



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Escola Politécnica

DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Ciência dos Materiais

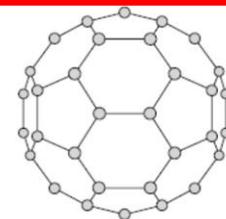
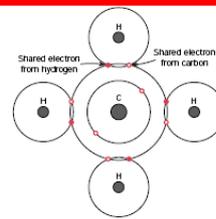
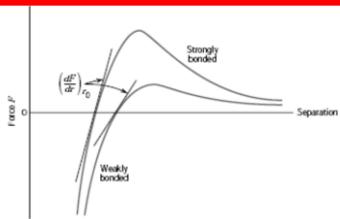
Unidade II

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

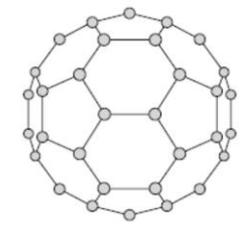
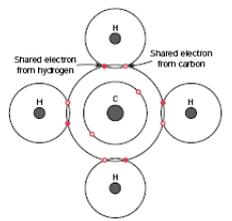
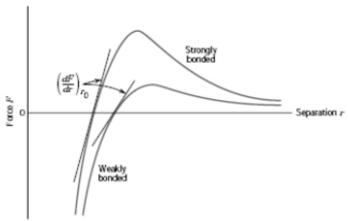
Prof. Dr. Marcelo Strozi Cilla

marceloscilla@gmail.com

IA		IIB										IIB										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																				
IA		IIB										IIB										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																				
IA		IIB										IIB										IIB										IIB										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	Tm	66	Yb	67	Lu	68	Hf	69	Ta	70	W	71	Re	72	Os	73	Ir	74	Pt	75	Au	76	Hg	77	Tl	78	Pb	79	Bi	80	Po	81	At	82	Fr	83	Ra	84	Ac	85	Th	86	Pa	87	U	88	Np	89	Pu	90	Am	91	Cm	92	Bk	93	Cf	94	Es	95	Fm	96	Mendelevium	97	Nobelium	98	Lawrencium	99	100	Ununnilium	101	Ununnilium	102	Ununnilium	103	Ununnilium	104	Ununnilium	105	Ununnilium	106	Ununnilium	107	Ununnilium	108	Ununnilium	109	Ununnilium	110	Ununnilium	111	Ununnilium	112	Ununnilium	113	Ununnilium	114	Ununnilium	115	Ununnilium	116	Ununnilium	117	Ununnilium	118	Ununnilium	119	Ununnilium	120	Ununnilium

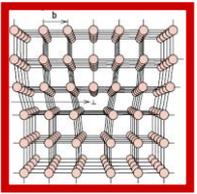


IA		IIA										IIIB										IIB										IIIA										IIIV										IIV										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
IA		IIA										IIIB										IIB										IIIA										IIIV										IIV										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
IA		IIA										IIIB										IIB										IIIA										IIIV										IIV										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000



Tipos e Mecanismos de Fratura

IA		IIA										IIIB										IIB										IIIA										IIIV										IIV										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
IA		IIA										IIIB										IIB										IIIA										IIIV										IIV										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
IA		IIA										IIIB										IIB										IIIA										IIIV										IIV										IIB										IIB										IIB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	

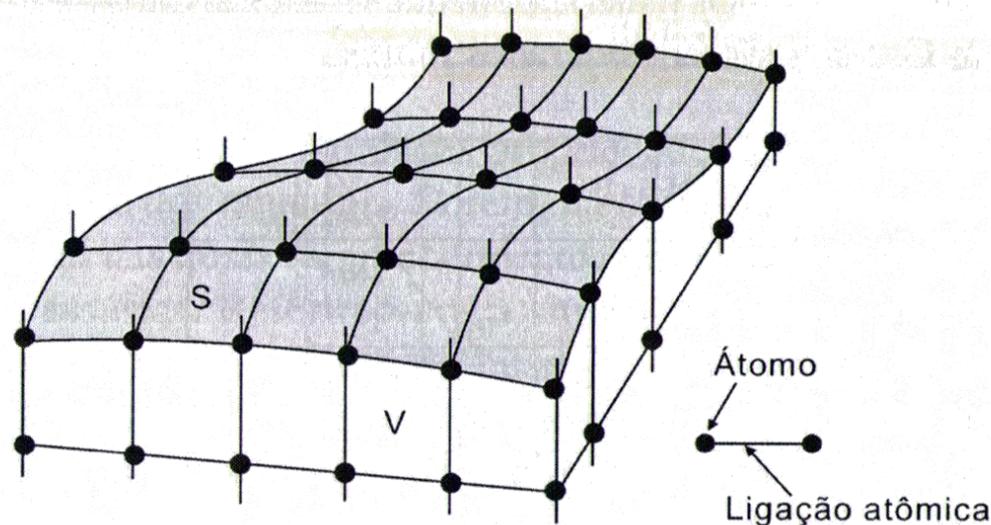


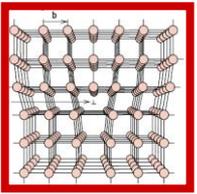
Fratura

- 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)

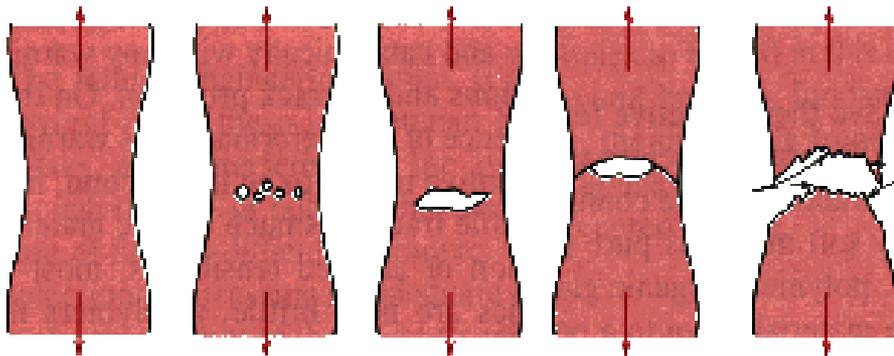


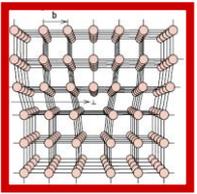


Fratura

- **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.



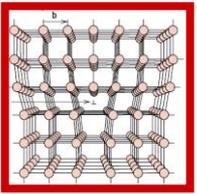


Fratura

- **Fratura Frágil:**

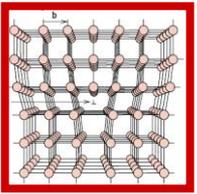
- o material se deforma pouco, antes de fraturar;
- O processo de propagação pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas;
- A partir de um certo ponto, a trinca é dita instável, pois ela se propagará mesmo sem aumento na tensão aplicada.



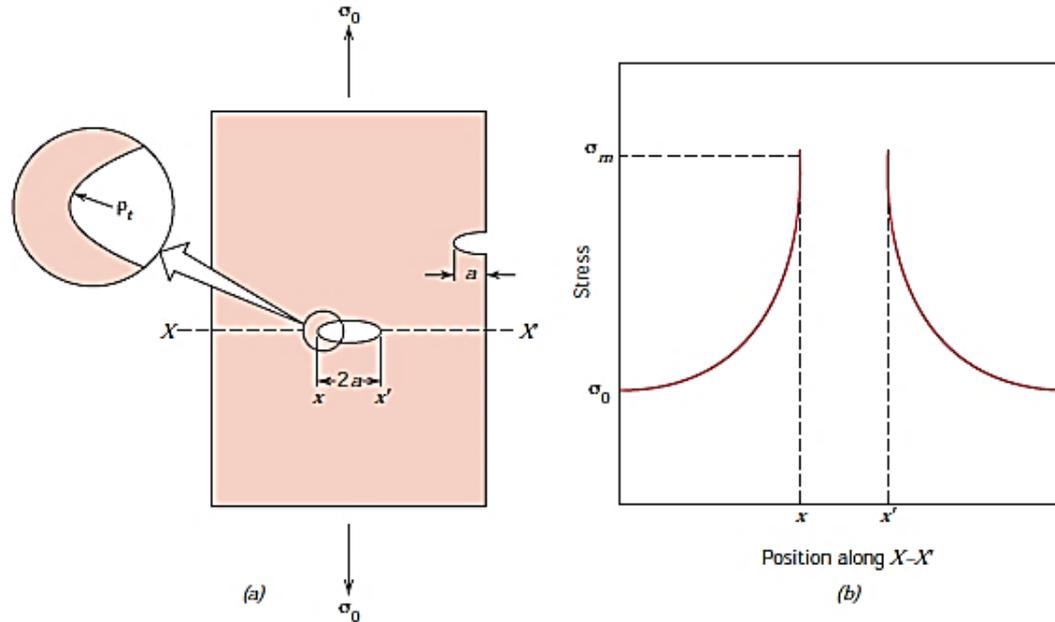


Mecânica da Fratura

- 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).



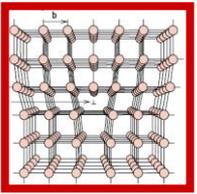
Mecânica da Fratura



- 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

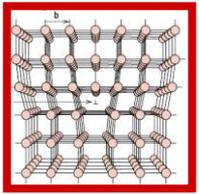
- Todos os materiais frágeis possuem uma grande quantidade de defeitos e trincas;
- A fratura ocorrerá quando a resistência à tração teórica do material for excedida na extremidade de um desses defeitos;
- A tensão crítica exigida para a propagação da trinca:

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

E = módulo de elasticidade

γ_s = energia superficial específica

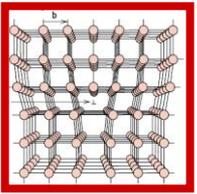
a = metade do comprimento de uma trinca interna



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).





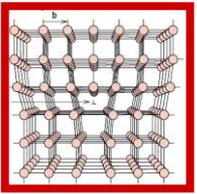
Fadiga

- **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.





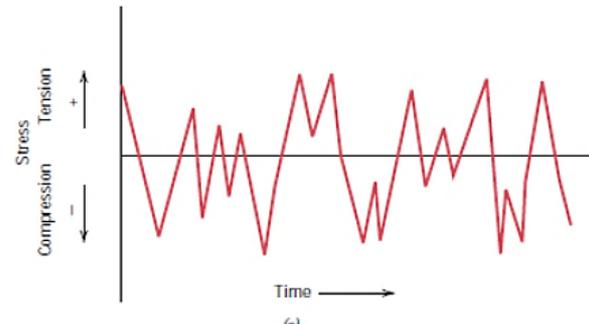
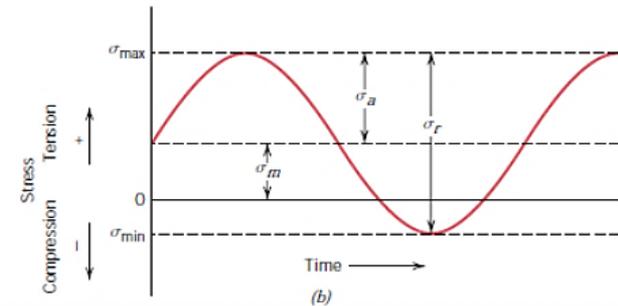
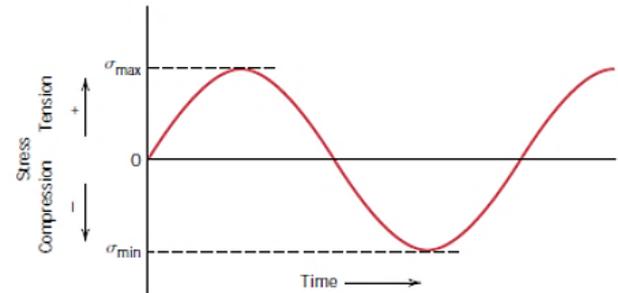
Fadiga

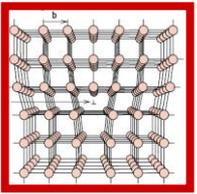
- Modalidades de tensão oscilante-tempo.

- 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:

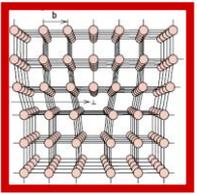
$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

- Amplitude de tensão:
(tensão alternada)

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

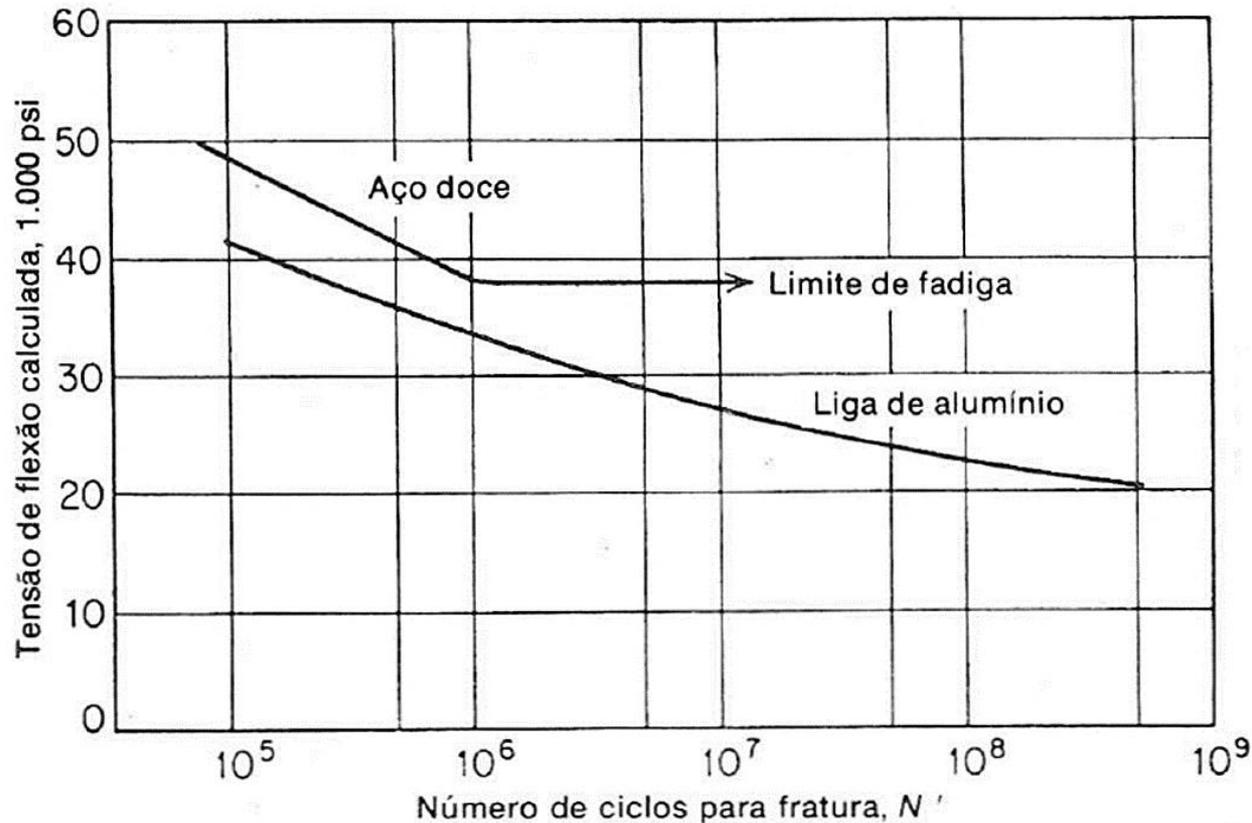
- Razão de tensão:

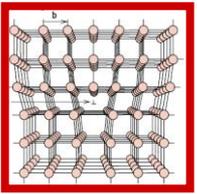
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



Fadiga

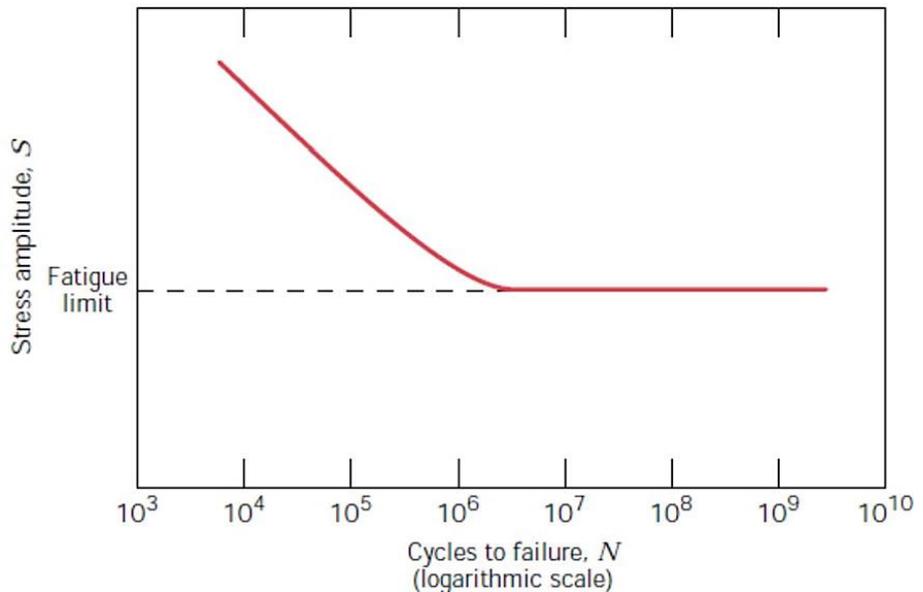
- Comportamento Tensão - N° de ciclos ($\sigma - N$)
- 2 Tipos Possíveis: com ou sem limite de fadiga.

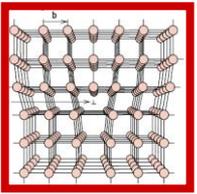




Fadiga

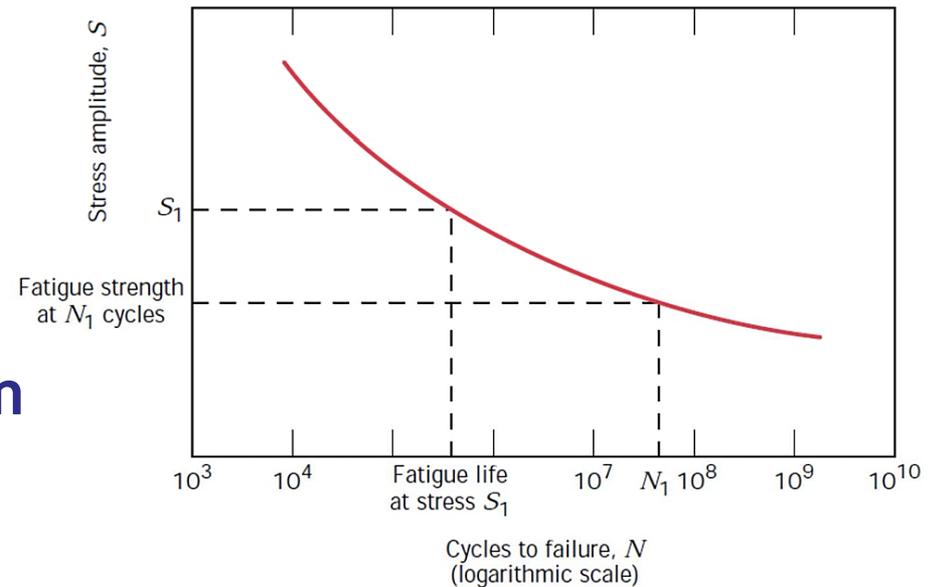
- **Limite de fadiga:** abaixo desse valor de tensão, não irá ocorrer falha
- Para vários tipos de aços: limite por volta de 35-60 % da tensão de escoamento.
- Limite de fadiga observado em aços e ligas a base de Ti.

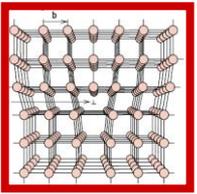




Fadiga

- 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**.



