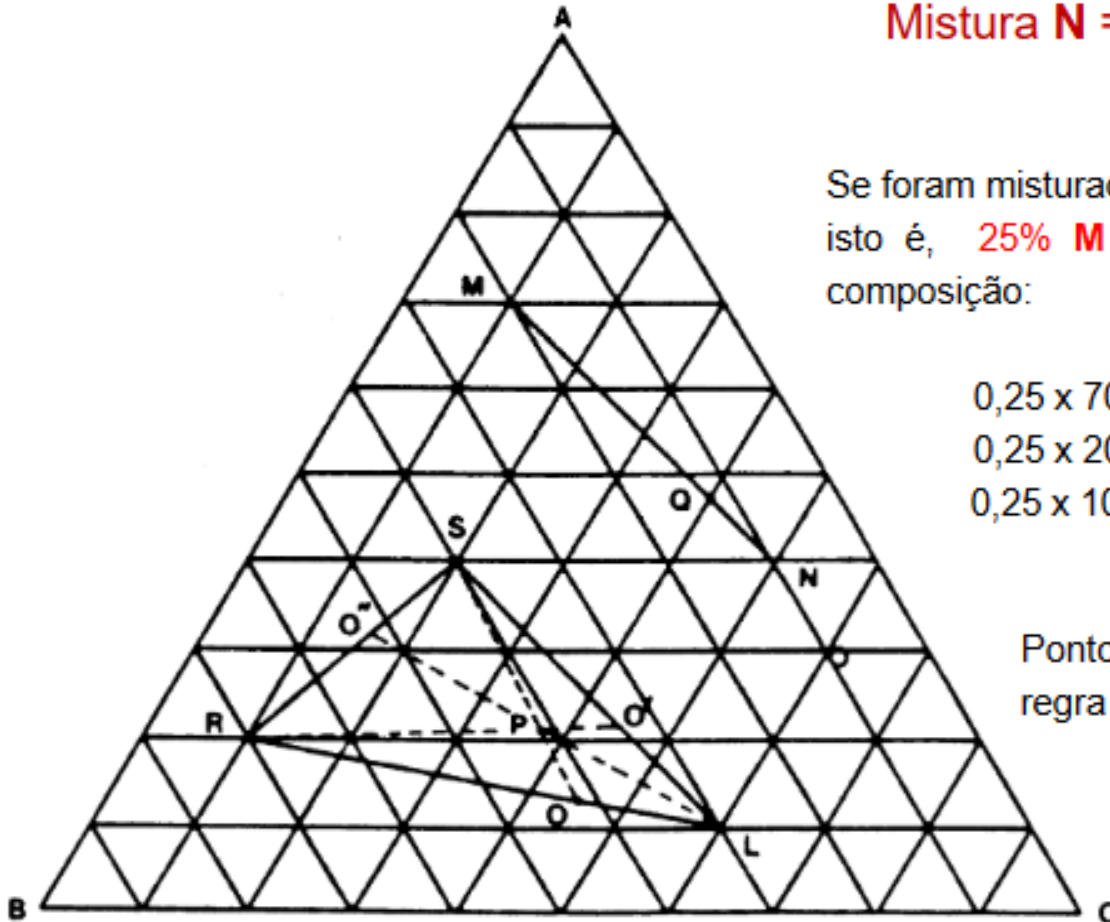
$$0,25 \times 20\% B + 0,75 \times 10\% B = 12,5\% B$$

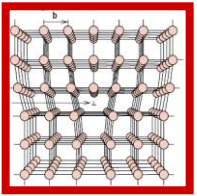
$$0,25 \times 10\% C + 0,75 \times 50\% C = 40,0\% C$$

Ponto **Q**, sobre o segmento **MN**. Aplicando a regra da alavanca a esse segmento, tem-se:

$$\% \mathbf{M} = (\mathbf{QN}/\mathbf{MN}) \times 100 = 25\%$$

$$\% \mathbf{N} = (\mathbf{MQ}/\mathbf{MN}) \times 100 = 75\%$$





Diagramas Ternários

Mistura **R** = 20% **A** + 70% **B** + 10% **C**

Mistura **S** = 40% **A** + 40% **B** + 20% **C**

Mistura **L** = 10% **A** + 30% **B** + 60% **C**

Se se misturarem duas partes de **R** com três partes de **S** e cinco partes de **L**, isto é, 20% **R** + 30% **S** + 50% **L**, a mistura resultante terá a composição:

$$0,20 \times 20\% \text{ A} + 0,30 \times 40\% \text{ A} + 0,50 \times 10\% \text{ A} = 21\% \text{ A}$$

$$0,20 \times 70\% \text{ B} + 0,30 \times 40\% \text{ B} + 0,50 \times 30\% \text{ B} = 41\% \text{ B}$$