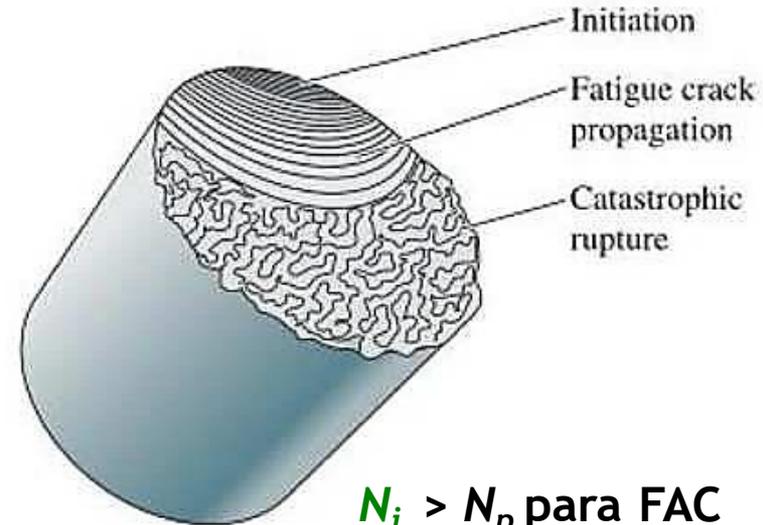


Fadiga

- **Etapas da Falha por Fadiga**

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

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



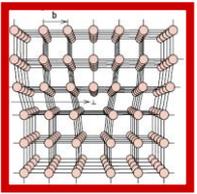
$N_i > N_p$ para FAC
 $N_p > N_f$ para FBC

$$N = N_i + N_p$$

Ciclos necessários para
iniciação da trinca

Ciclos necessários para
propagação da trinca

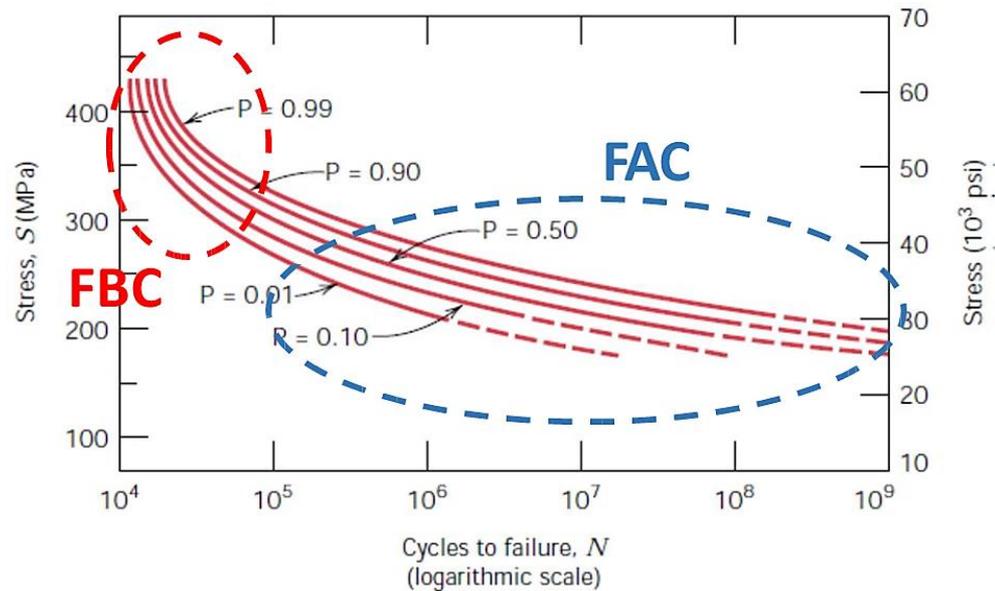
- **Comumente se iniciam na superfície devido a um concentrador de tensões.**

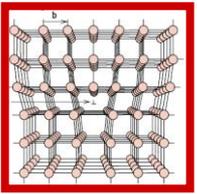


Fadiga

- 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



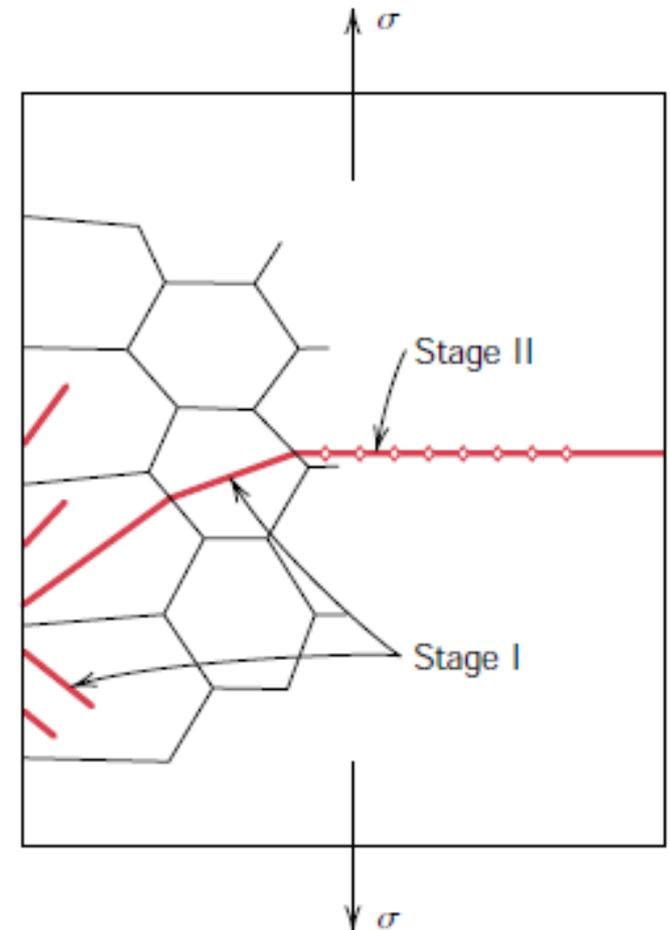


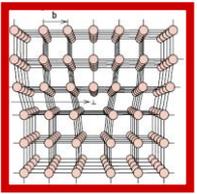
Fadiga

• 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.



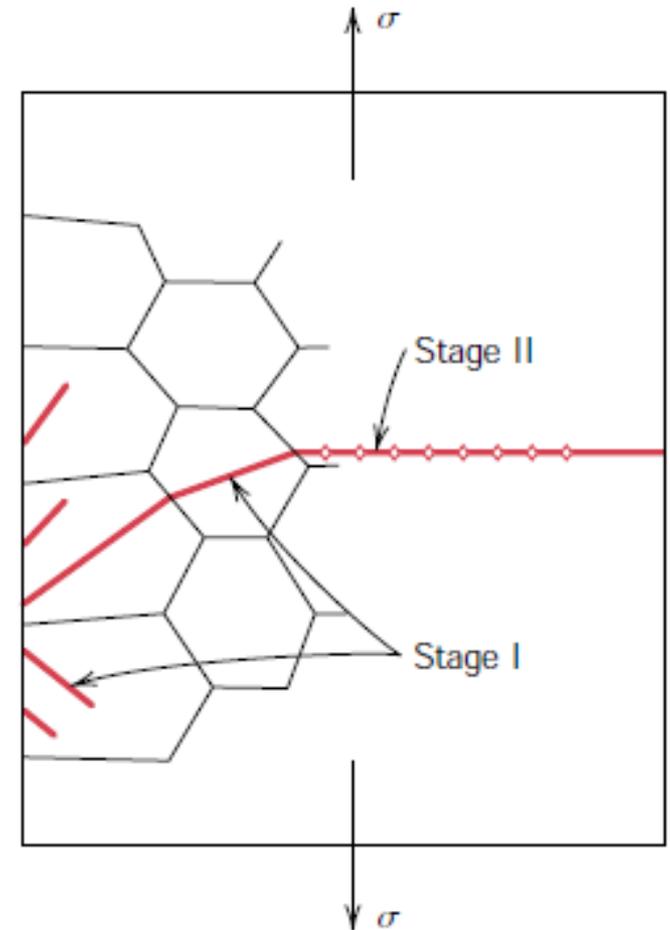


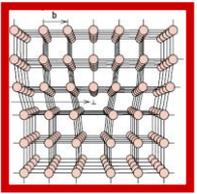
Fadiga

• 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**

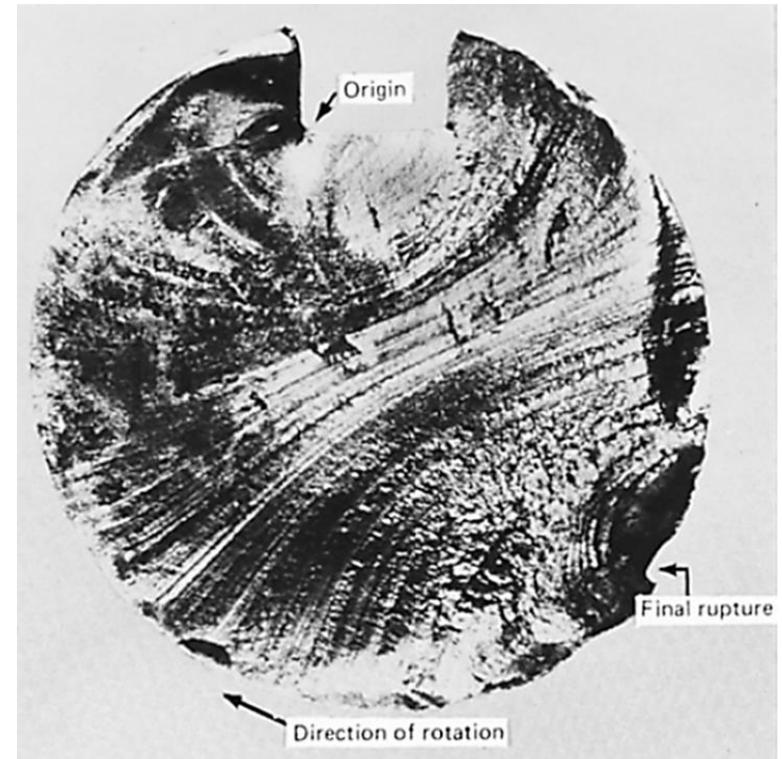


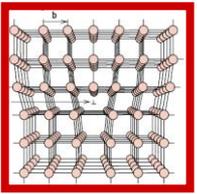


Fadiga

- **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.

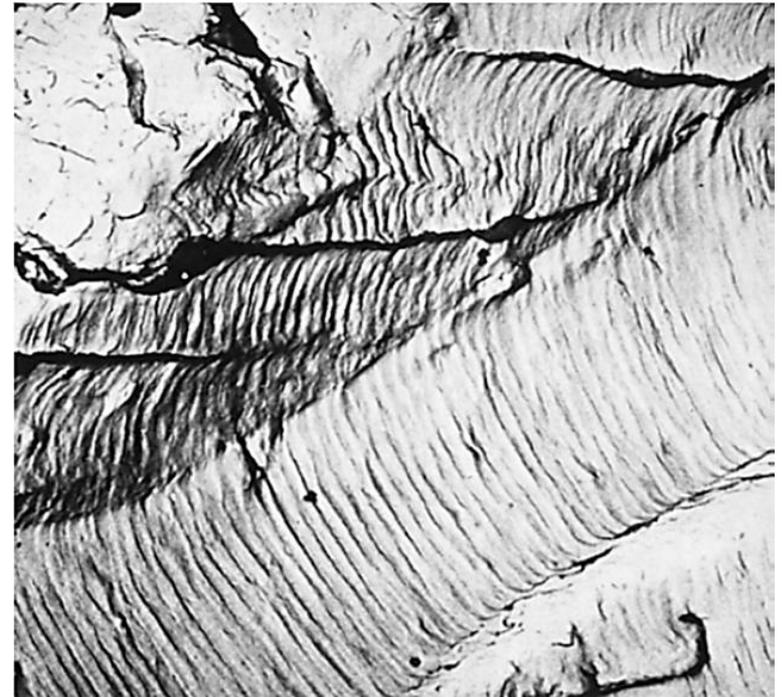


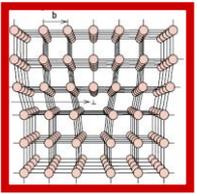


Fadiga

- **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.





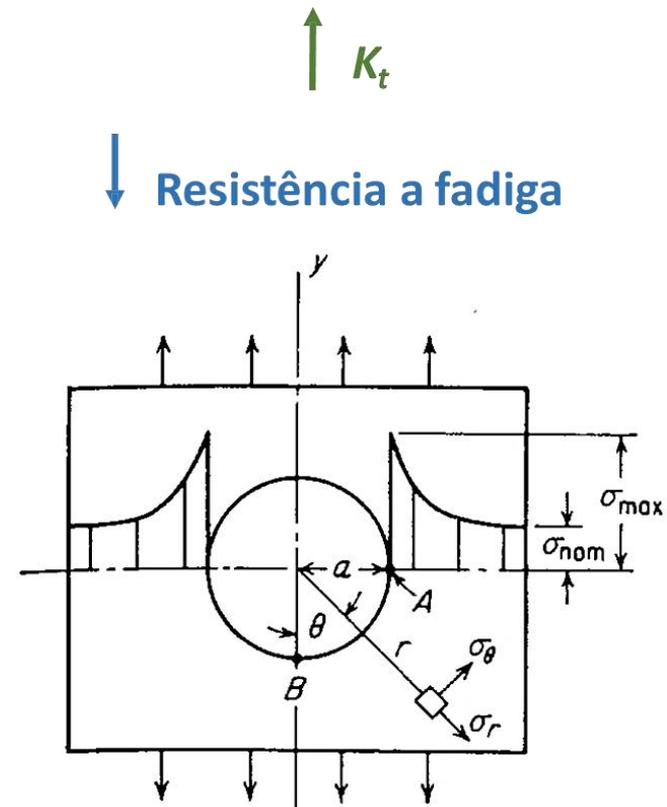
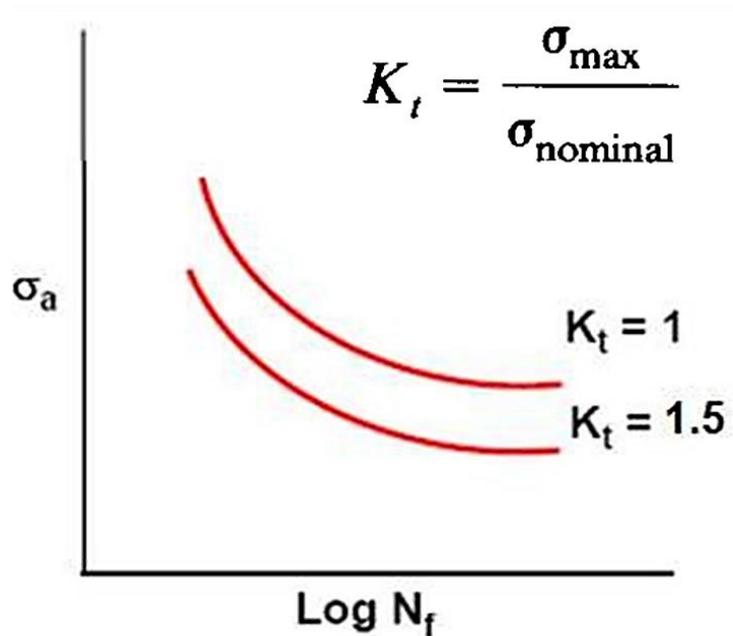
Fadiga

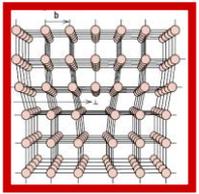
- Fatores que influenciam a Vida em Fadiga

- Tensão Média

$\uparrow \sigma_m \rightarrow \downarrow N_f$

- Concentração de tensão





Fadiga

- Fatores que influenciam a Vida em Fadiga

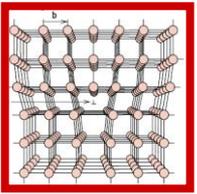
- Tamanho ↑ Tamanho ↓ Resistência a fadiga

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

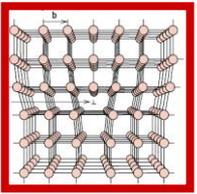
- **Fatores que influenciam a Vida em Fadiga**

- **Efeitos do Ambiente**

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

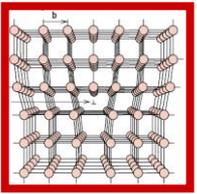
choque térmico \neq fadiga térmica.

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.



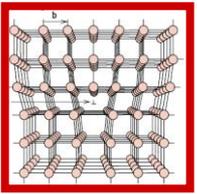
Fluência

- 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

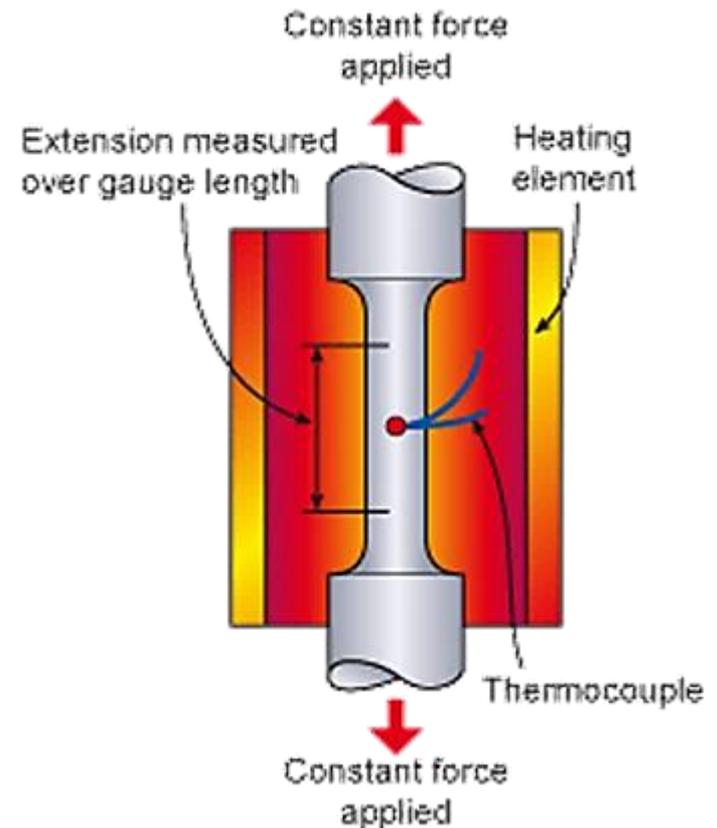
- **Fluência:** ocorre quando o material é sujeito a uma carga constante a temperaturas elevadas → def. dependente do tempo.
 - Acontece geralmente para temperaturas acima de $0.5 T_m$.
 - Temperatura homóloga: razão entre a temperatura atual e a temperatura de fusão (T_m).
- **Dois tipos de teste: teste 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.

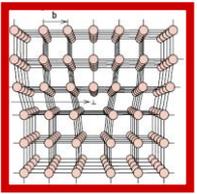


Fluência

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*).

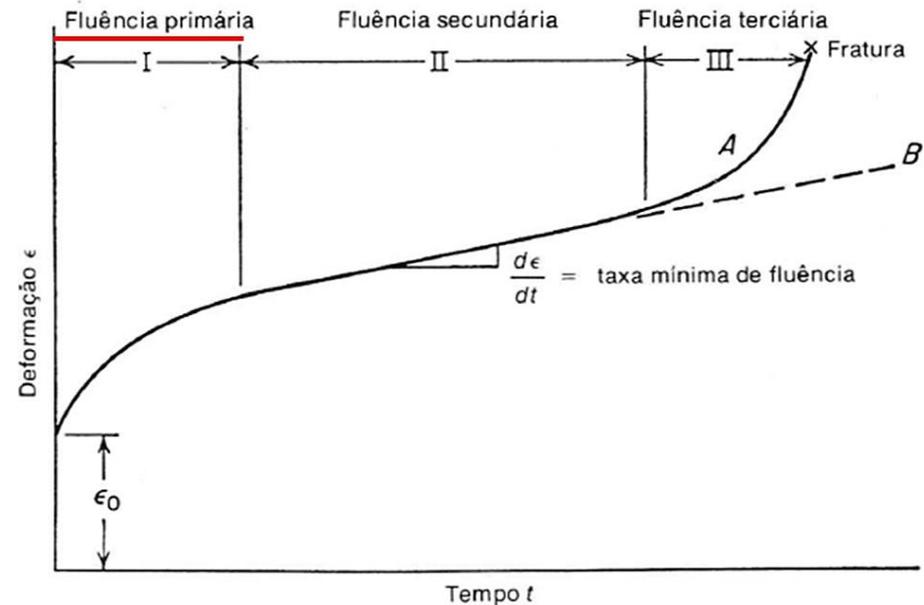




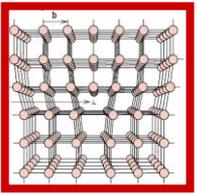
Fluência

• 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.



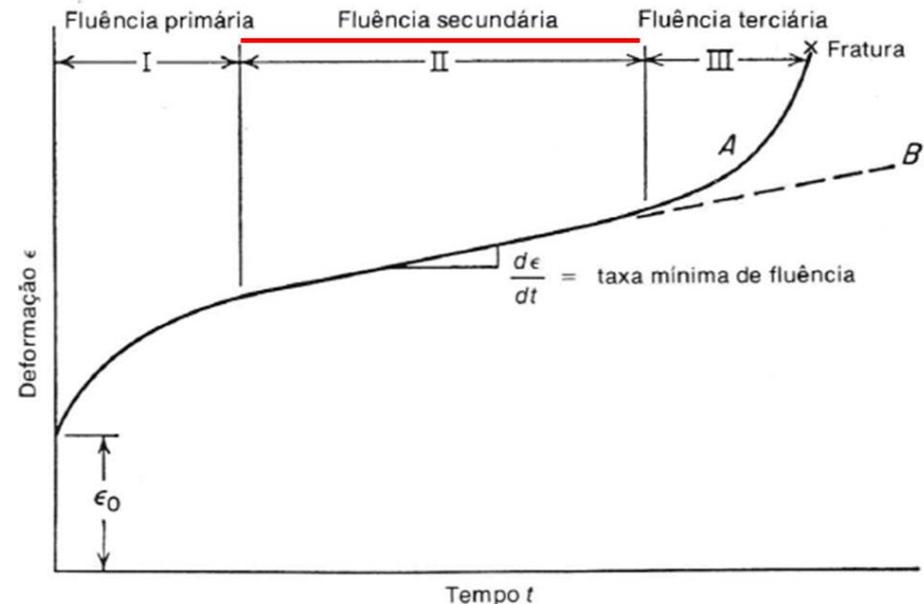
Curva típica de fluência



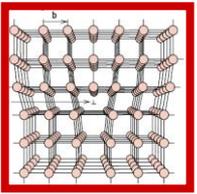
Fluência

• Fluência Secundária (estado estacionário)

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



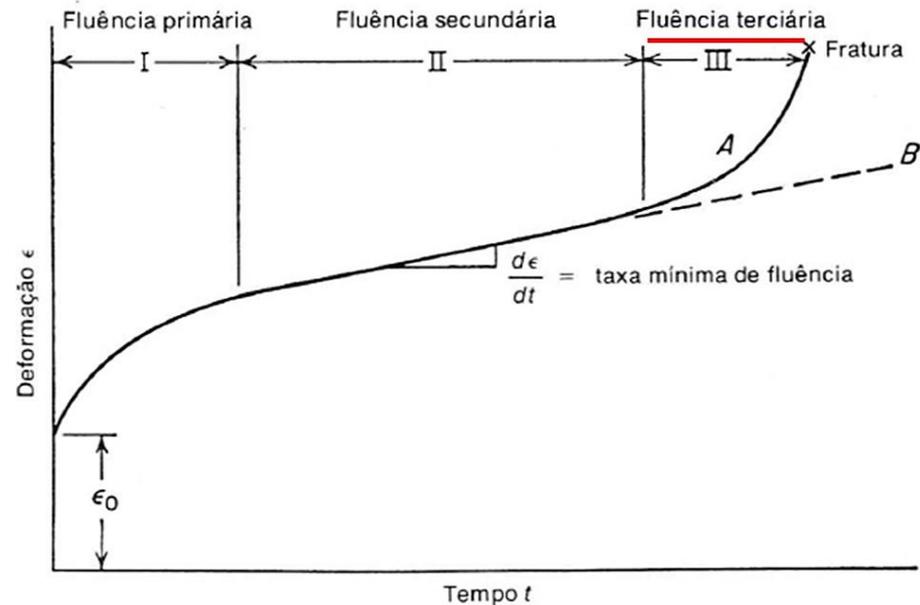
Curva típica de fluência



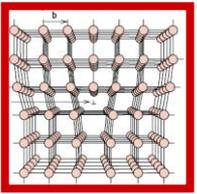
Fluência

• 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.



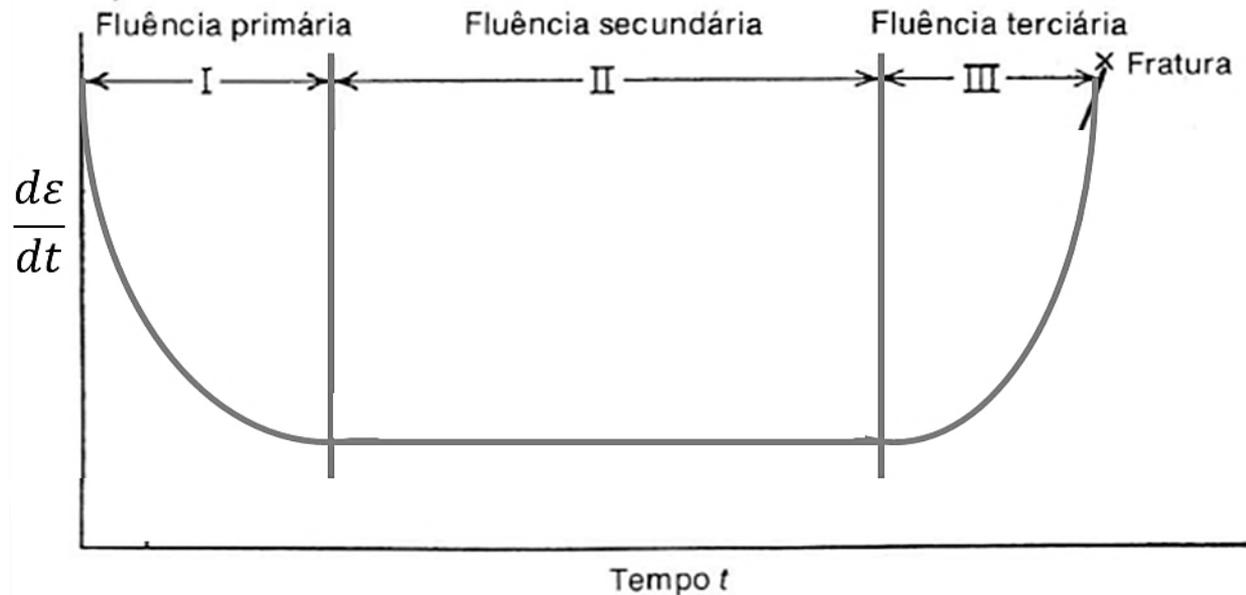
Curva típica de fluência



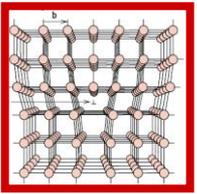
Fluência

- Taxa de Fluência

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



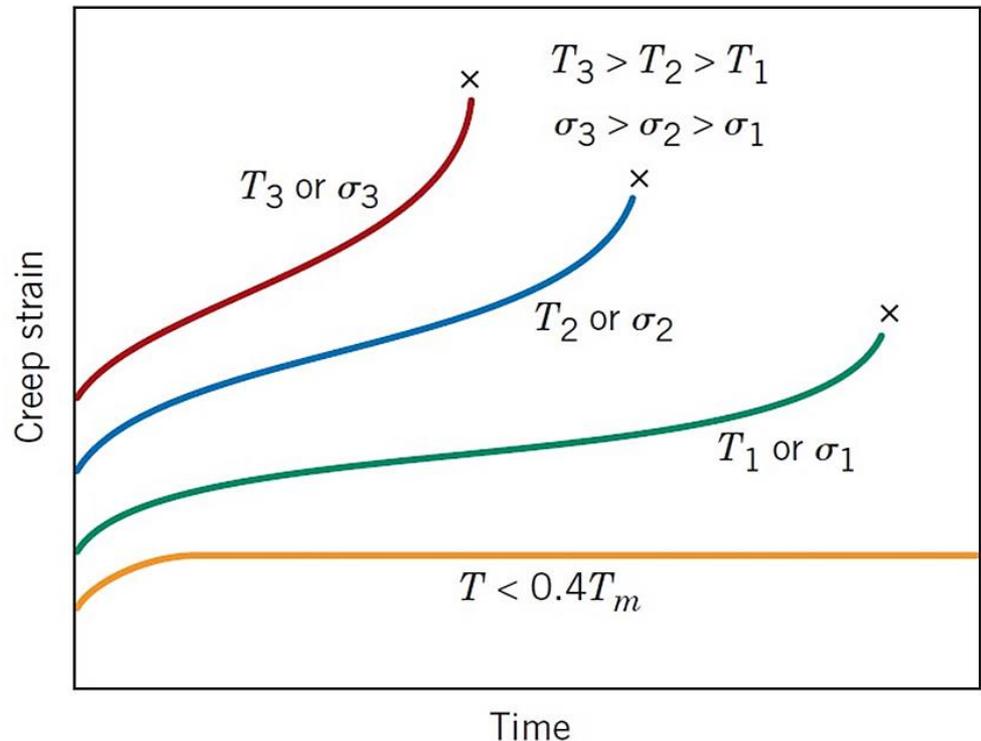
Comportamento da taxa de fluência



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

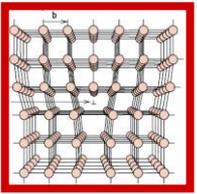
Escola Politécnica

DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Mecanismos de Aumento da Resistência

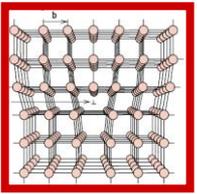
“restringir ou impedir o movimento de discordâncias confere maior dureza e mais resistência ao material”.

Key		Material	
■	Group 1-10	■	Metals
■	Group 11-18	■	Nonmetals
■	Group 1-10	■	Metals
■	Group 11-18	■	Nonmetals
1	H	1	H
2	He	2	He
3	Li	3	Li
4	Be	4	Be
5	B	5	B
6	C	6	C
7	N	7	N
8	O	8	O
9	F	9	F
10	Ne	10	Ne
11	Na	11	Na
12	Mg	12	Mg
13	Al	13	Al
14	Si	14	Si
15	P	15	P
16	S	16	S
17	Cl	17	Cl
18	Ar	18	Ar
19	K	19	K
20	Ca	20	Ca
21	Sc	21	Sc
22	Ti	22	Ti
23	V	23	V
24	Cr	24	Cr
25	Mn	25	Mn
26	Fe	26	Fe
27	Co	27	Co
28	Ni	28	Ni
29	Cu	29	Cu
30	Zn	30	Zn
31	Ga	31	Ga
32	Ge	32	Ge
33	As	33	As
34	Se	34	Se
35	Br	35	Br
36	Kr	36	Kr
37	Rb	37	Rb
38	Sr	38	Sr
39	Y	39	Y
40	Zr	40	Zr
41	Nb	41	Nb
42	Mo	42	Mo
43	Tc	43	Tc
44	Ru	44	Ru
45	Rh	45	Rh
46	Pd	46	Pd
47	Ag	47	Ag
48	Cd	48	Cd
49	In	49	In
50	Sn	50	Sn
51	Pb	51	Pb
52	Bi	52	Bi
53	Po	53	Po
54	At	54	At
55	Tl	55	Tl
56	Pb	56	Pb
57	Bi	57	Bi
58	Po	58	Po
59	At	59	At
60	Tl	60	Tl
61	Pb	61	Pb
62	Bi	62	Bi
63	Po	63	Po
64	At	64	At
65	Tl	65	Tl
66	Pb	66	Pb
67	Bi	67	Bi
68	Po	68	Po
69	At	69	At
70	Tl	70	Tl
71	Pb	71	Pb
72	Bi	72	Bi
73	Po	73	Po
74	At	74	At
75	Tl	75	Tl
76	Pb	76	Pb
77	Bi	77	Bi
78	Po	78	Po
79	At	79	At
80	Tl	80	Tl
81	Pb	81	Pb
82	Bi	82	Bi
83	Po	83	Po
84	At	84	At
85	Tl	85	Tl
86	Pb	86	Pb
87	Bi	87	Bi
88	Po	88	Po
89	At	89	At
90	Tl	90	Tl
91	Pb	91	Pb
92	Bi	92	Bi
93	Po	93	Po
94	At	94	At
95	Tl	95	Tl
96	Pb	96	Pb
97	Bi	97	Bi
98	Po	98	Po
99	At	99	At
100	Tl	100	Tl
101	Pb	101	Pb
102	Bi	102	Bi
103	Po	103	Po
104	At	104	At
105	Tl	105	Tl
106	Pb	106	Pb
107	Bi	107	Bi
108	Po	108	Po
109	At	109	At
110	Tl	110	Tl
111	Pb	111	Pb
112	Bi	112	Bi
113	Po	113	Po
114	At	114	At
115	Tl	115	Tl
116	Pb	116	Pb
117	Bi	117	Bi
118	Po	118	Po
119	At	119	At
120	Tl	120	Tl
121	Pb	121	Pb
122	Bi	122	Bi
123	Po	123	Po
124	At	124	At
125	Tl	125	Tl
126	Pb	126	Pb
127	Bi	127	Bi
128	Po	128	Po
129	At	129	At
130	Tl	130	Tl
131	Pb	131	Pb
132	Bi	132	Bi
133	Po	133	Po
134	At	134	At
135	Tl	135	Tl
136	Pb	136	Pb
137	Bi	137	Bi
138	Po	138	Po
139	At	139	At
140	Tl	140	Tl
141	Pb	141	Pb
142	Bi	142	Bi
143	Po	143	Po
144	At	144	At
145	Tl	145	Tl
146	Pb	146	Pb
147	Bi	147	Bi
148	Po	148	Po
149	At	149	At
150	Tl	150	Tl
151	Pb	151	Pb
152	Bi	152	Bi
153	Po	153	Po
154	At	154	At
155	Tl	155	Tl
156	Pb	156	Pb
157	Bi	157	Bi
158	Po	158	Po
159	At	159	At
160	Tl	160	Tl
161	Pb	161	Pb
162	Bi	162	Bi
163	Po	163	Po
164	At	164	At
165	Tl	165	Tl
166	Pb	166	Pb
167	Bi	167	Bi
168	Po	168	Po
169	At	169	At
170	Tl	170	Tl
171	Pb	171	Pb
172	Bi	172	Bi
173	Po	173	Po
174	At	174	At
175	Tl	175	Tl
176	Pb	176	Pb
177	Bi	177	Bi
178	Po	178	Po
179	At	179	At
180	Tl	180	Tl
181	Pb	181	Pb
182	Bi	182	Bi
183	Po	183	Po
184	At	184	At
185	Tl	185	Tl
186	Pb	186	Pb
187	Bi	187	Bi
188	Po	188	Po
189	At	189	At
190	Tl	190	Tl
191	Pb	191	Pb
192	Bi	192	Bi
193	Po	193	Po
194	At	194	At
195	Tl	195	Tl
196	Pb	196	Pb
197	Bi	197	Bi
198	Po	198	Po
199	At	199	At
200	Tl	200	Tl
201	Pb	201	Pb
202	Bi	202	Bi
203	Po	203	Po
204	At	204	At
205	Tl	205	Tl
206	Pb	206	Pb
207	Bi	207	Bi
208	Po	208	Po
209	At	209	At
210	Tl	210	Tl
211	Pb	211	Pb
212	Bi	212	Bi
213	Po	213	Po
214	At	214	At
215	Tl	215	Tl
216	Pb	216	Pb
217	Bi	217	Bi
218	Po	218	Po
219	At	219	At
220	Tl	220	Tl
221	Pb	221	Pb
222	Bi	222	Bi
223	Po	223	Po
224	At	224	At
225	Tl	225	Tl
226	Pb	226	Pb
227	Bi	227	Bi
228	Po	228	Po
229	At	229	At
230	Tl	230	Tl
231	Pb	231	Pb
232	Bi	232	Bi
233	Po	233	Po
234	At	234	At
235	Tl	235	Tl
236	Pb	236	Pb
237	Bi	237	Bi
238	Po	238	Po
239	At	239	At
240	Tl	240	Tl
241	Pb	241	Pb
242	Bi	242	Bi
243	Po	243	Po
244	At	244	At
245	Tl	245	Tl
246	Pb	246	Pb
247	Bi	247	Bi
248	Po	248	Po
249	At	249	At
250	Tl	250	Tl
251	Pb	251	Pb
252	Bi	252	Bi
253	Po	253	Po
254	At	254	At
255	Tl	255	Tl
256	Pb	256	Pb
257	Bi	257	Bi
258	Po	258	Po
259	At	259	At
260	Tl	260	Tl
261	Pb	261	Pb
262	Bi	262	Bi
263	Po	263	Po
264	At	264	At
265	Tl	265	Tl
266	Pb	266	Pb
267	Bi	267	Bi
268	Po	268	Po
269	At	269	At
270	Tl	270	Tl
271	Pb	271	Pb
272	Bi	272	Bi
273	Po	273	Po
274	At	274	At
275	Tl	275	Tl
276	Pb	276	Pb
277	Bi	277	Bi
278	Po	278	Po
279	At	279	At
280	Tl	280	Tl
281	Pb	281	Pb
282	Bi	282	Bi
283	Po	283	Po
284	At	284	At
285	Tl	285	Tl
286	Pb	286	Pb
287	Bi	287	Bi
288	Po	288	Po
289	At	289	At
290	Tl	290	Tl
291	Pb	291	Pb
292	Bi	292	Bi
293	Po	293	Po
294	At	294	At
295	Tl	295	Tl
296	Pb	296	Pb
297	Bi	297	Bi
298	Po	298	Po
299	At	299	At
300	Tl	300	Tl
301	Pb	301	Pb
302	Bi	302	Bi
303	Po	303	Po
304	At	304	At
305	Tl	305	Tl
306	Pb	306	Pb
307	Bi	307	Bi
308	Po	308	Po
309	At	309	At
310	Tl	310	Tl
311	Pb	311	Pb
312	Bi	312	Bi
313	Po	313	Po
314	At	314	At
315	Tl	315	Tl
316	Pb	316	Pb
317	Bi	317	Bi
318	Po	318	Po
319	At	319	At
320	Tl	320	Tl
321	Pb	321	Pb
322	Bi	322	Bi
323	Po	323	Po
324	At	324	At
325	Tl	325	Tl
326	Pb	326	Pb
327	Bi	327	Bi
328	Po	328	Po
329	At	329	At
330	Tl	330	Tl
331	Pb	331	Pb
332	Bi	332	Bi
333	Po	333	Po
334	At	334	At
335	Tl	335	Tl
336	Pb	336	Pb
337	Bi	337	Bi
338	Po	338	Po
339	At	339	At
340	Tl	340	Tl
341	Pb	341	Pb
342	Bi	342	Bi
343	Po	343	Po
344	At	344	At
345	Tl	345	Tl
346	Pb	346	Pb
347	Bi	347	Bi
348	Po	348	Po
349	At	349	At
350	Tl	350	Tl
351	Pb	351	Pb
352	Bi	352	Bi
353	Po	353	Po
354	At	354	At
355	Tl	355	Tl
356	Pb	356	Pb
357	Bi	357	Bi
358	Po	358	Po
359	At	359	At
360	Tl	360	Tl
361	Pb	361	Pb
362	Bi	362	Bi
363	Po	363	Po
364	At	364	At
365	Tl	365	Tl
366	Pb	366	Pb
367	Bi	367	Bi
368	Po	368	Po
369	At	369	At
370	Tl	370	Tl
371	Pb	371	Pb
372	Bi	372	Bi
373	Po	373	Po
374	At	374	At
375	Tl	375	Tl
376	Pb	376	Pb
377	Bi	377	Bi
378	Po	378	Po
379	At	379	At
38			



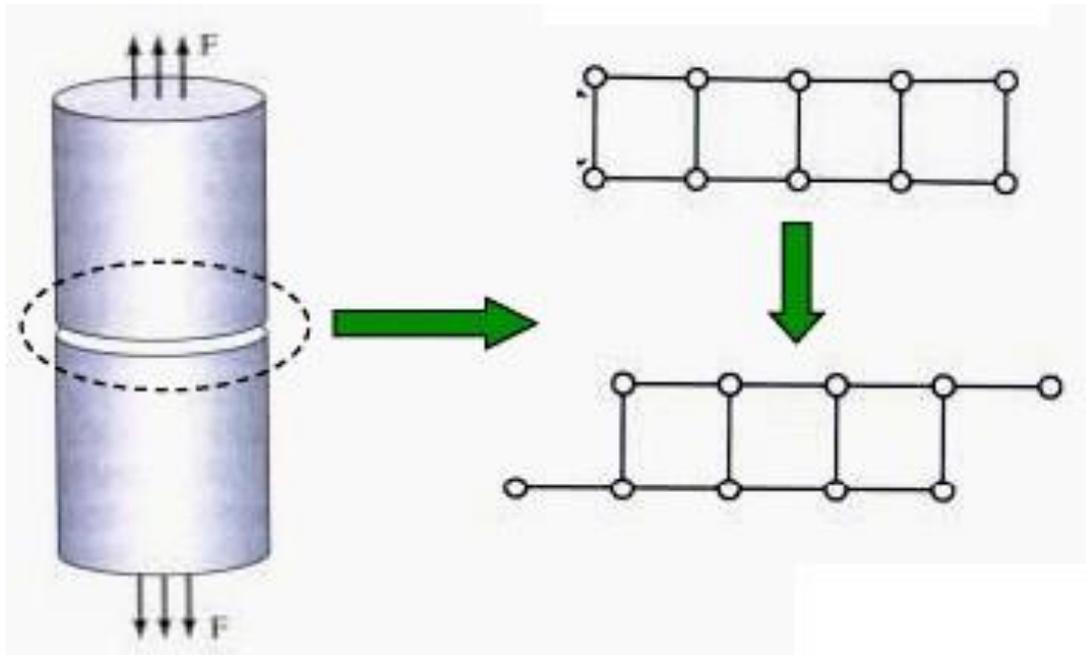
Introdução

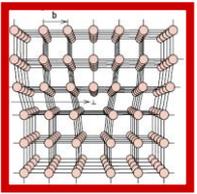
- Por que a resistência medida dos materiais é muito menor do que aquela predita pelos cálculos teóricos, baseados na força de ligação dos átomos de um cristal perfeito do material?
 - Ex: a resistência ao cisalhamento teórica do cobre é maior que 1000 MPa, mas o valor medido é uma ordem de grandeza 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