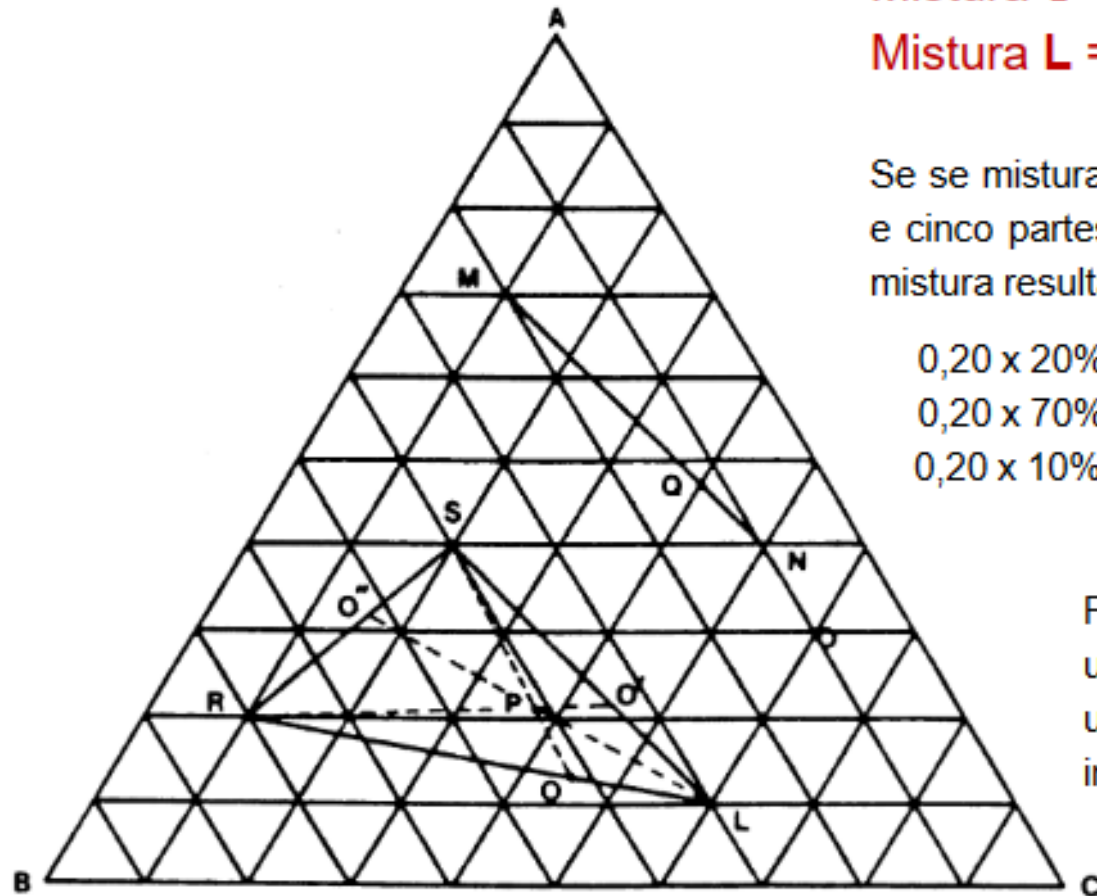
$$0,20 \times 10\% \text{ C} + 0,30 \times 20\% \text{ C} + 0,50 \times 60\% \text{ C} = 38\% \text{ C}$$

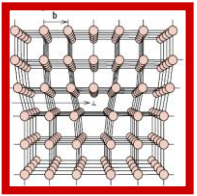
Pode-se calcular as proporções de **R**, **S** e **L** usando três alavancas lineares independentes, unindo cada um dos vértices ao ponto **P** até interceptar o lado oposto, tal que:

$$\% \text{ S} = (PO/SO) \times 100 = 30\%$$

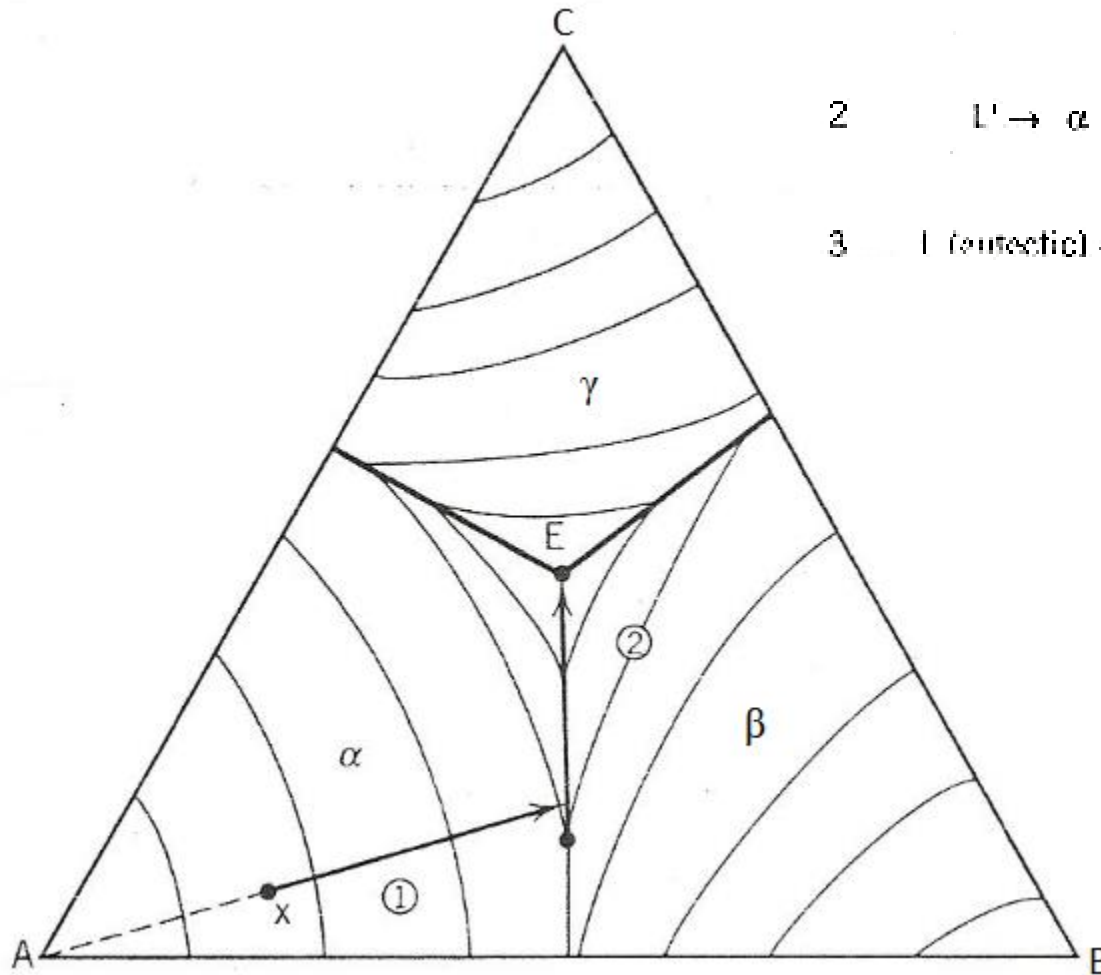
$$\% \text{ R} = (PO'/RO') \times 100 = 20\%$$