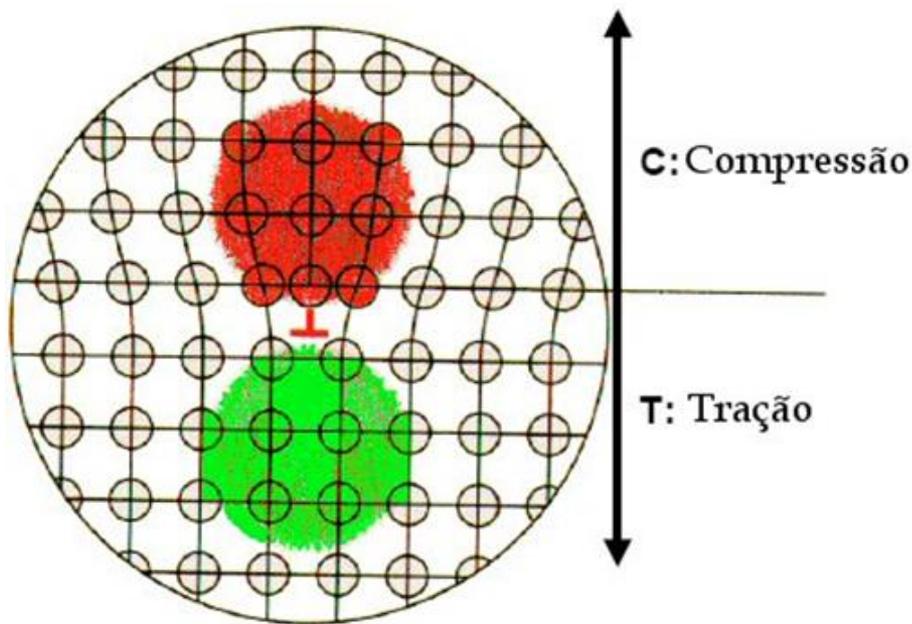
- **Resposta:** *Por conta da existência de discordâncias e defeitos na rede cristalina dos materiais!*



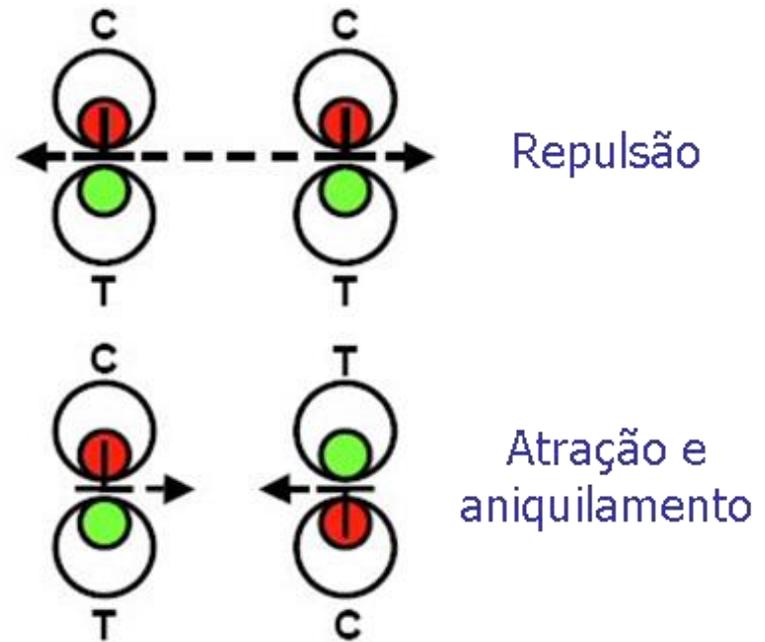


Deformação Plástica

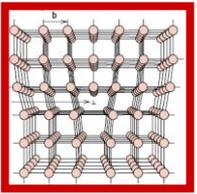
- Interação entre discordâncias: esforços envolvidos.



Regiões de tração e compressão ao redor da discordância

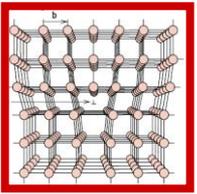


Interação entre discordâncias



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.

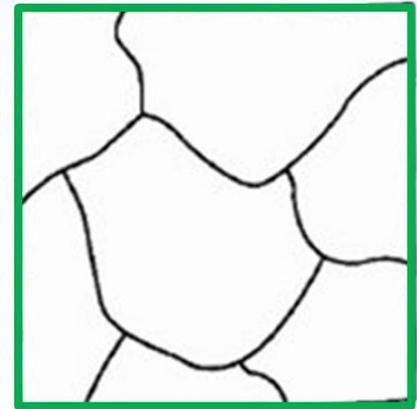
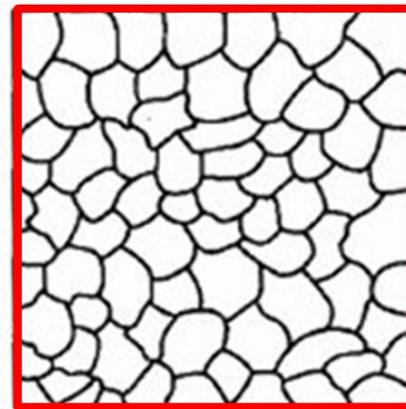
↓ Tamanho de grão

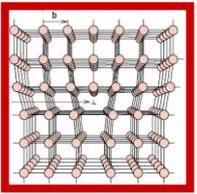


↑ Contorno de grão



↑ Restrição ao movimento





Redução do Tamanho do Grão

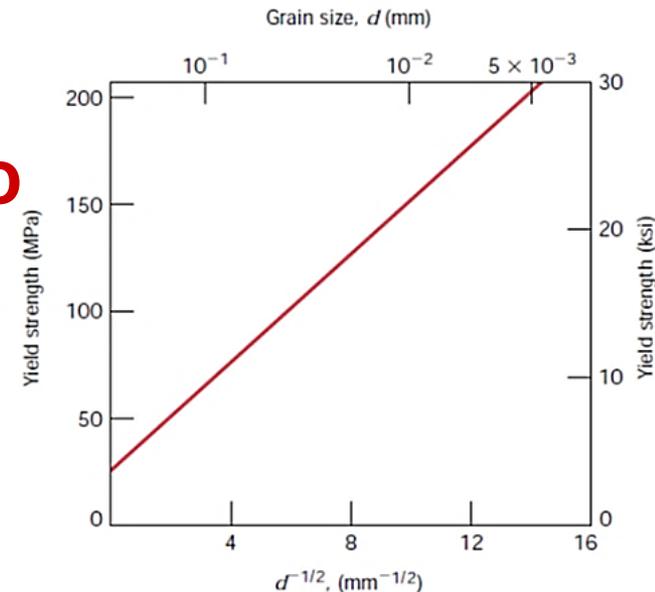
- O contorno de grão → barreira para a continuação do movimento das discordâncias.

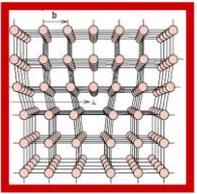
- Diferentes orientações presentes e também devido às inúmeras descontinuidades presentes no contorno de grão.

- Redução do tamanho do grão

- Equação de Hall-Petch

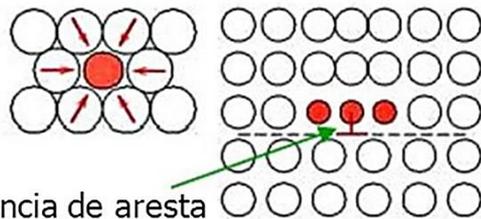
$$\sigma_y = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2}$$





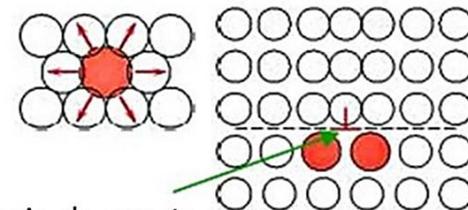
Solução Sólida

- 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.



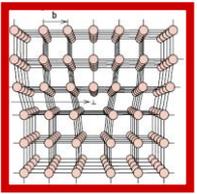
Discordância de aresta

Tensão causada por átomos substitucionais menores que os do metal hospedeiro



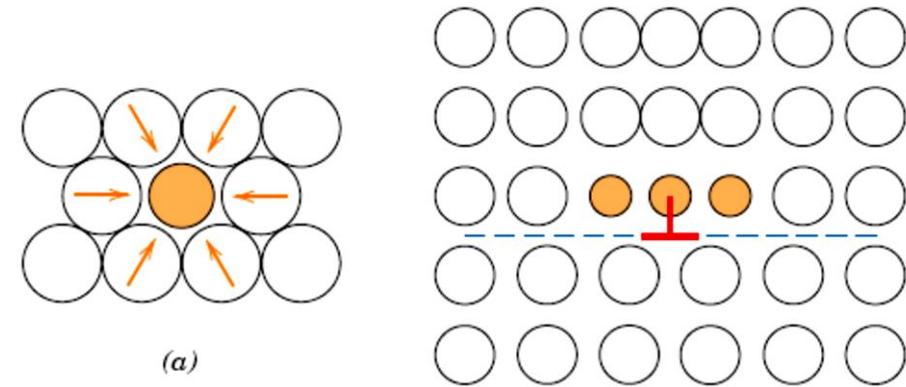
Discordância de aresta

Compressão causada por átomos substitucionais maiores que os do metal hospedeiro



Solução Sólida

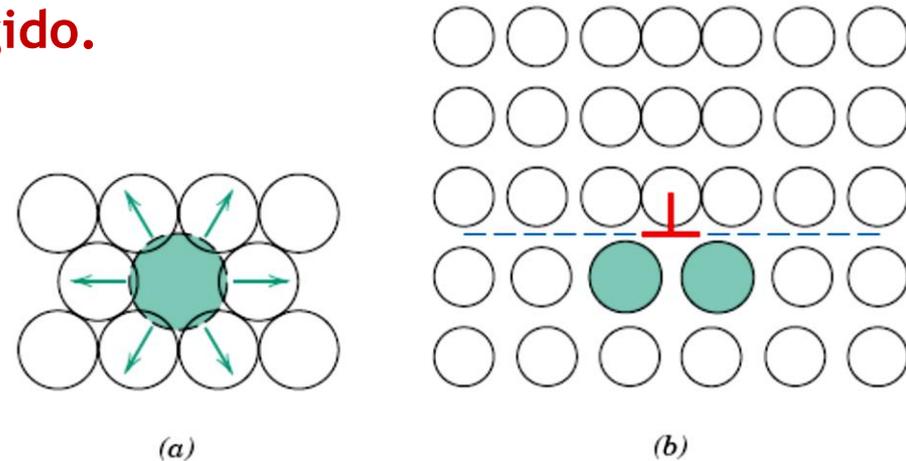
- Átomos de impureza (solução sólida) → deformações na rede cristalina;
- Interações dos campos de deformação da rede cristalina e discordâncias → movimento de discordâncias restringido.



(a)

(b)

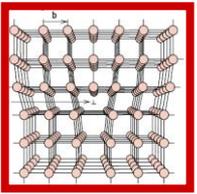
a) Deformações da rede por tração imposta sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de menor tamanho; b) Possíveis localizações de átomos de impureza menores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações da rede impureza-discordância.



(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.

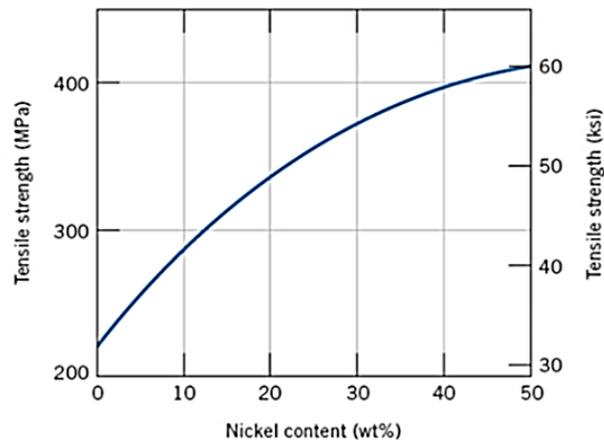


Solução Sólida

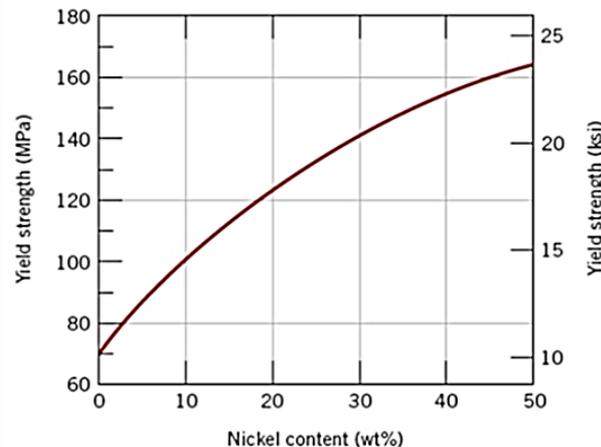
- **Formação de Ligas por Solução Sólida**

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

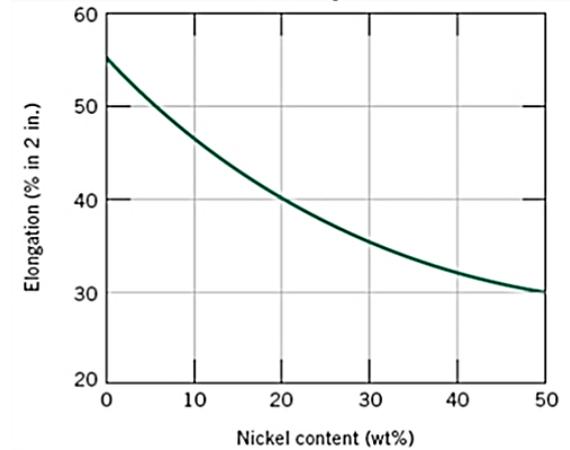
a)



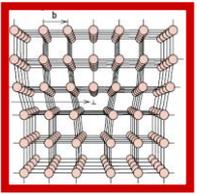
b)



c)

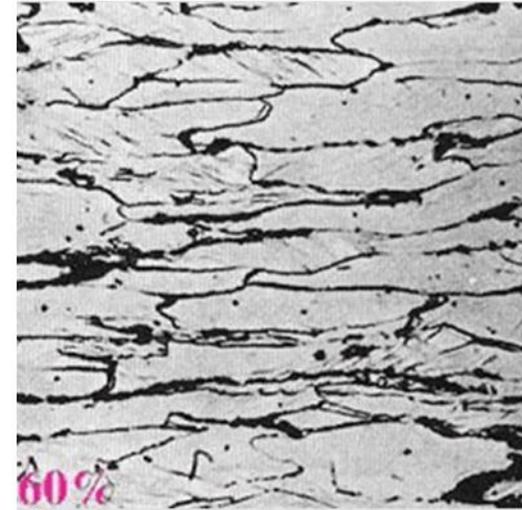
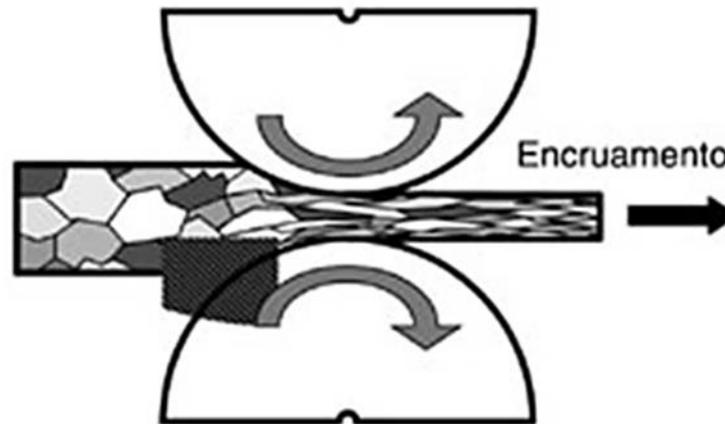
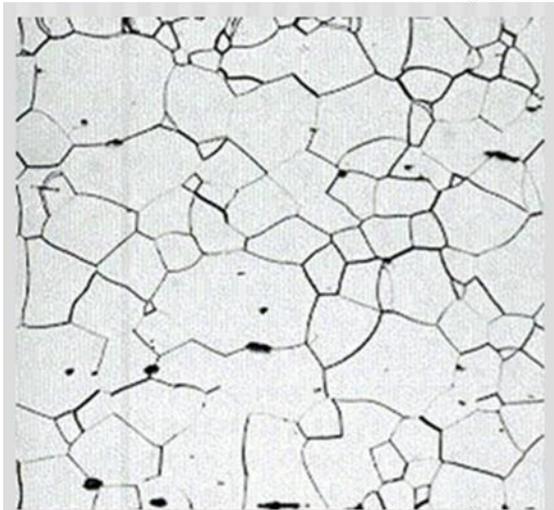


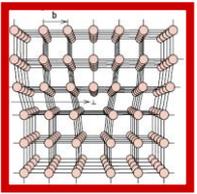
Variação do (a) limite de resistência a tração, (b) limite de escoamento, e (c) ductilidade (AL%) em função do teor de níquel para ligas de cobre-níquel mostrando aumento de resistência



Encruamento

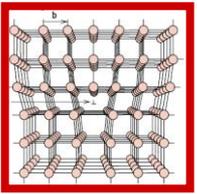
- Conhecido como *Trabalho a frio*.
- Ocorre abaixo da temperatura de recristalização (próximo à temperatura ambiente);





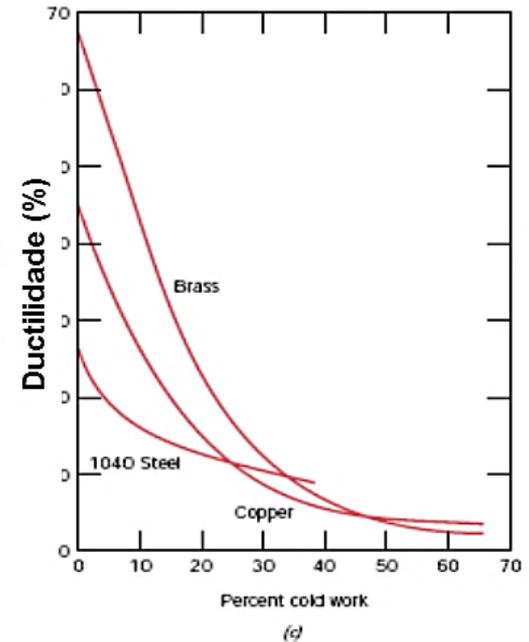
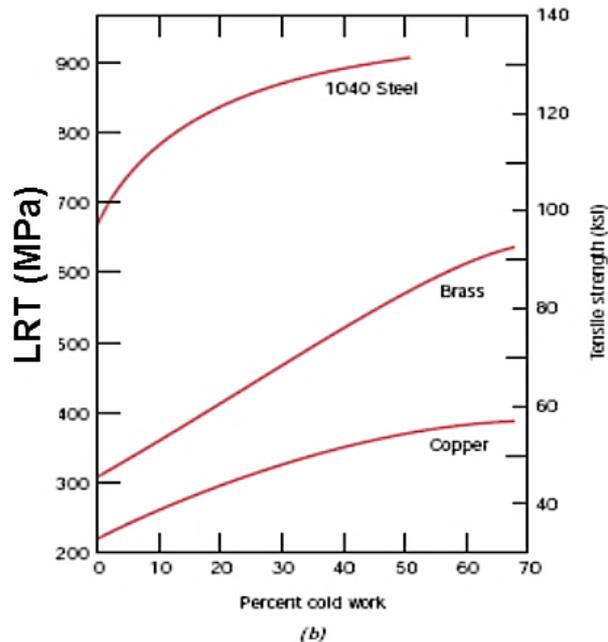
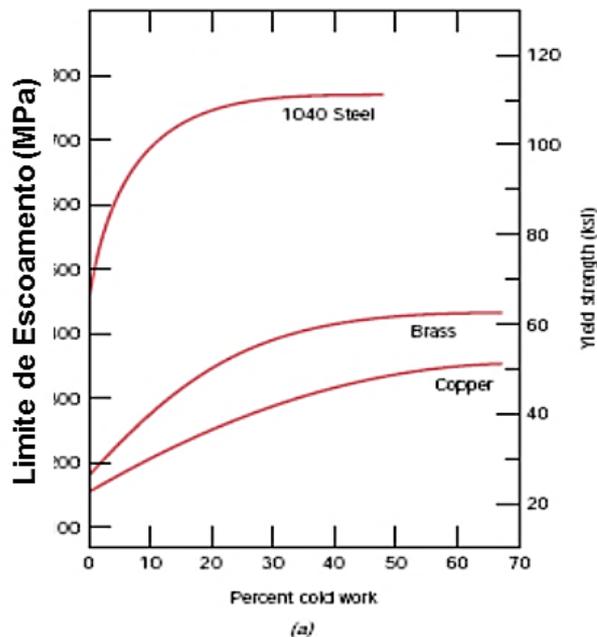
Encruamento

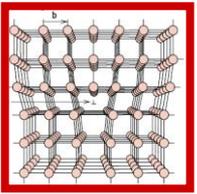
- Aumento da resistência por deformação plástica;
 - A densidade de discordâncias aumenta com a deformação, devido à multiplicação das existentes ou à formação de novas discordâncias;
 - O aumento de discordâncias impede o escorregamento dos planos atômicos.
- Quanto maior o encruamento, maior é a força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



Encruamento

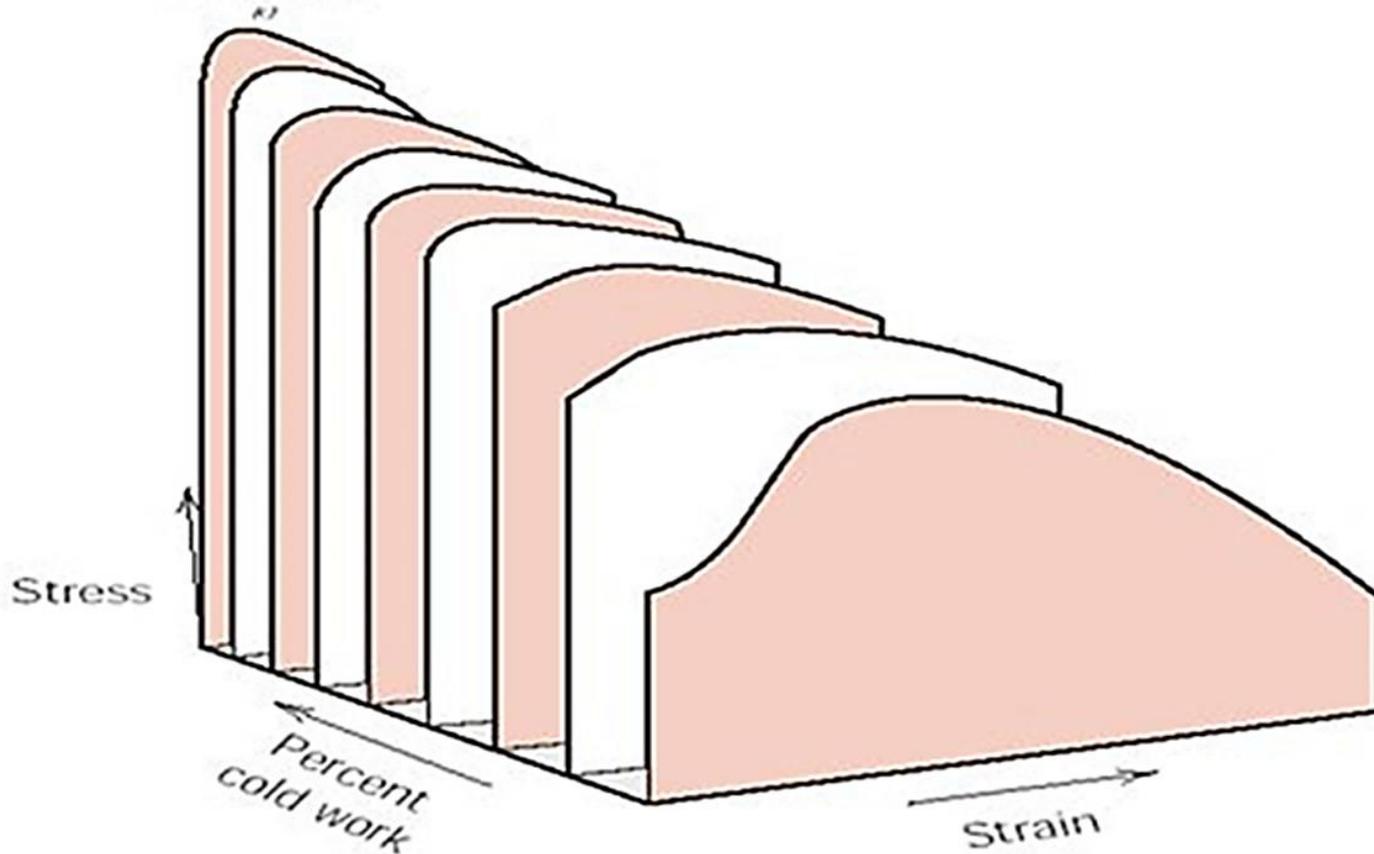
- Melhor controle dimensional;
- Produz melhor acabamento superficial;
- O encruamento pode ser removido por tratamento térmico (recristalização).

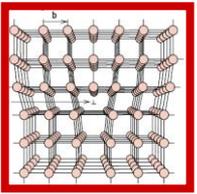




Encruamento

Percentual de Trabalho a Frio (%TF)
X
Propriedades

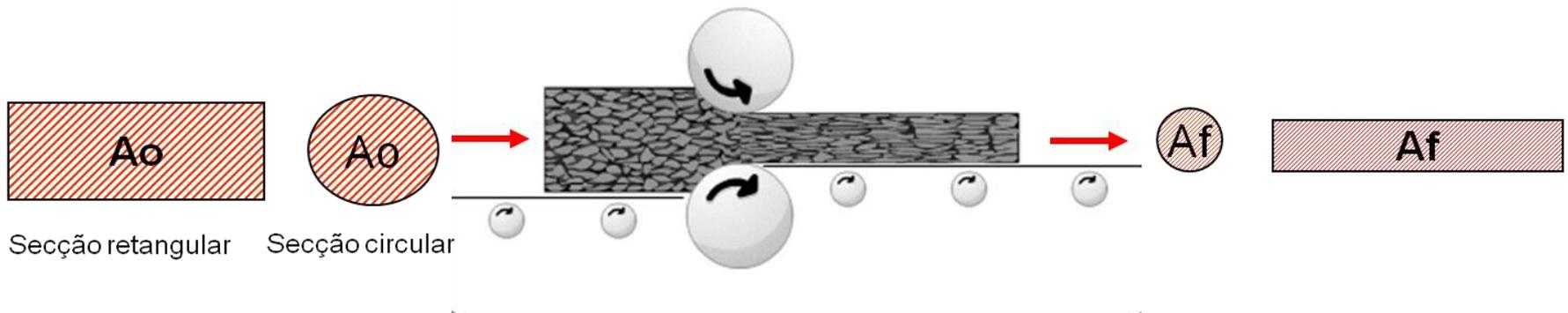


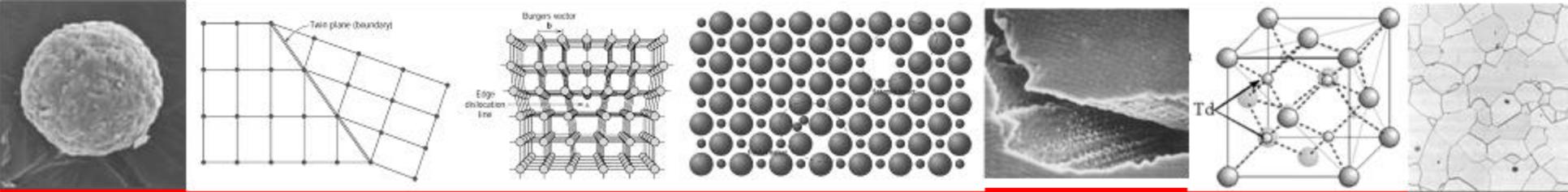


Encruamento

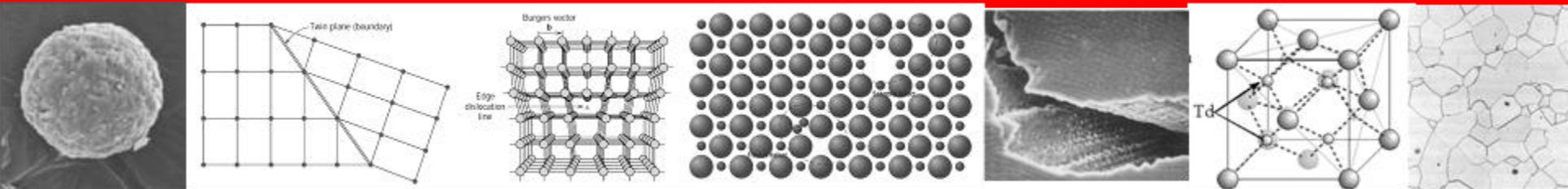
- Expressa-se o grau de deformação plástica com um percentual de trabalho a frio (%TF), definido como:

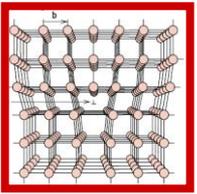
$$\%TF = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100$$





Diagramas de Equilíbrio de Fases



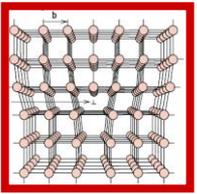


Introdução

- **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.

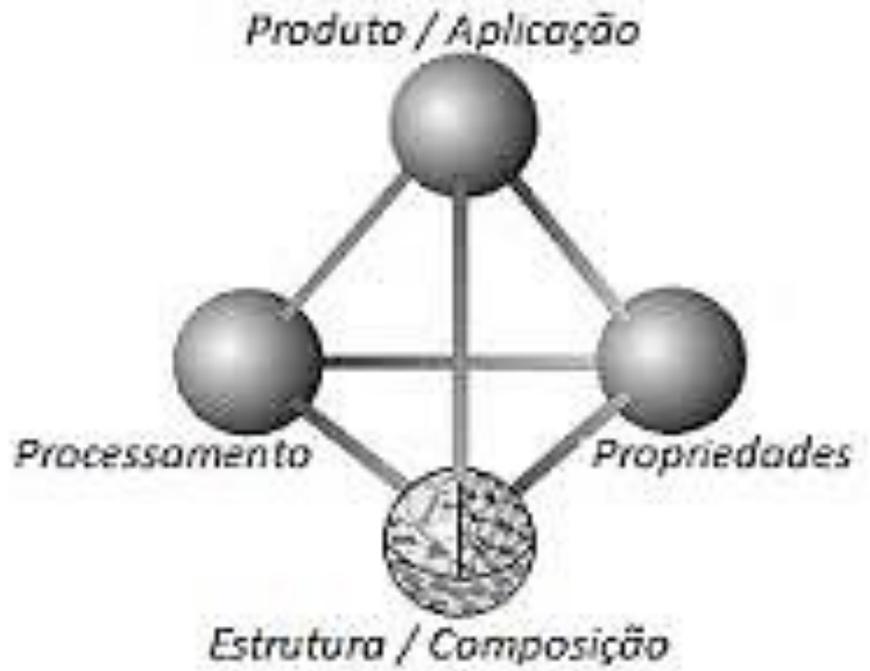


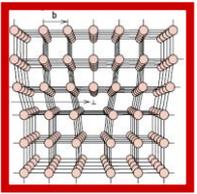
Introdução

- **Importância**

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

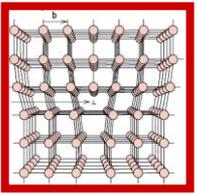
FASES PRESENTES
COMPOSIÇÃO DAS FASES
PROPORÇÃO DAS FASES





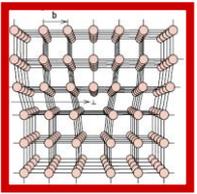
Introdução

- **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**

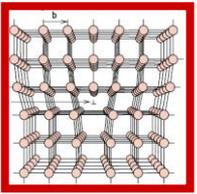
- **Em termos “macroscópicos”**

- 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).



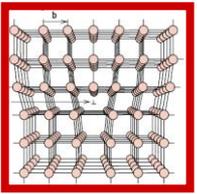
Termodinâmica

- 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.

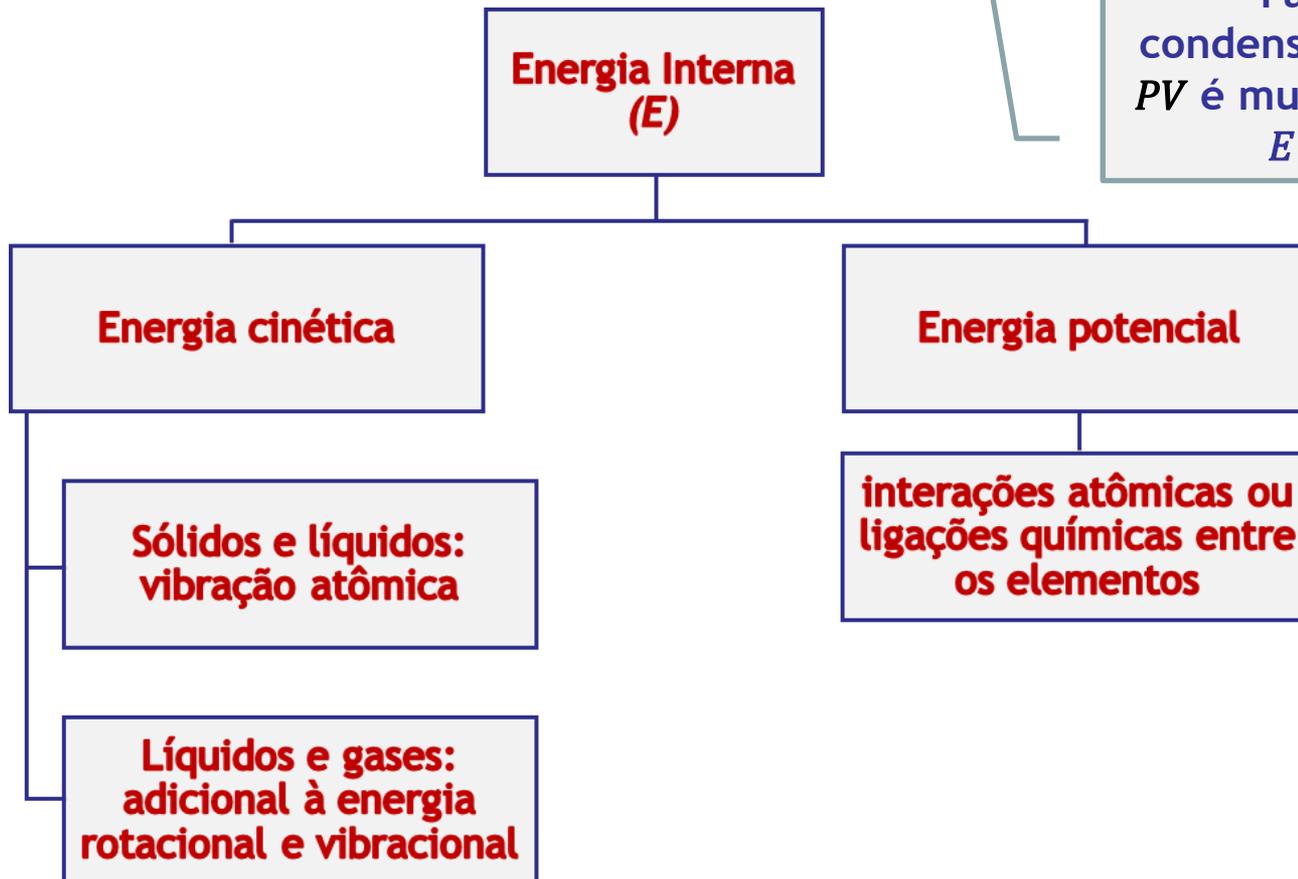


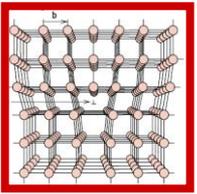
Termodinâmica

- 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 $E \therefore H \sim E$.

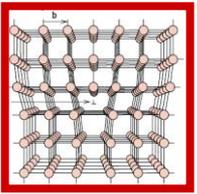




Termodinâmica

- 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:

$$dG = 0$$

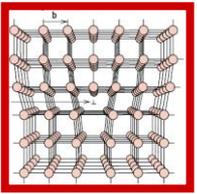


Termodinâmica

- 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:

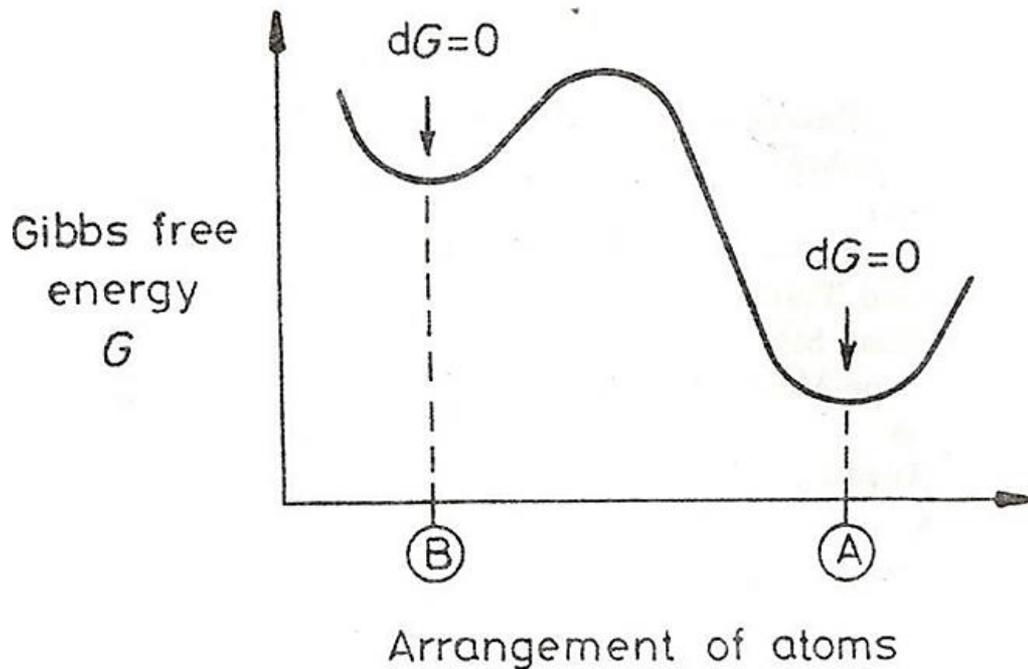
- em baixas temperaturas, as fases sólidas são as mais estáveis, pois apresentam ligações atômicas fortes e, então, as menores energias internas (entalpias).
- em altas temperaturas, as fases líquidas e gasosas são as mais estáveis, pois o termo predominante é o $-TS$ e, desta forma, são as fases com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



Termodinâmica

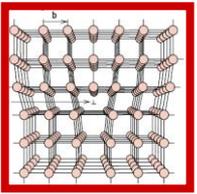
- **Equilíbrio metaestável**

- 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**.