$$\% \text{ L} = (PO''/LO'') \times 100 = 50\%$$

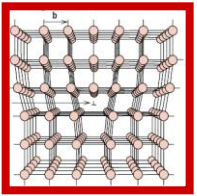




Diagramas Ternários

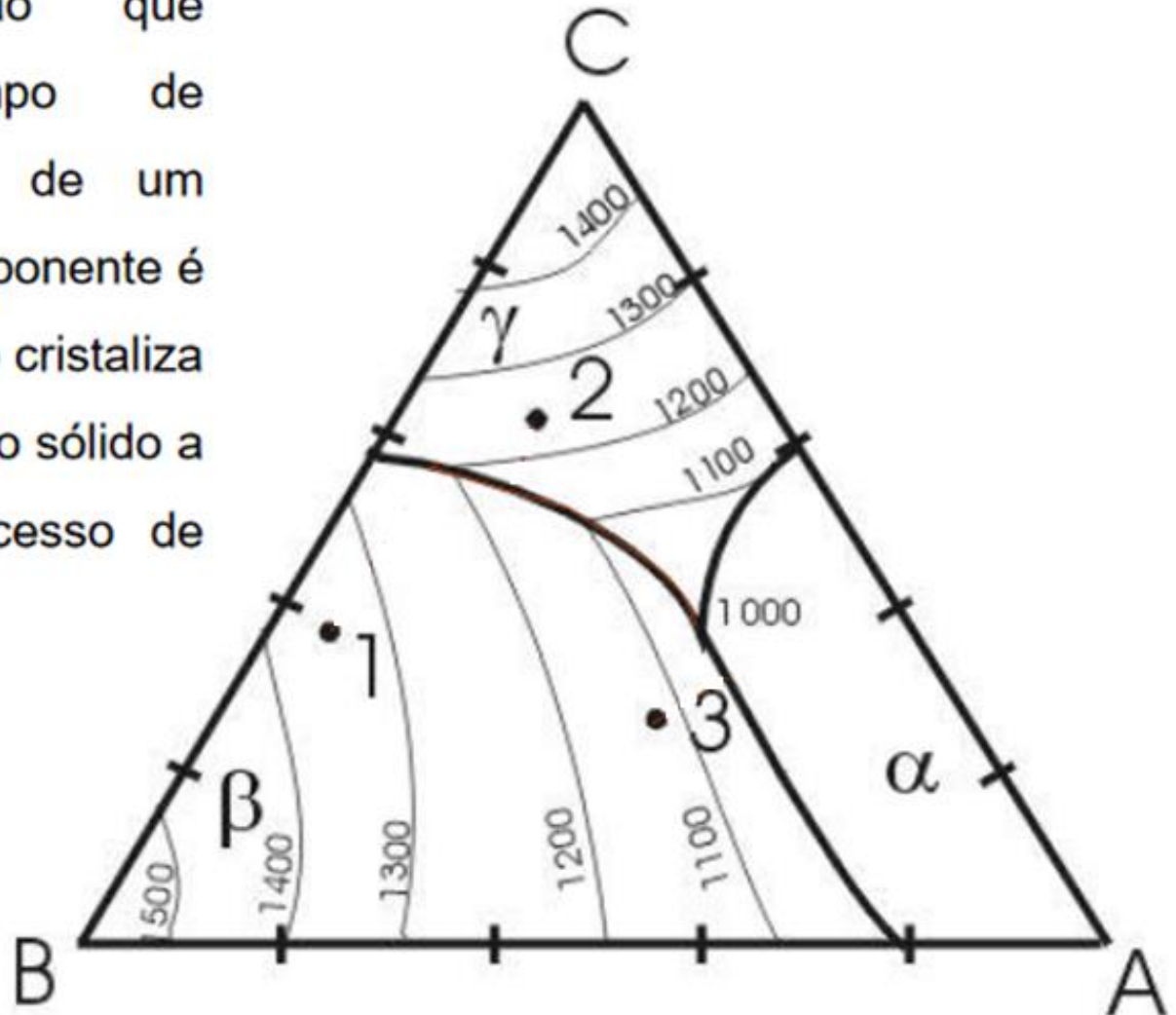


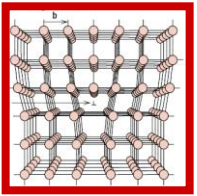
<u>Path</u>	<u>Reaction</u>	<u>Schematic microstructure</u>
1	$L \rightarrow \alpha + L'$	
2	$L' \rightarrow \alpha + \beta + L''$	
3	$L \text{ (eutectic)} \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$	



Diagramas Ternários

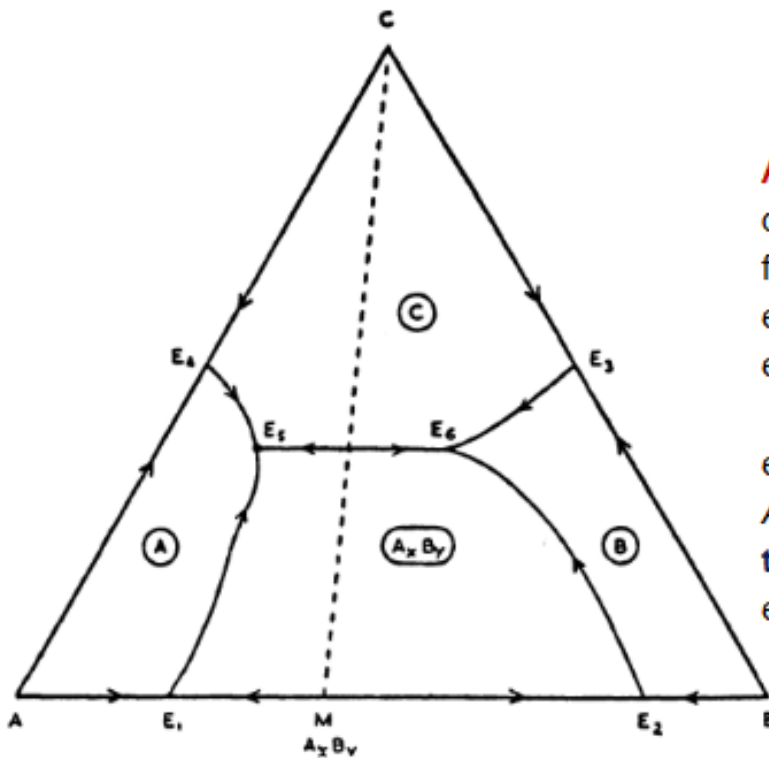
Qualquer composição que pertença ao campo de cristalização primária de um componente, esse componente é o primeiro sólido que se cristaliza a partir do líquido (último sólido a desaparecer num processo de fusão).