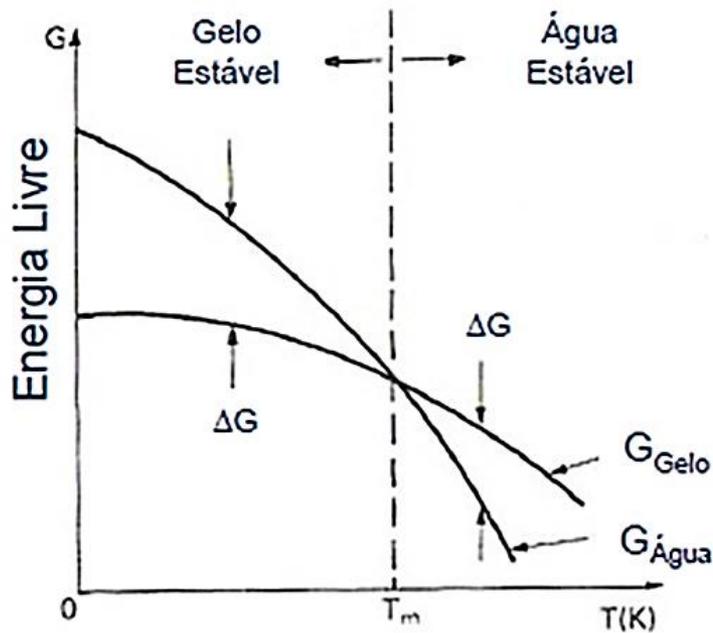
Quando um sistema em equilíbrio metaestável, passar por flutuações térmicas que possam fornecer energia ao sistema, ele rapidamente rearranja e passa ao estado de equilíbrio estável.

$$dG_A < dG_B$$

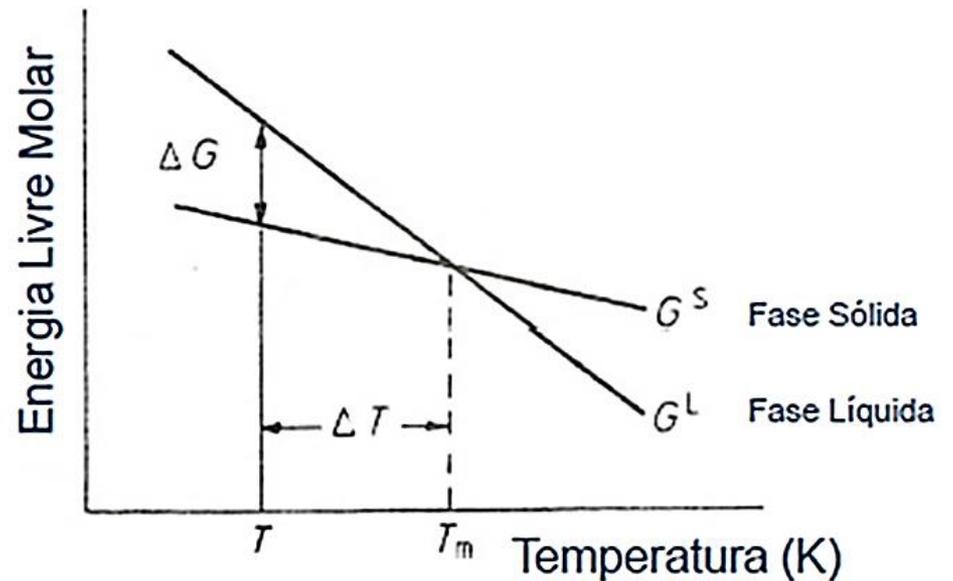


Termodinâmica

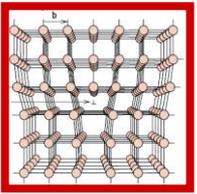
- Energia livre de Gibbs (G) equilíbrio metaestável
- As curvas mostram que a Energia Livre (G) das fases diminui com a temperatura, mostrando a importância do termo $-TS$.



Curvas de Energia Livre de Gibbs - Água

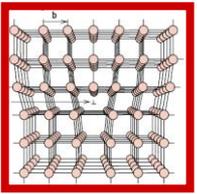


Curvas de Energia Livre de Gibbs - Metal Puro



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

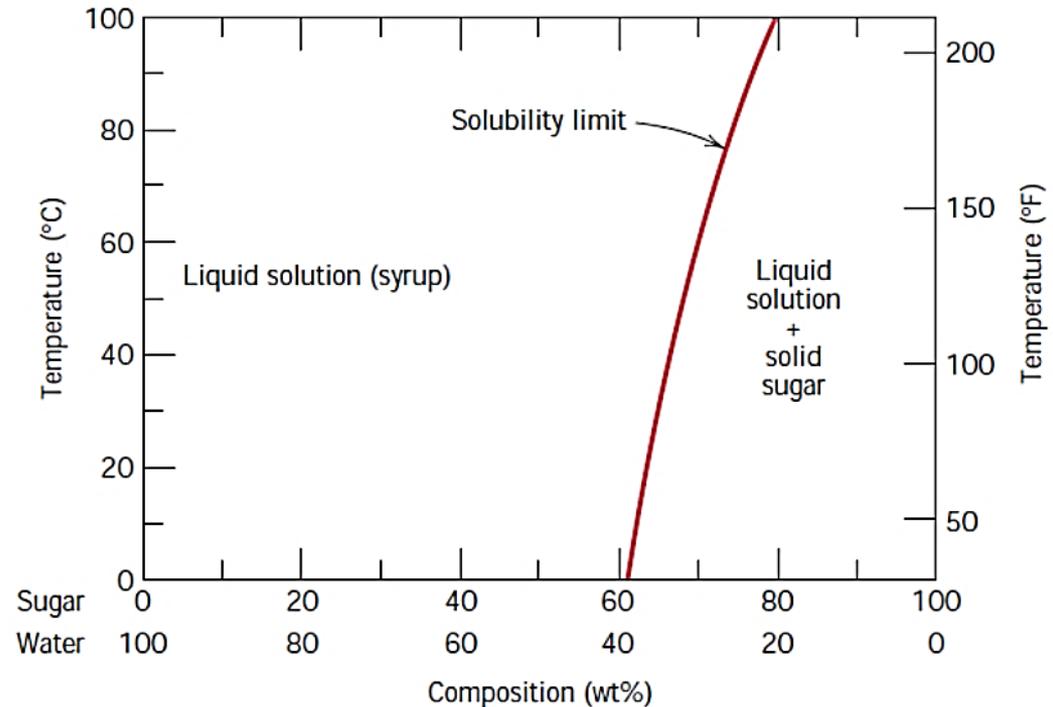
- Para muitos sistemas e para uma determinada temperatura, existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode ser dissolvida no solvente formando uma solução sólida. Essa concentração máxima é chamada limite de solubilidade.

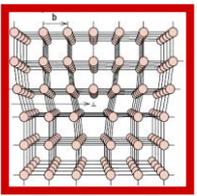
Solubilidade Completa

Solubilidade incompleta

Insolubilidade

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



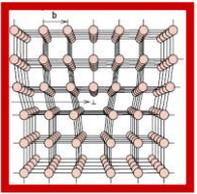


Regra das fases de Gibbs

- 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



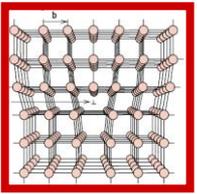
Diagramas Unários

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

Exemplos:

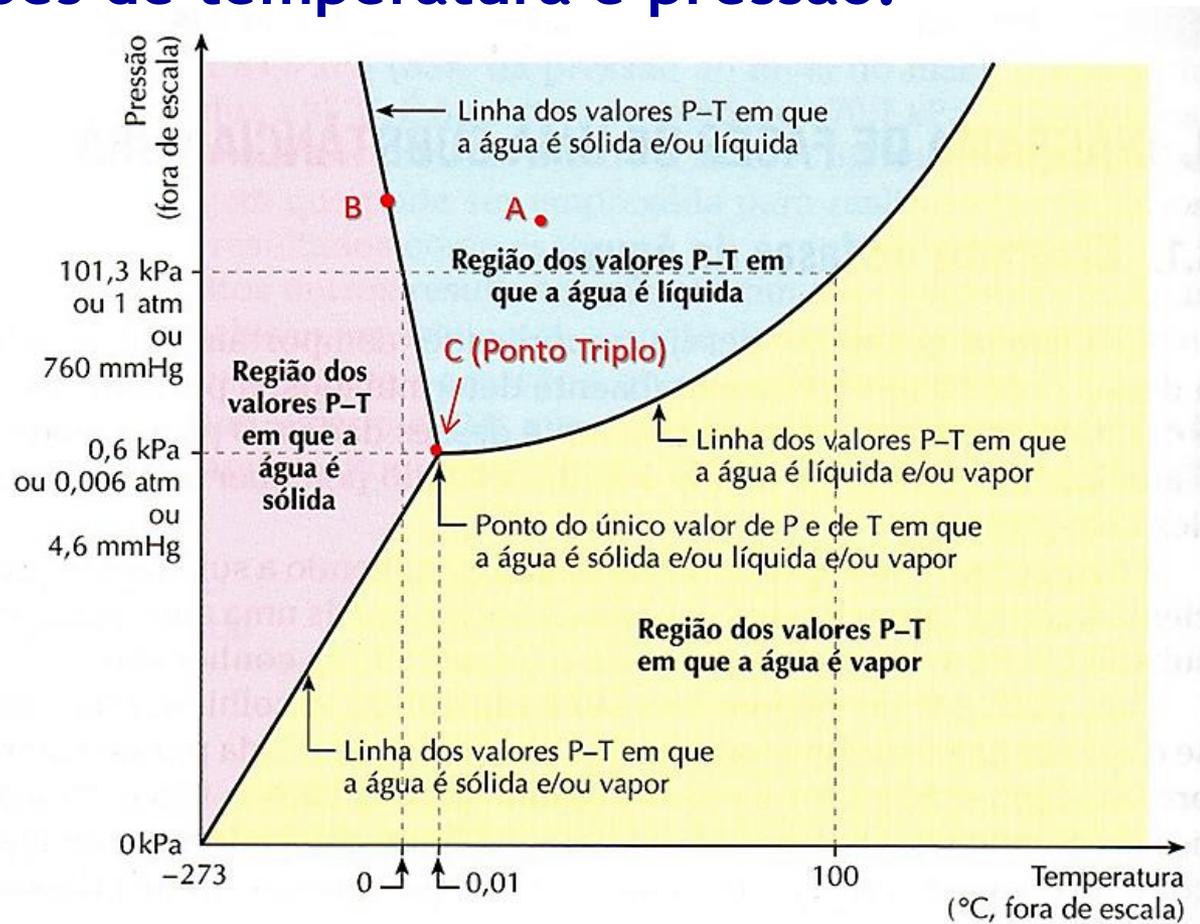
SiO_2 (quartzo de baixa temperatura, alta temperatura, tridimita e cristobalita)

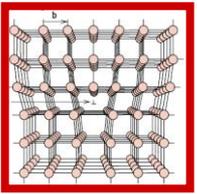
ZrO_2 (cúbica, tetragonal e monoclinica)



Sistema unário

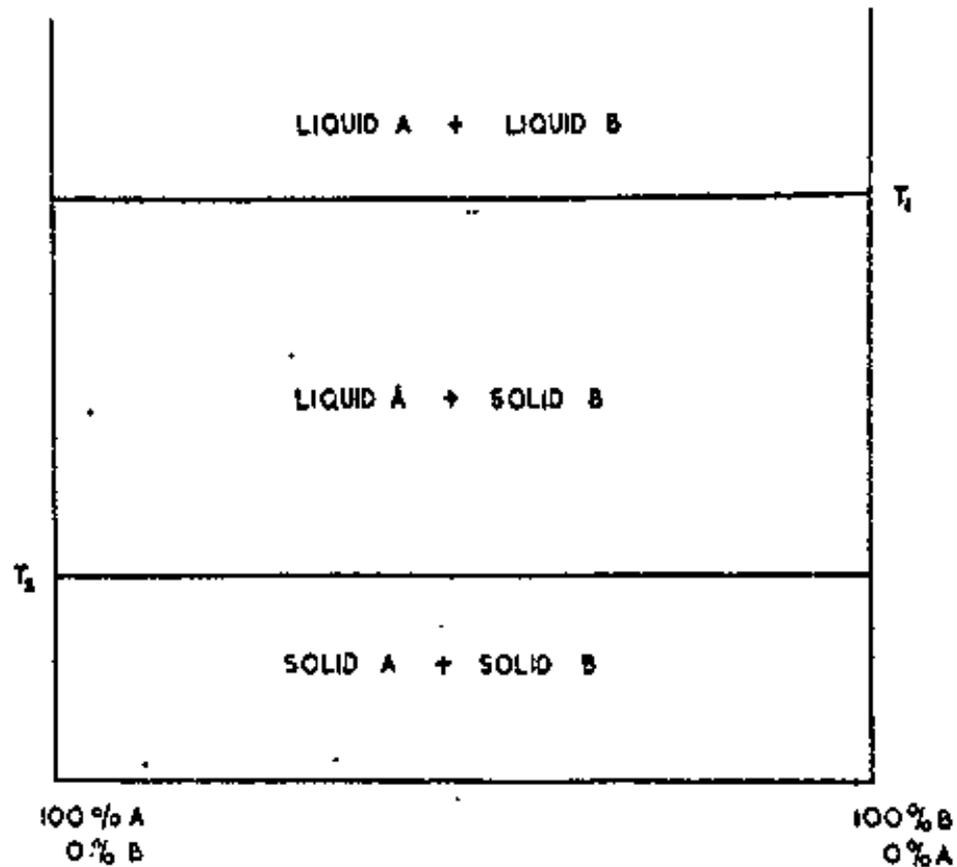
- Uma substância pura como a água pode existir nas fases sólida, líquida e gasosa, dependendo das condições de temperatura e pressão.

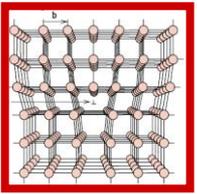




Diagramas Binários

1° Componentes imiscíveis nos estados líq. e sól.





Diagramas Binários

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

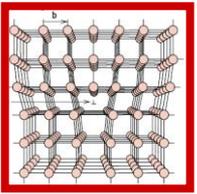
Van't Hoff (1903): 1 mol de uma substância adicionada a 100 g de uma substância pura, abaixa o ponto de fusão da substância pura de:

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

onde,

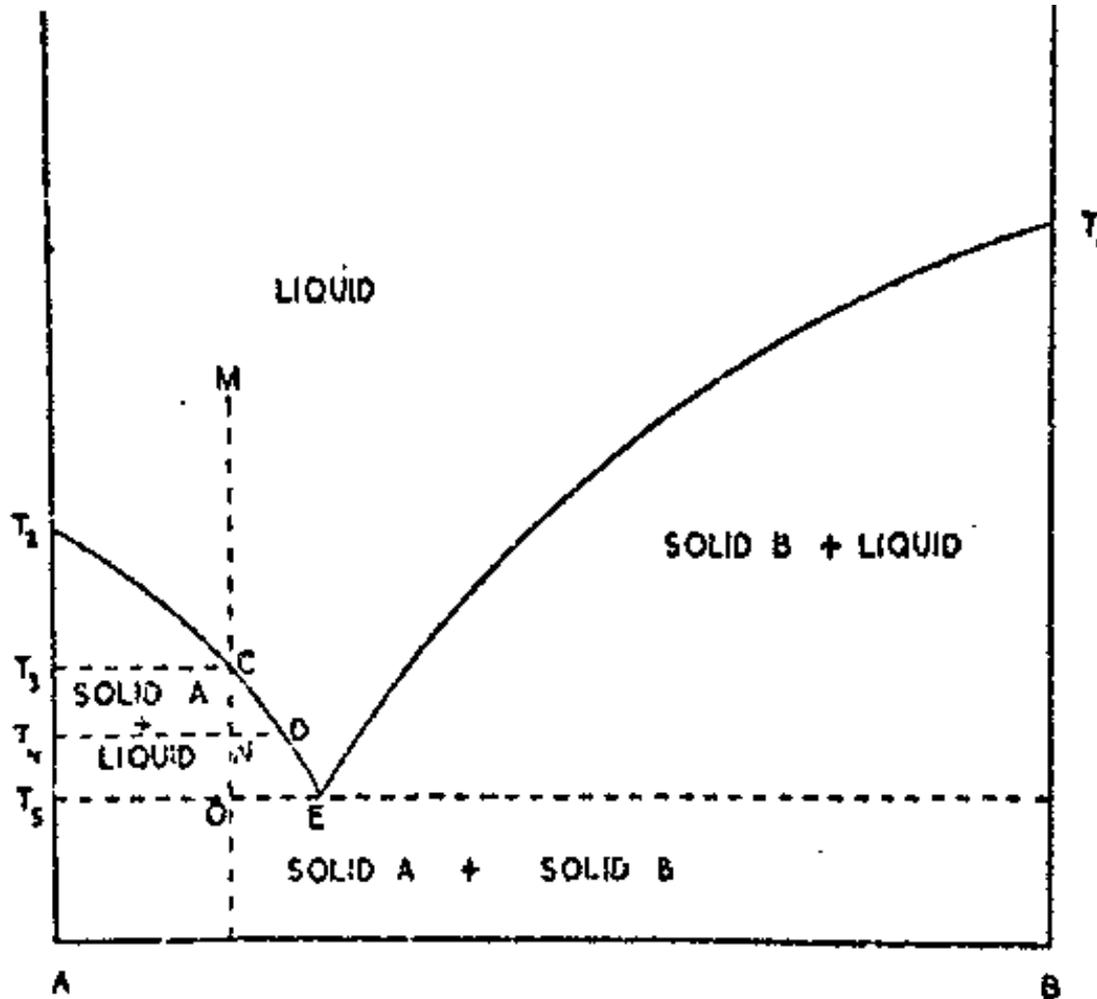
T_f = temperatura de fusão da substância pura

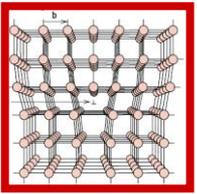
L = calor latente de fusão da substância aditiva



Diagramas Binários

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

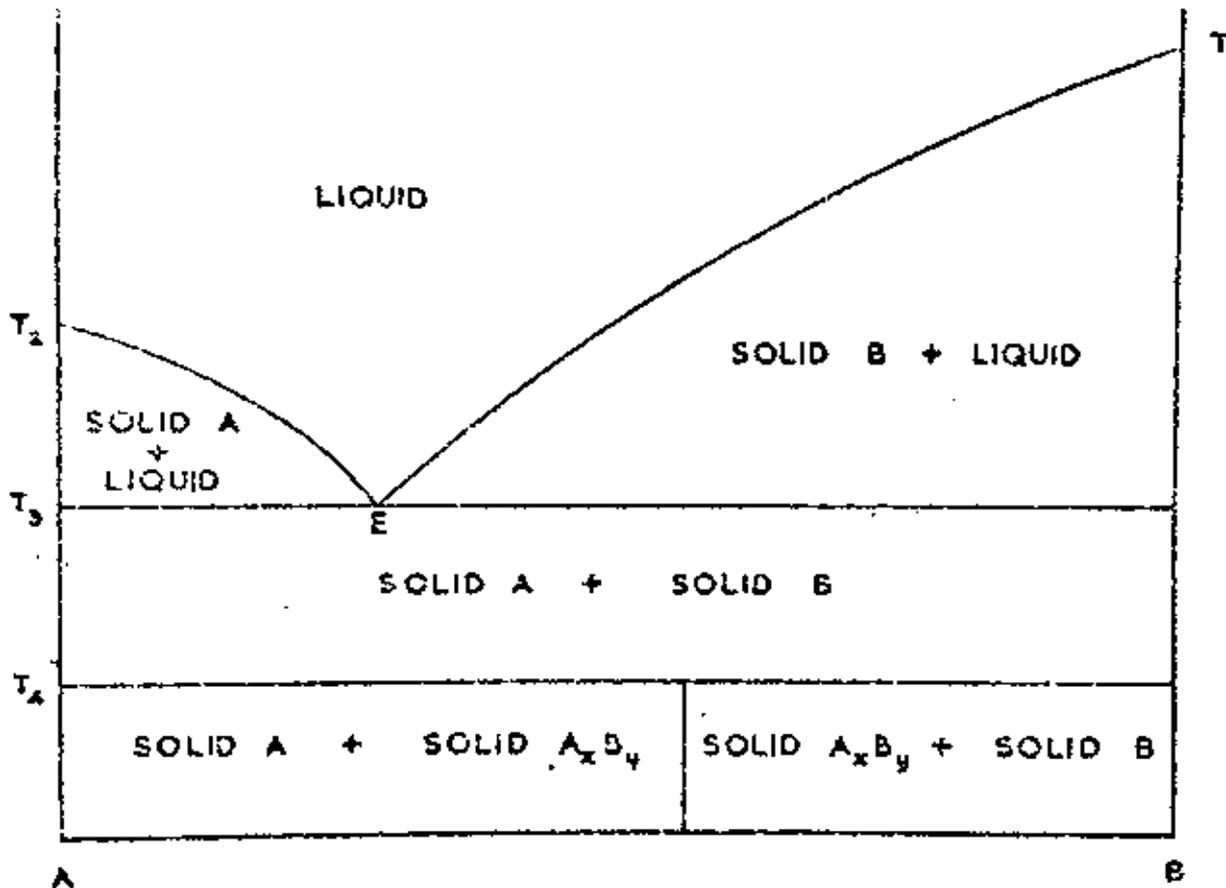


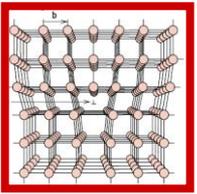


Diagramas Binários

3° Formação de composto:

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

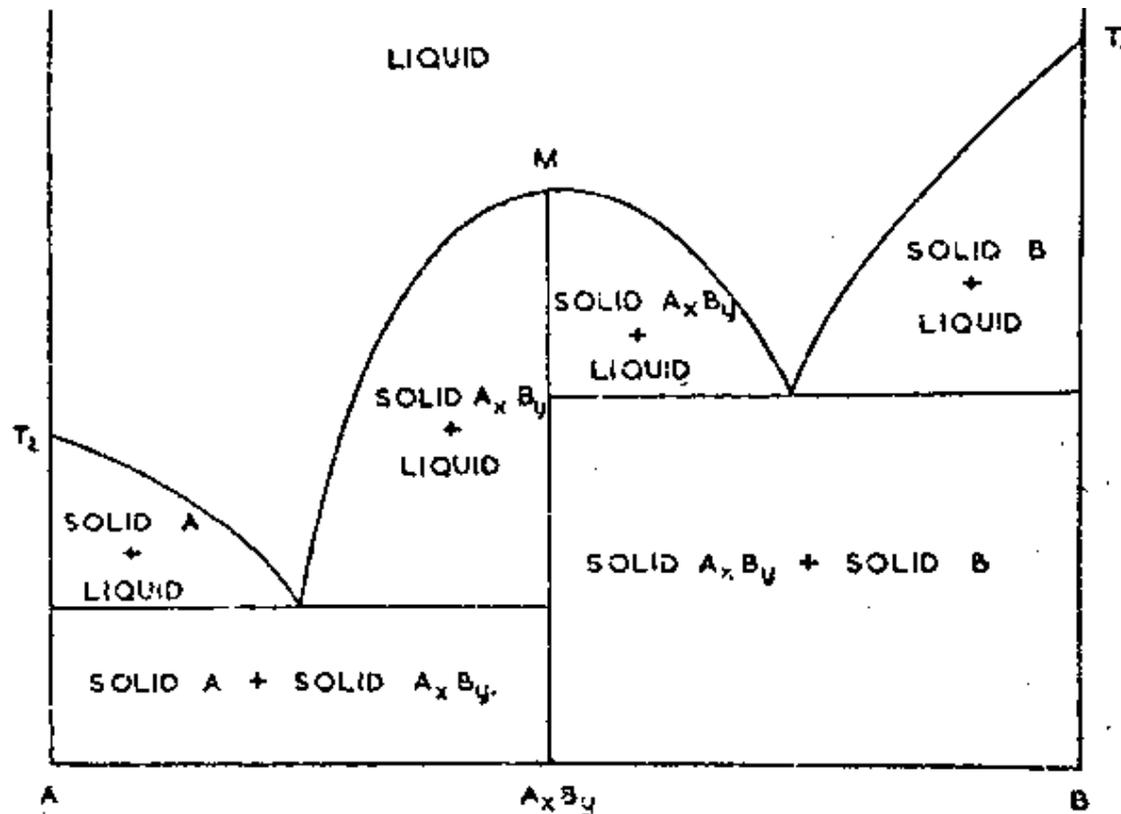


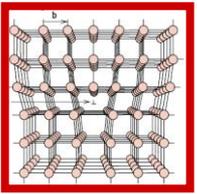


Diagramas Binários

3° Formação de composto:

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

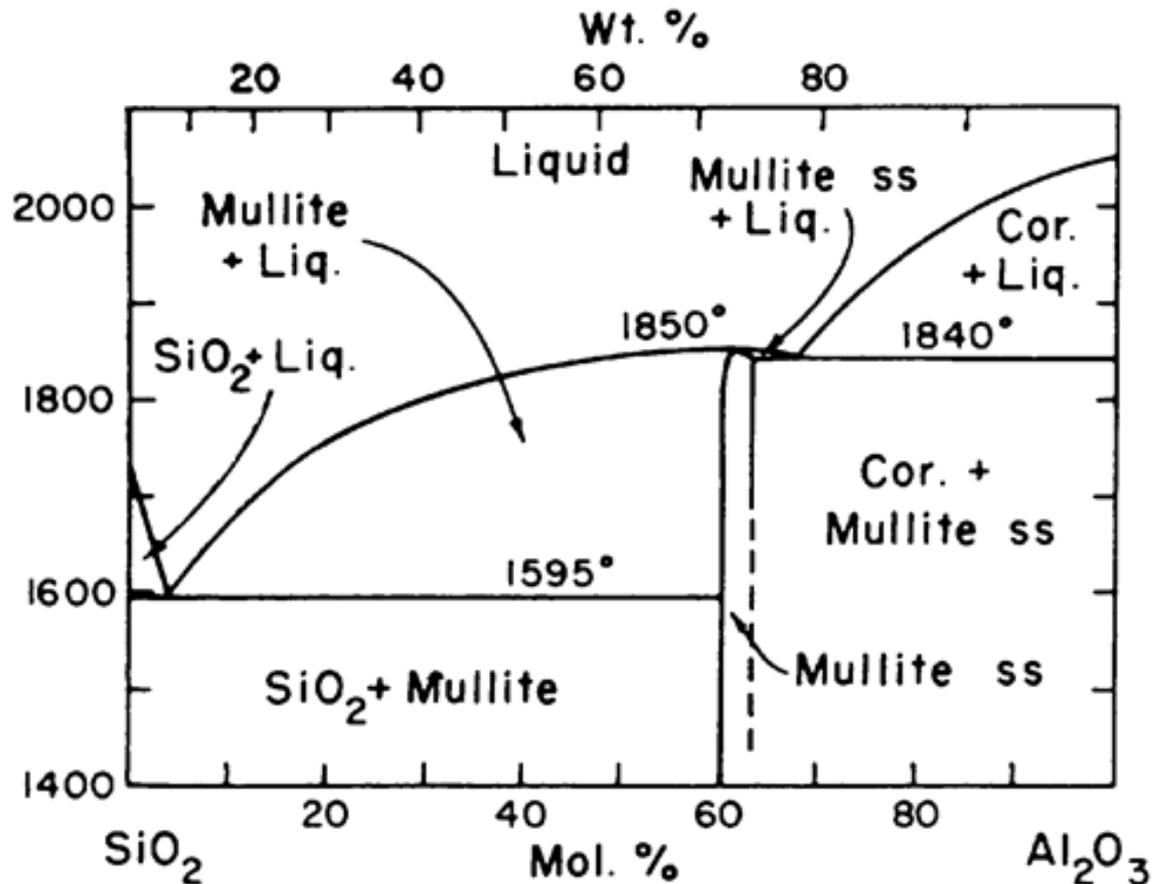


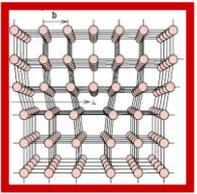


Diagramas Binários

3° Formação de composto:

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

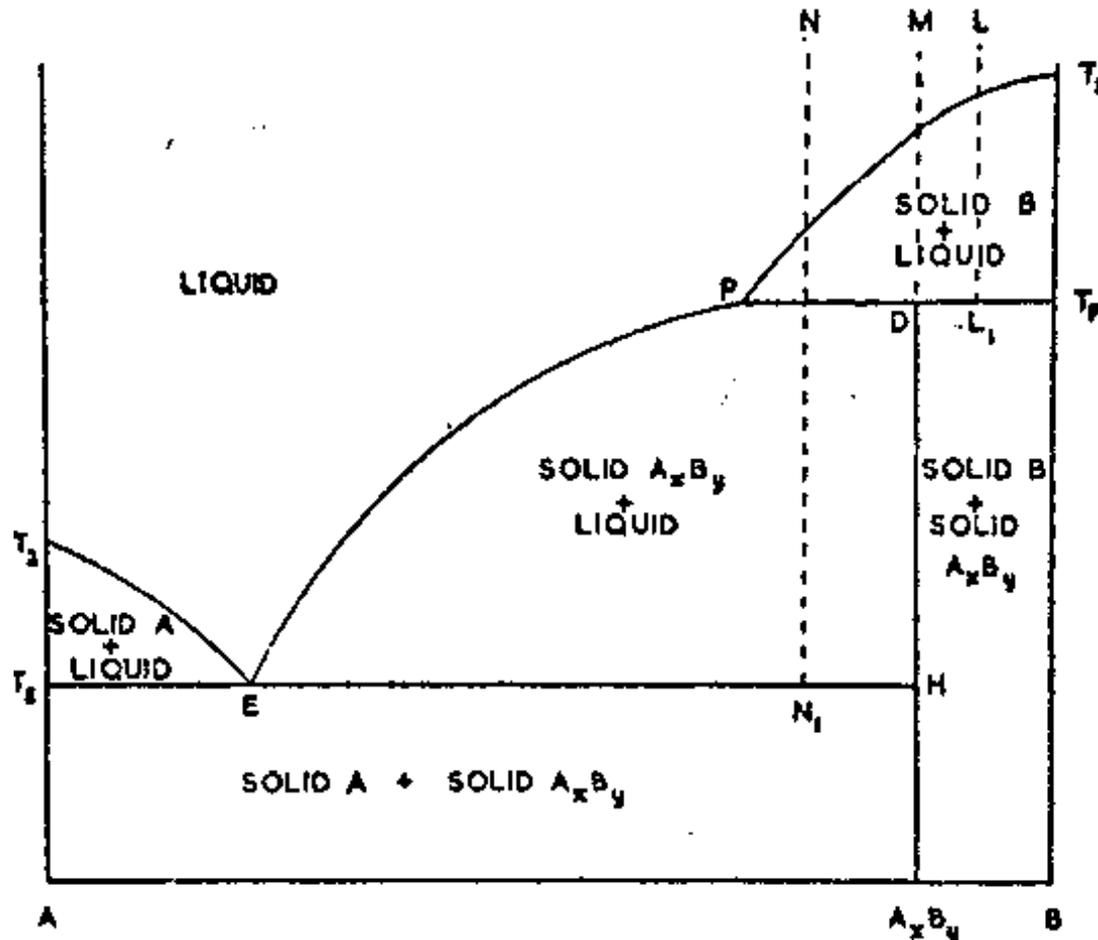


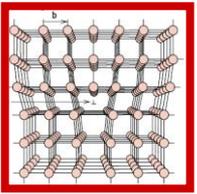


Diagramas Binários

3º Formação de composto:

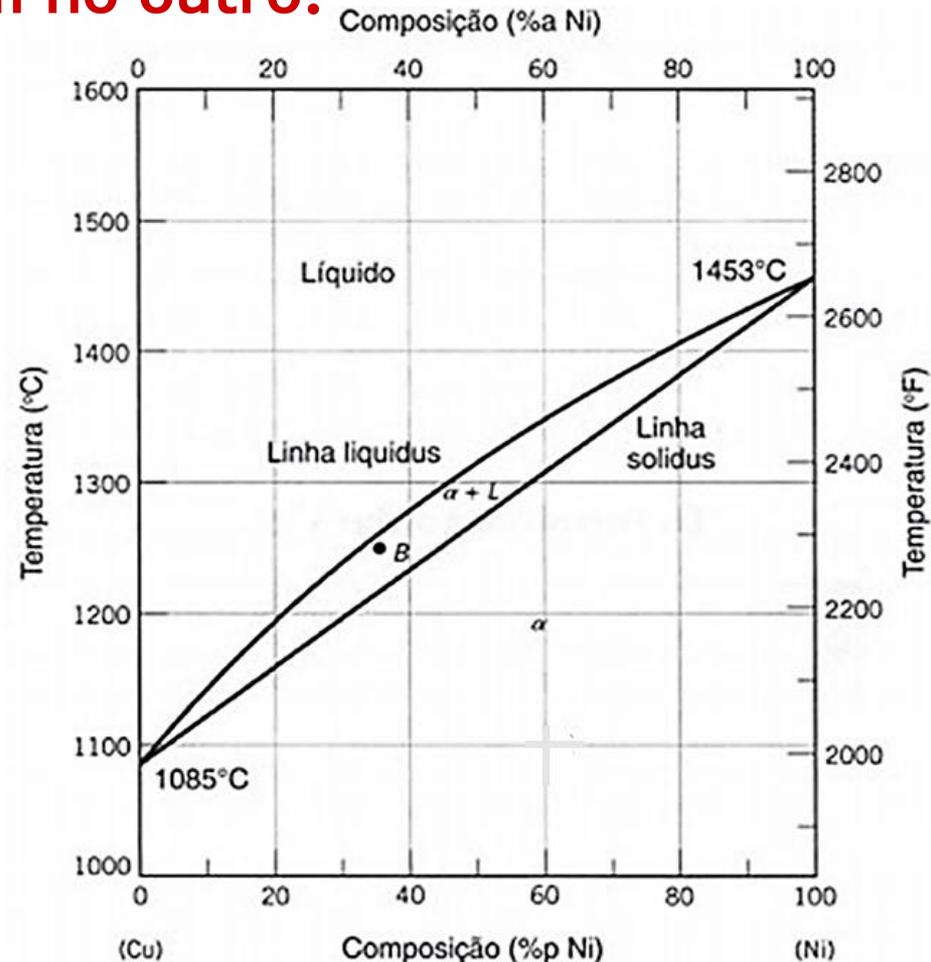
c) Composto se decompõe acima de T_e ($T > T_e$) = fusão incongruente

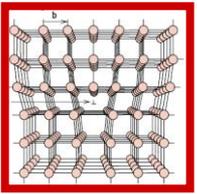




Diagramas Binários

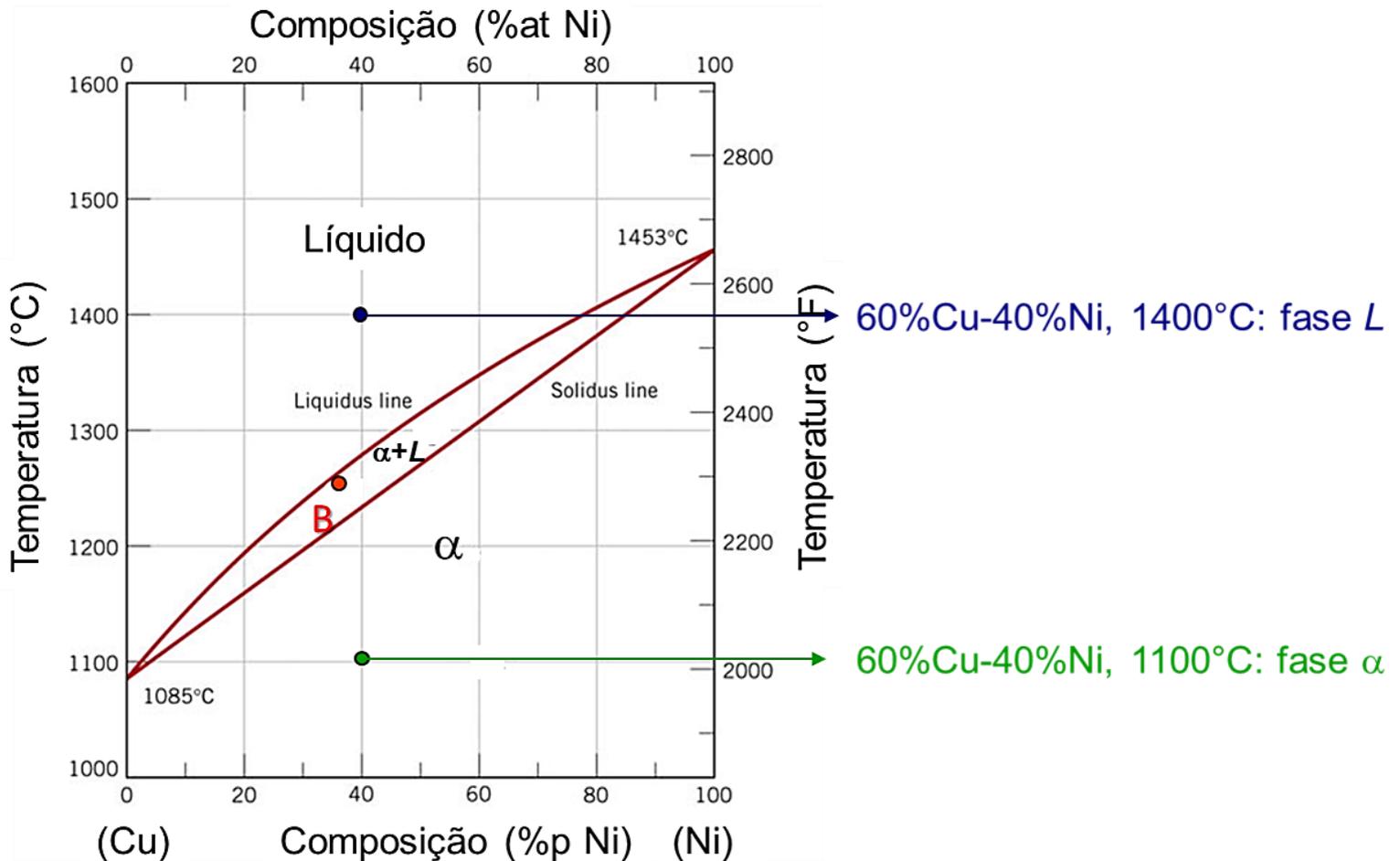
- Num sistema binário isomorfo, os dois componentes são completamente solúveis um no outro.
- A leitura de diagramas isomorfos é feita primeiramente definindo o par composição-temperatura desejado. Esse par define um ponto no diagrama.

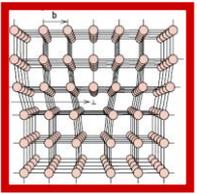




Diagramas Binários

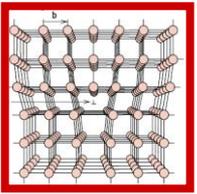
- Se o ponto desejado estiver num campo onde somente existe uma fase, a composição já está definida, e a fase é a indicada no campo do diagrama.





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).

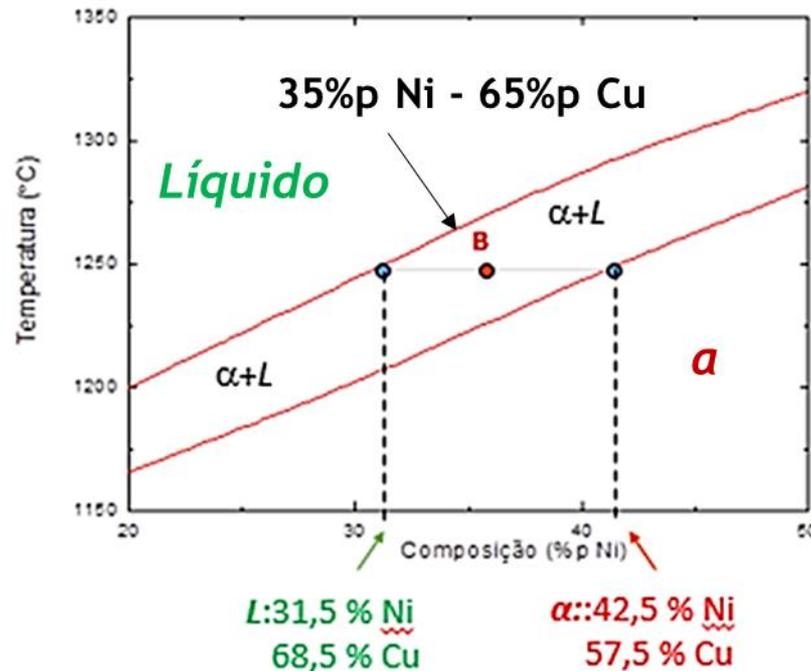


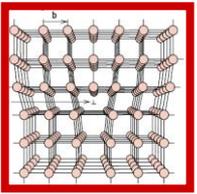
Diagramas Binários

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

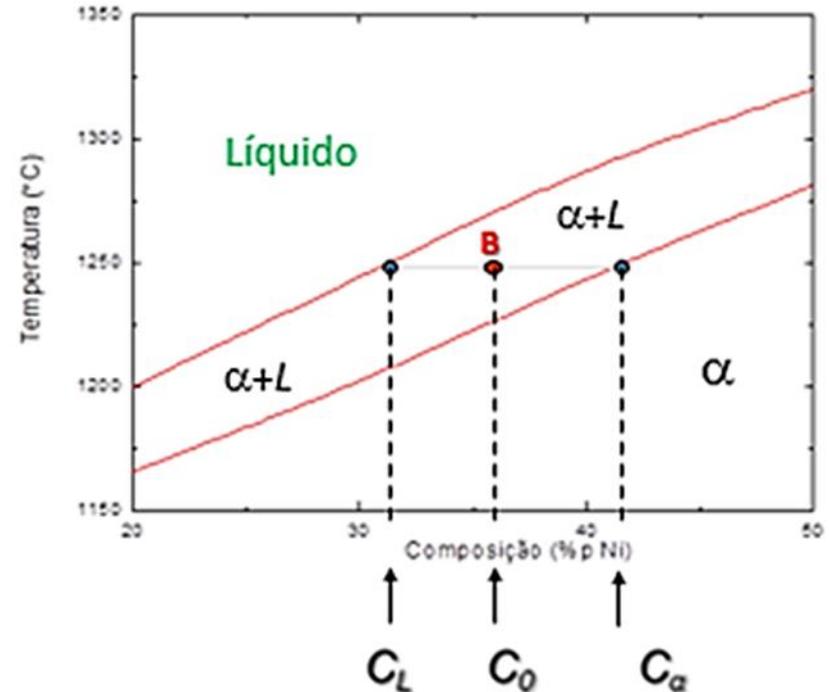
- É usada para se determinar as proporções das fases em equilíbrio em um campo de duas fases.