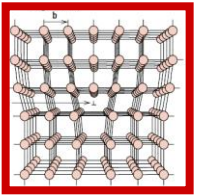
Diagramas Ternários

Diagrama de equilíbrio de fases para o caso em que entre os componentes A e C não há formação de compostos, entre B e C também não há formação de nenhum composto (fase), mas, entre A e B ocorre a formação de um composto estequiométrico A_xB_y .



A linha tracejada é conhecida como **Linha de Alkemada, ou linha de compatibilidade**. É uma linha de compatibilidade pois toda composição que for formulada sobre ela, resultará em duas fases que são C e A_xB_y . Isto é, elas são compatíveis e podem coexistir em equilíbrio.

Ela também divide o triângulo total equilátero em outros dois triângulos, AMC ou $A-A_xB_y-B$, e MBC ou A_xB_y-B-C . Esses novos triângulos são conhecidos como **triângulos conjugados** pois "conjugam" 3 fases em equilíbrio.



Diagramas Ternários

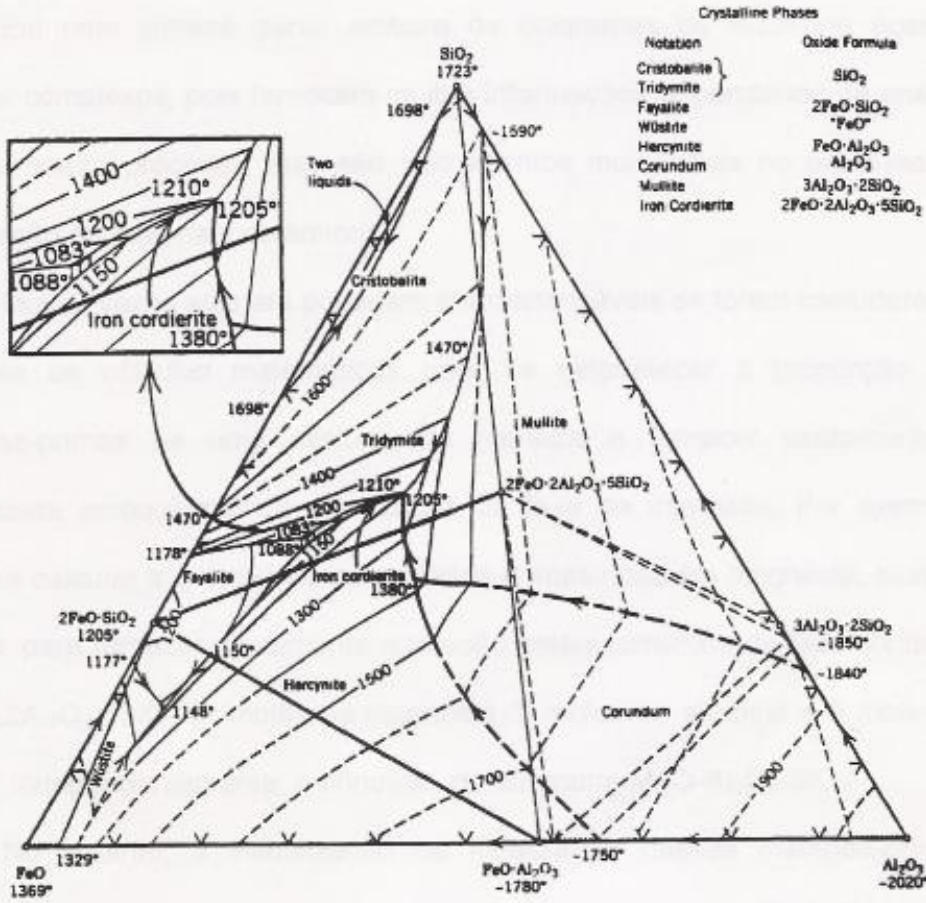


Figura 28: Sistema $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

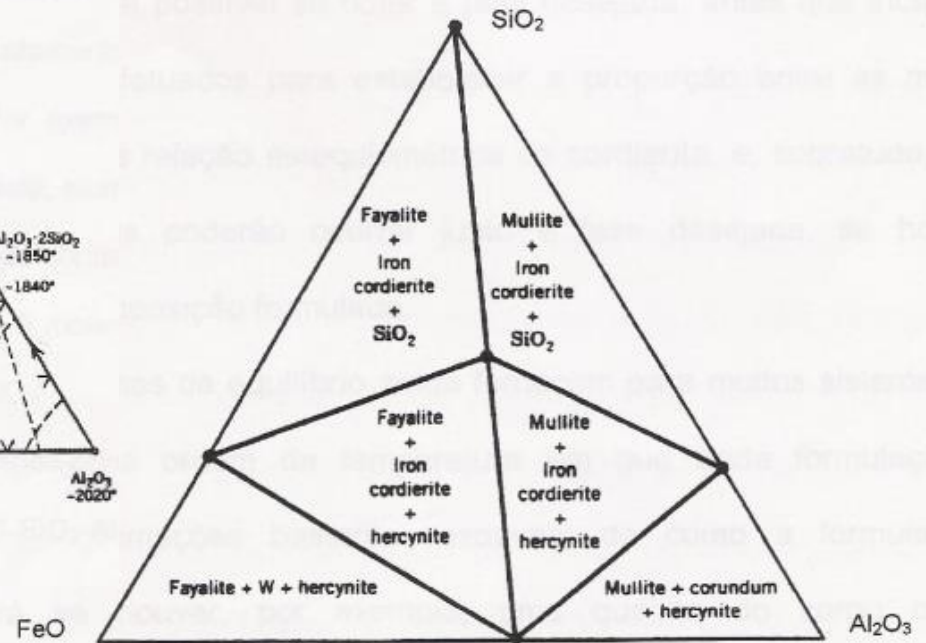
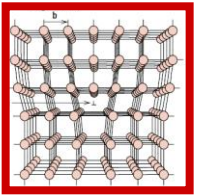
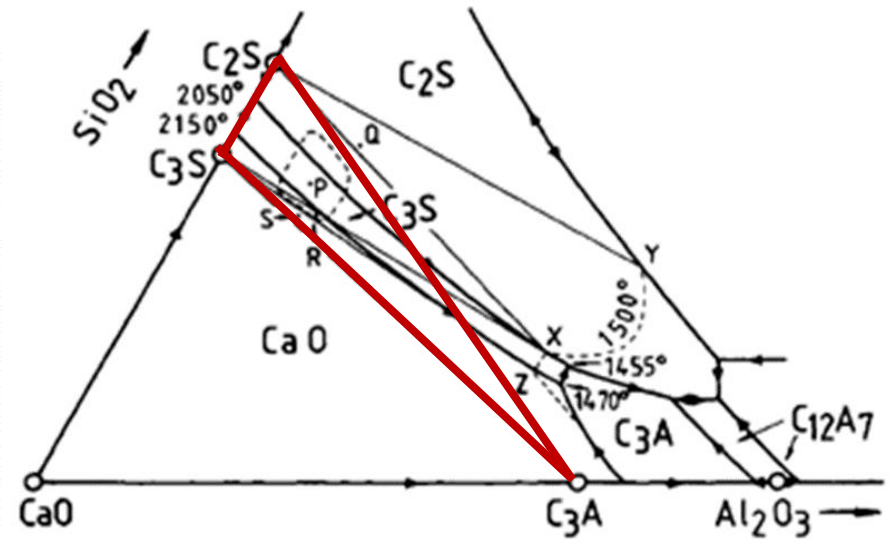
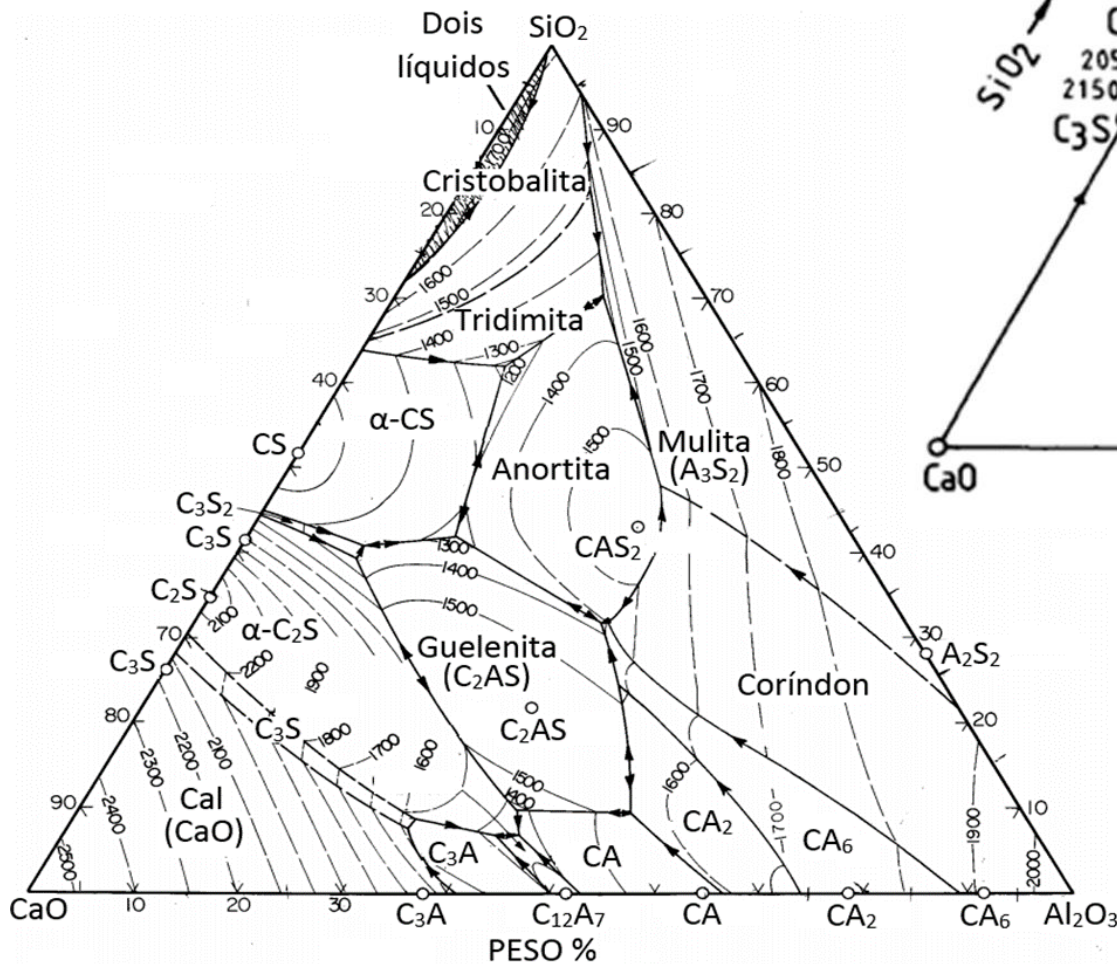


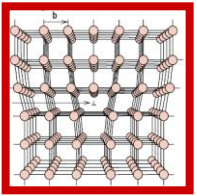
Figura 29: Triângulos de compatibilidade para o sistema $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ à temperatura ambiente.



Diagramas Ternários

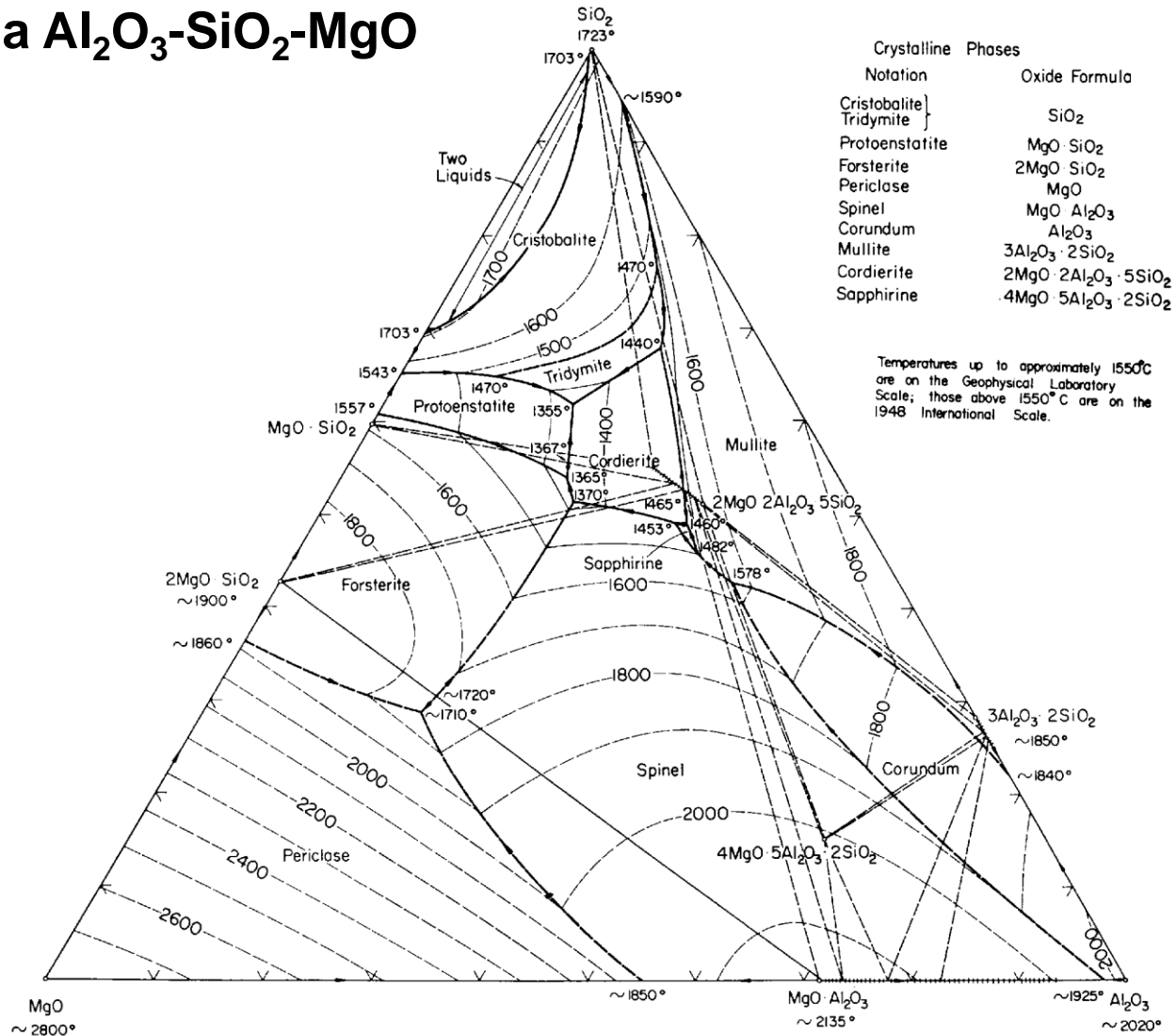
Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$

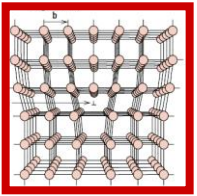




Diagramas Ternários

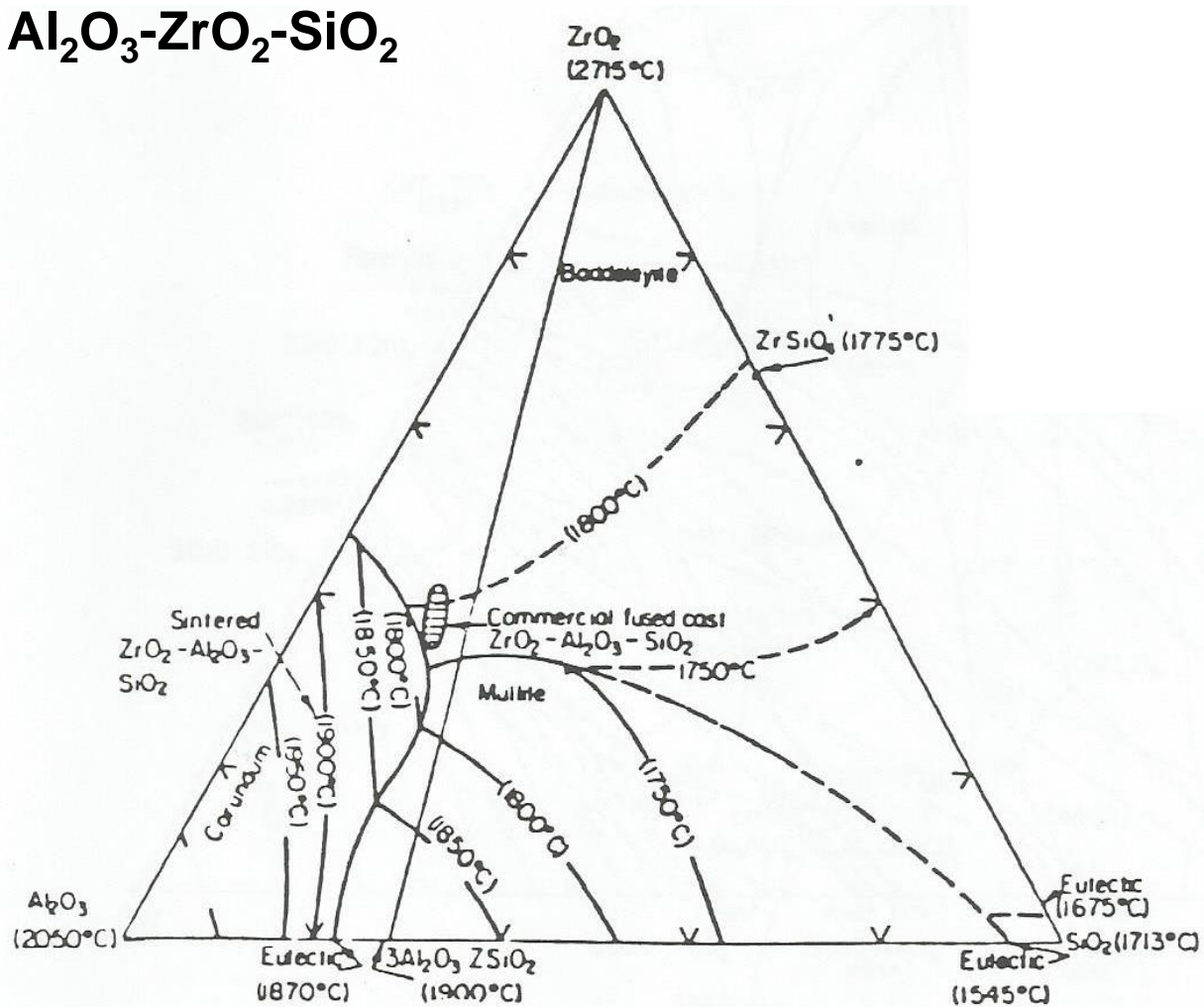
Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$

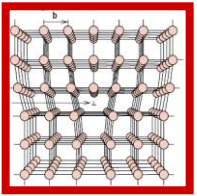




Diagramas Ternários

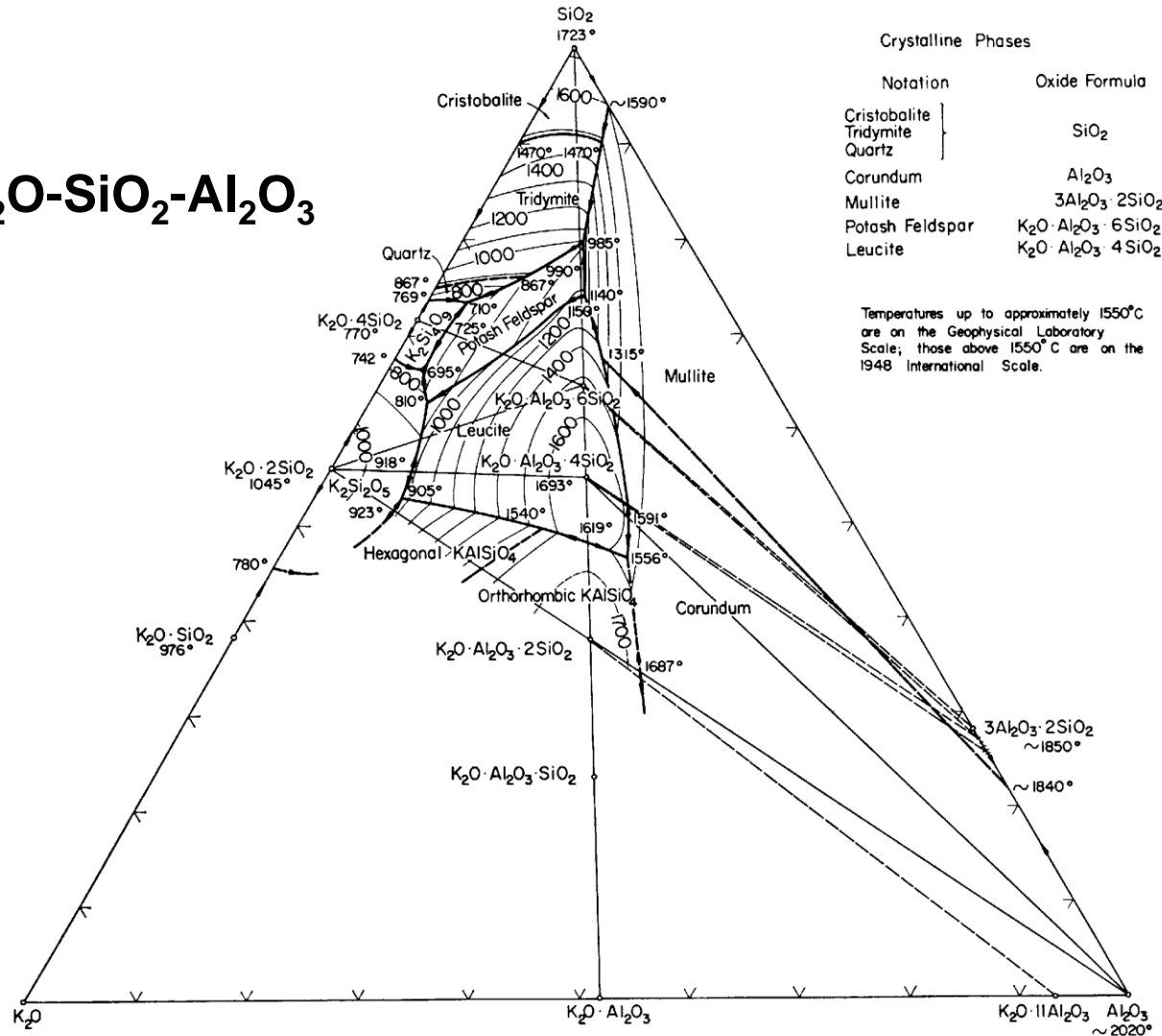
Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$

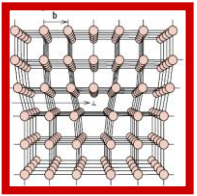




Diagramas Ternários

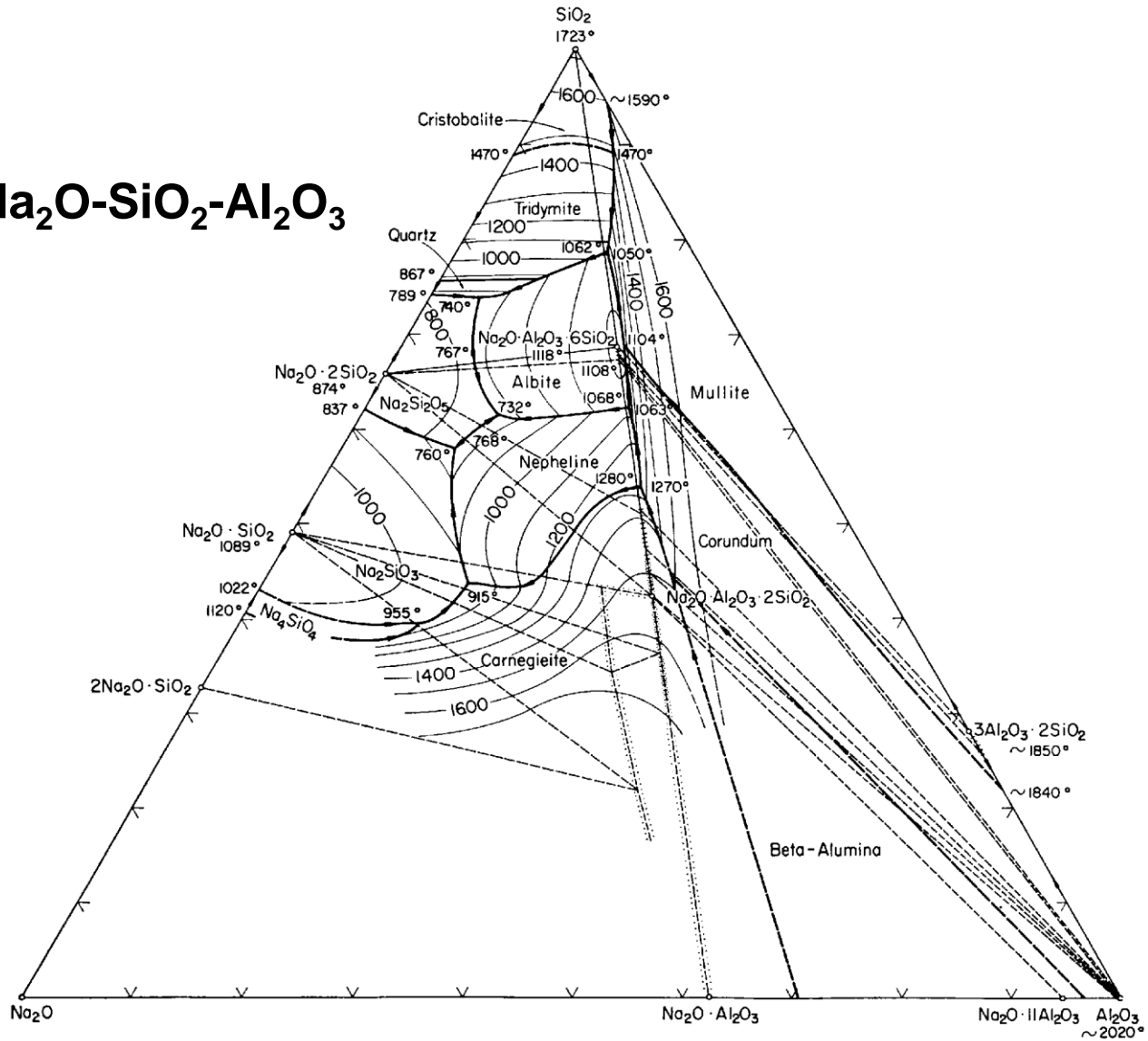
Sistema $K_2O-SiO_2-Al_2O_3$





Diagramas Ternários

Sistema $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Escola Politécnica

DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Ciência dos Materiais

Unidade II

Falhas em Materiais, Mecanismos de Aumento de Resistência, Diagramas de Fases

Prof. Dr. Marcelo Strozi Cilla

marceloscilla@gmail.com

IA		IIB										IIB										IIB										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
H		Li		Na		K		Rb		Cs		Fr		He		Ne		Ar		Kr		Xe		Rn		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Z		3		11		19		27		35		43		51		59		67		75		83		91		97		101		105		109		113		117		121		125		129		133		137		141		145		149		153		157		161		165		169		173		177		181		185		189		193		197		201		205		209		213		217		221		225		229		233		237		241		245		249		253		257		261		265		269		273		277		281		285		289		293		297		301		305		309		313		317		321		325		329		333		337		341		345		349		353		357		361		365		369		373		377		381		385		389		393		397		401		405		409		413		417		421		425		429		433		437		441		445		449		453		457		461		465		469		473		477		481		485		489		493		497		501		505		509		513		517		521		525		529		533		537		541		545		549		553		557		561		565		569		573		577		581		585		589		593		597		601		605		609		613		617		621		625		629		633		637		641		645		649		653		657		661		665		669		673		677		681		685		689		693		697		701		705		709		713		717		721		725		729		733		737		741		745		749		753		757		761		765		769		773		777		781		785		789		793		797		801		805		809		813		817		821		825		829		833		837		841		845		849		853		857		861		865		869		873		877		881		885		889		893		897		901		905		909		913		917		921		925		929		933		937		941		945		949		953		957		961		965		969		973		977		981		985		989		993		997	
1		3		9		17		25		33		41		49		57		65		73		81		89		95		101		107		113		119		125		131		137		143		149		155		161		167		173		179		185		191		197		203		209		215		221		227		233		239		245		251		257		263		269		275		281		287		293		299		305		311		317		323		329		335		341		347		353		359		365		371		377		383		389		395		401		407		413		419		425		431		437		443		449		455		461		467		473		479		485		491		497		503		509		515		521		527		533		539		545		551		557		563		569		575		581		587		593		599		605		611		617		623		629		635		641		647		653		659		665		671		677		683		689		695		701		707		713		719		725		731		737		743		749		755		761		767		773		779		785		791		797		803		809		815		821		827		833		839		845		851		857		863		869		875		881		887		893		899		905		911		917		923		929		935		941		947		953		959		965		971		977		983		989		995		1001																																																																																																																																																					