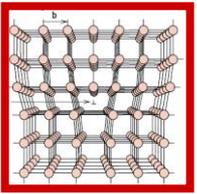
Vamos considerar novamente o exemplo anterior (ponto B do diagrama Cu-Ni). Tomando-se como C_0 a composição global da liga ao longo da linha de amarração, e como W_L e W_α as frações mássicas, respectivamente das fases líquido e α , a Regra da alavanca diz que:

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

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

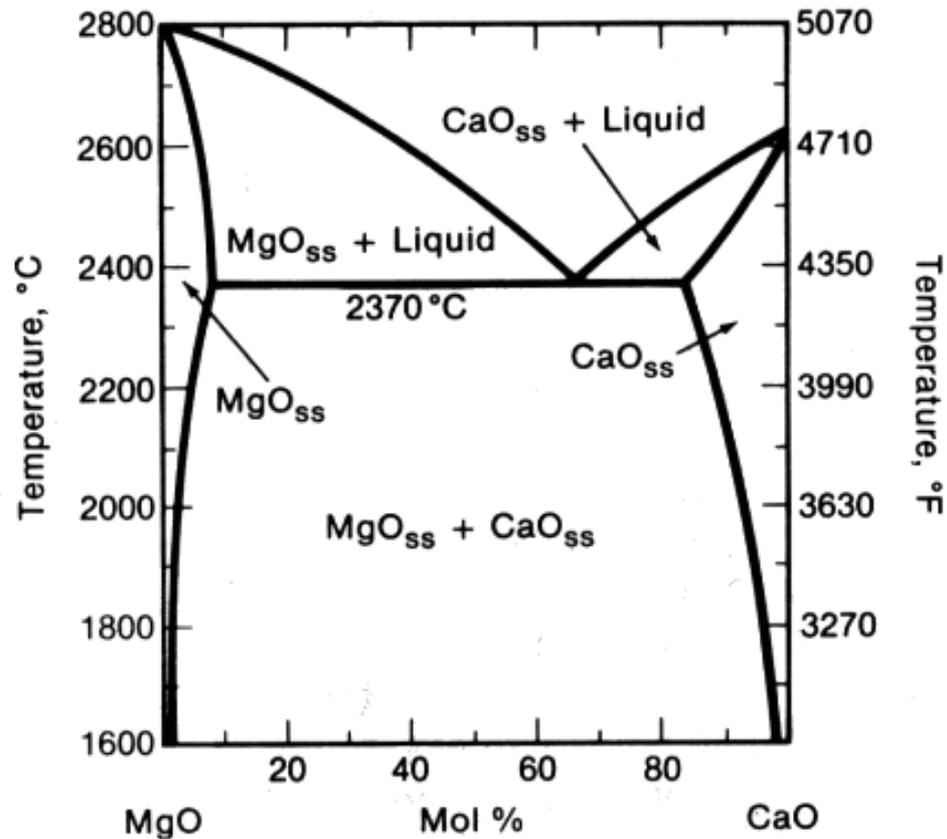
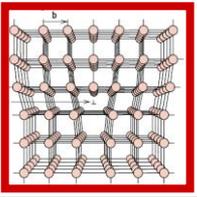


Figura 5.14: Diagrama do sistema MgO-CaO. Reação eutética e solubilidade limitada. Fonte: D. Richerson.

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



Regra da Alavanca

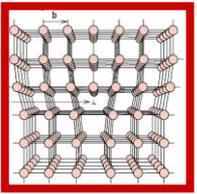
Importante:

Linhas de Amarração

Composição
das fases

Proporção
de cada fase

Regra da Alavanca



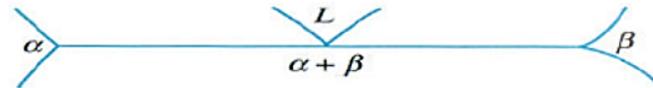
Sistemas Binários

- **Três fases em equilíbrio**

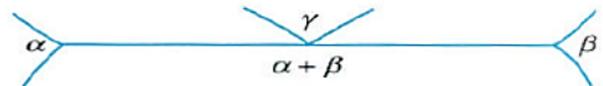
- Em um sistema binário, quando 3 fases estão em equilíbrio, o número de graus de liberdade F é zero. Assim, o equilíbrio é invariante, ou seja, o equilíbrio entre 3 fases ocorre em uma determinada temperatura e as composições das 3 fases são fixas.

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

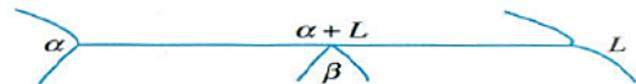
Eutética: $L \rightarrow \alpha + \beta$



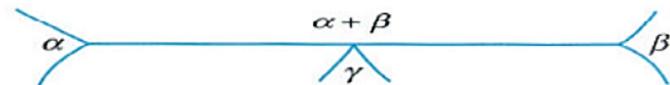
Eutetóide: $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$

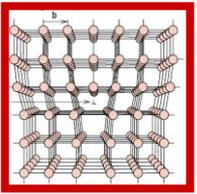


Peritética: $L + \alpha \rightarrow \beta$



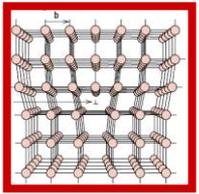
Peritetóide: $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$



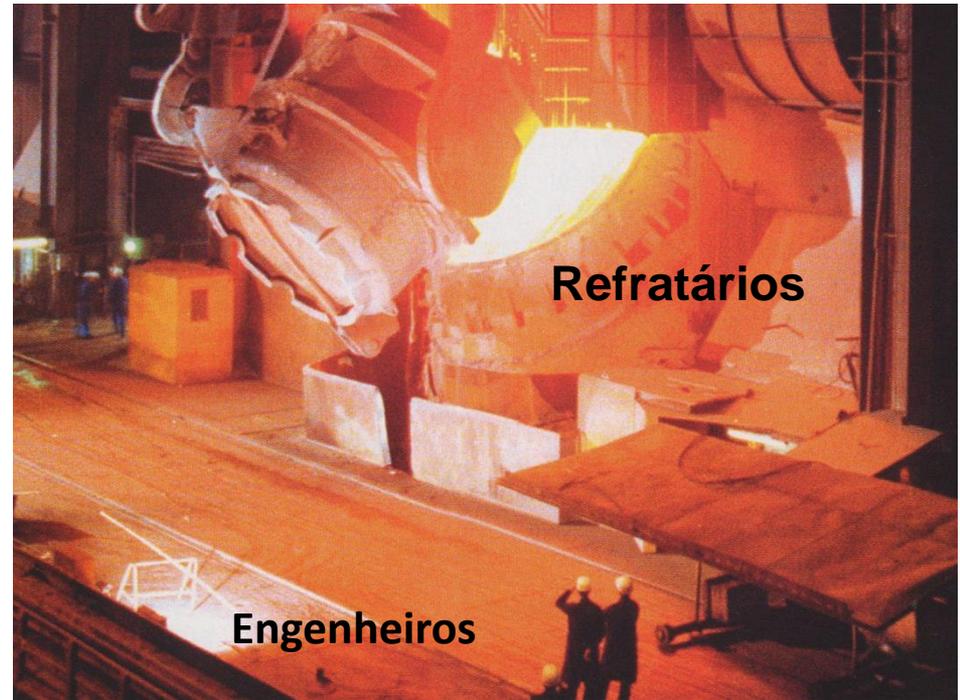


Cerâmicas

- **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.

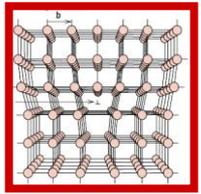


Panelas de Aço fundido



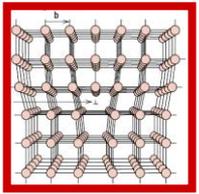
Refratários

Engenheiros

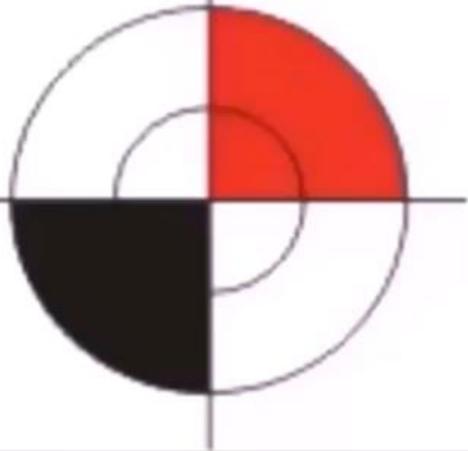


Forno de Cimento



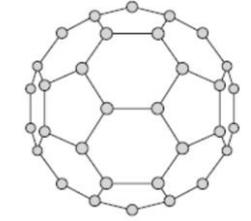
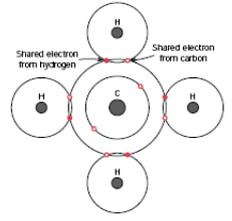
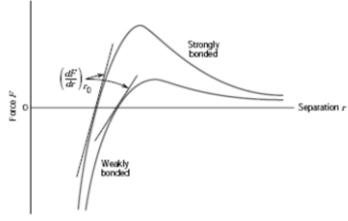


Forno de Cimento



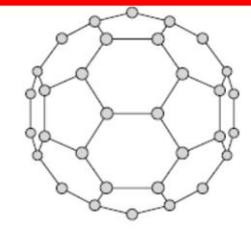
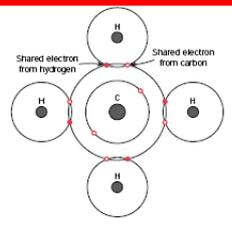
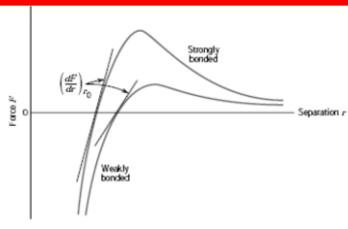
Infracemp
Soluções para Processos Industriais

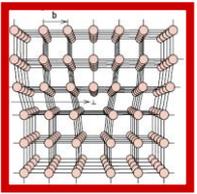
Key		Metal		Nonmetal		Metalloid	
Atomic number		Atomic weight		Atomic weight		Atomic weight	
1	H	1.008		2	He	4.003	
3	Li	6.941		4	Be	9.012	
5	B	10.811		6	C	12.011	
7	N	14.007		8	O	15.999	
9	F	18.998		10	Ne	20.180	
11	Na	22.990		12	Mg	24.305	
13	Al	26.982		14	Si	28.086	
15	P	30.974		16	S	32.065	
17	Cl	35.453		18	Ar	39.948	
19	K	39.098		20	Ca	40.078	
21	Sc	44.956		22	Ti	47.88	
23	V	50.942		24	Cr	52.00	
25	Mn	54.938		26	Fe	55.845	
27	Co	58.933		28	Ni	58.69	
29	Cu	63.546		30	Zn	65.38	
31	Ga	69.723		32	Ge	72.64	
33	As	74.922		34	Se	78.96	
35	Br	79.904		36	Kr	83.80	
37	Rb	85.468		38	Sr	87.62	
39	Y	88.906		40	Zr	91.224	
41	Nb	92.906		42	Ni	95.94	
43	Ta	182.04		44	Ru	101.07	
45	Hf	178.49		46	Rh	102.91	
47	Tl	204.38		48	Pd	106.42	
49	Hg	200.59		50	Ag	107.87	
51	Sb	121.76		52	Cd	112.41	
53	Te	127.60		54	In	114.82	
55	I	126.90		56	Sn	118.71	
57	Ba	137.33		58	Pb	207.2	
59	La	138.905		60	Bi	208.98	
61	Ce	140.12		62	Po	209	
63	Pr	140.908		64	At	210	
65	Nd	144.24		66	Rn	222	
67	Pm	144.913		68	Fr	223	
69	Sm	150.36		70	Ra	226	
71	Eu	151.964		72	Ac	227	
73	Gd	157.25		74	Th	232.04	
75	Tb	158.925		76	Pa	231.04	
77	Dy	162.50		78	U	238.03	
79	Ho	164.930		79	Np	237.05	
81	Er	167.26		80	Pu	244.06	
83	Tm	168.930		81	Am	243.06	
85	Yb	173.054		82	Cm	247.07	
87	Lu	174.967		83	Bk	247.07	
89	Hf	178.49		84	Cf	251.08	
91	Ta	182.04		85	Es	252.08	
93	W	183.84		86	Fm	253.08	
95	Re	186.207		87	Md	258.10	
97	Os	190.23		88	Lr	262.11	
99	Ir	192.22					
101	Pt	195.084					
103	Au	196.967					
105	Hg	200.59					
107	Tl	204.38					
109	Pb	207.2					
111	Bi	208.98					
113	Po	209					
115	At	210					
117	Rn	222					
119	Fr	223					
121	Ra	226					
123	Ac	227					
125	Th	232.04					
127	Pa	231.04					
129	U	238.03					
131	Np	237.05					
133	Pu	244.06					
135	Am	243.06					
137	Cm	247.07					
139	Bk	247.07					
141	Cf	251.08					
143	Es	252.08					
145	Fm	253.08					
147	Md	258.10					
149	Lr	262.11					



Diagramas Ternários

Key		Metal		Nonmetal		Metalloid	
Atomic number		Atomic weight		Atomic weight		Atomic weight	
1	H	1.008		2	He	4.003	
3	Li	6.941		4	Be	9.012	
5	B	10.811		6	C	12.011	
7	N	14.007		8	O	15.999	
9	F	18.998		10	Ne	20.180	
11	Na	22.990		12	Mg	24.305	
13	Al	26.982		14	Si	28.086	
15	P	30.974		16	S	32.065	
17	Cl	35.453		18	Ar	39.948	
19	K	39.098		20	Ca	40.078	
21	Sc	44.956		22	Ti	47.88	
23	V	50.942		24	Cr	52.00	
25	Mn	54.938		26	Fe	55.845	
27	Co	58.933		28	Ni	58.69	
29	Cu	63.546		30	Zn	65.38	
31	Ga	69.723		32	Ge	72.64	
33	As	74.922		34	Se	78.96	
35	Br	79.904		36	Kr	83.80	
37	Rb	85.468		38	Sr	87.62	
39	Y	88.906		40	Zr	91.224	
41	Nb	92.906		42	Ni	95.94	
43	Ta	182.04		44	Ru	101.07	
45	Hf	178.49		46	Rh	102.91	
47	Tl	204.38		48	Pd	106.42	
49	Hg	200.59		50	Ag	107.87	
51	Sb	121.76		52	Cd	112.41	
53	Te	127.60		54	In	114.82	
55	I	126.90		56	Sn	118.71	
57	Ba	137.33		58	Pb	207.2	
59	La	138.905		60	Bi	208.98	
61	Ce	140.12		62	Po	209	
63	Pr	140.908		64	At	210	
65	Nd	144.24		66	Rn	222	
67	Pm	144.913		68	Fr	223	
69	Sm	150.36		70	Ra	226	
71	Eu	151.964		72	Ac	227	
73	Gd	157.25		74	Th	232.04	
75	Tb	158.925		76	Pa	231.04	
77	Dy	162.50		78	U	238.03	
79	Ho	164.930		79	Np	237.05	
81	Er	167.26		80	Pu	244.06	
83	Tm	168.930		81	Am	243.06	
85	Yb	173.054		82	Cm	247.07	
87	Lu	174.967		83	Bk	247.07	
89	Hf	178.49		84	Cf	251.08	
91	Ta	182.04		85	Es	252.08	
93	W	183.84		86	Fm	253.08	
95	Re	186.207		87	Md	258.10	
97	Os	190.23		88	Lr	262.11	
99	Ir	192.22					
101	Pt	195.084					
103	Au	196.967					
105	Hg	200.59					
107	Tl	204.38					
109	Pb	207.2					
111	Bi	208.98					
113	Po	209					
115	At	210					
117	Rn	222					
119	Fr	223					
121	Ra	226					
123	Ac	227					
125	Th	232.04					
127	Pa	231.04					
129	U	238.03					
131	Np	237.05					
133	Pu	244.06					
135	Am	243.06					
137	Cm	247.07					
139	Bk	247.07					
141	Cf	251.08					
143	Es	252.08					
145	Fm	253.08					
147	Md	258.10					
149	Lr	262.11					





Diagramas Ternários

- **Noções básicas:**

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

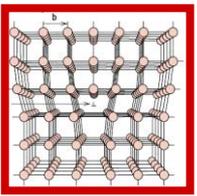
- três matérias primas, três óxidos, três fases cerâmicas

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

- em %molar ou % em peso.

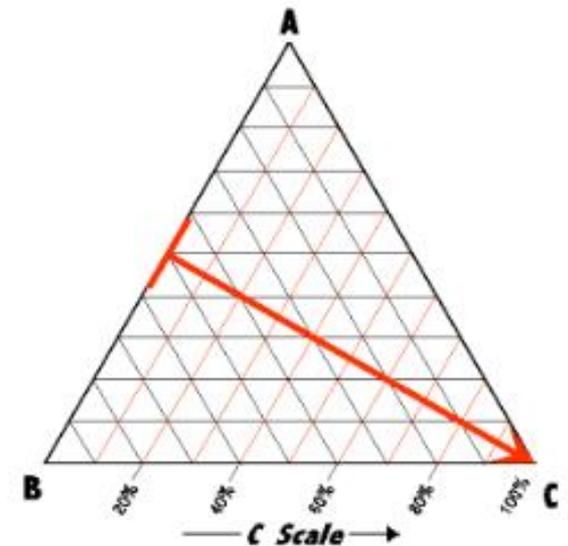
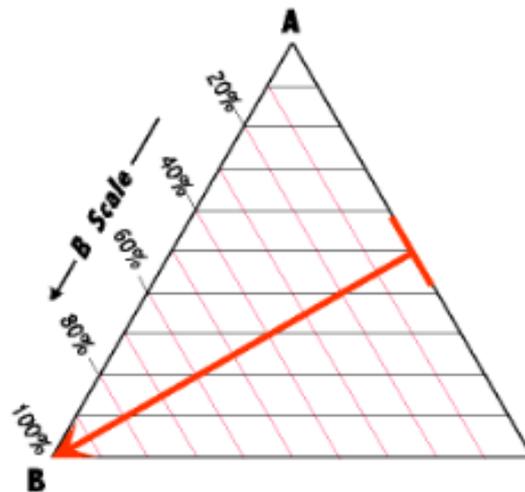
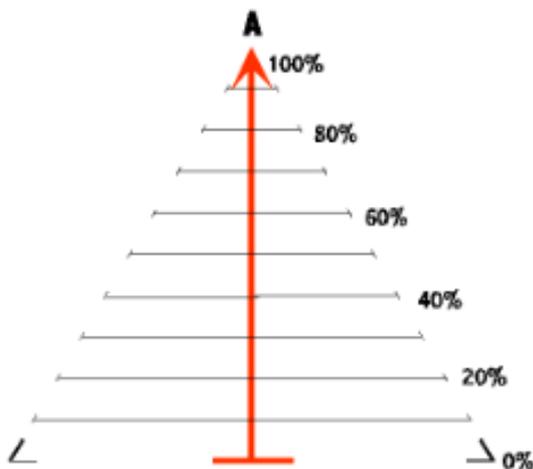
A composição de um sistema ternário fica definida quando temos a fração molar (fração mássica) dos componentes.

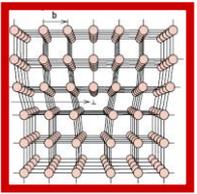
$$X_a + X_b + X_c = 1$$



Diagramas Ternários

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

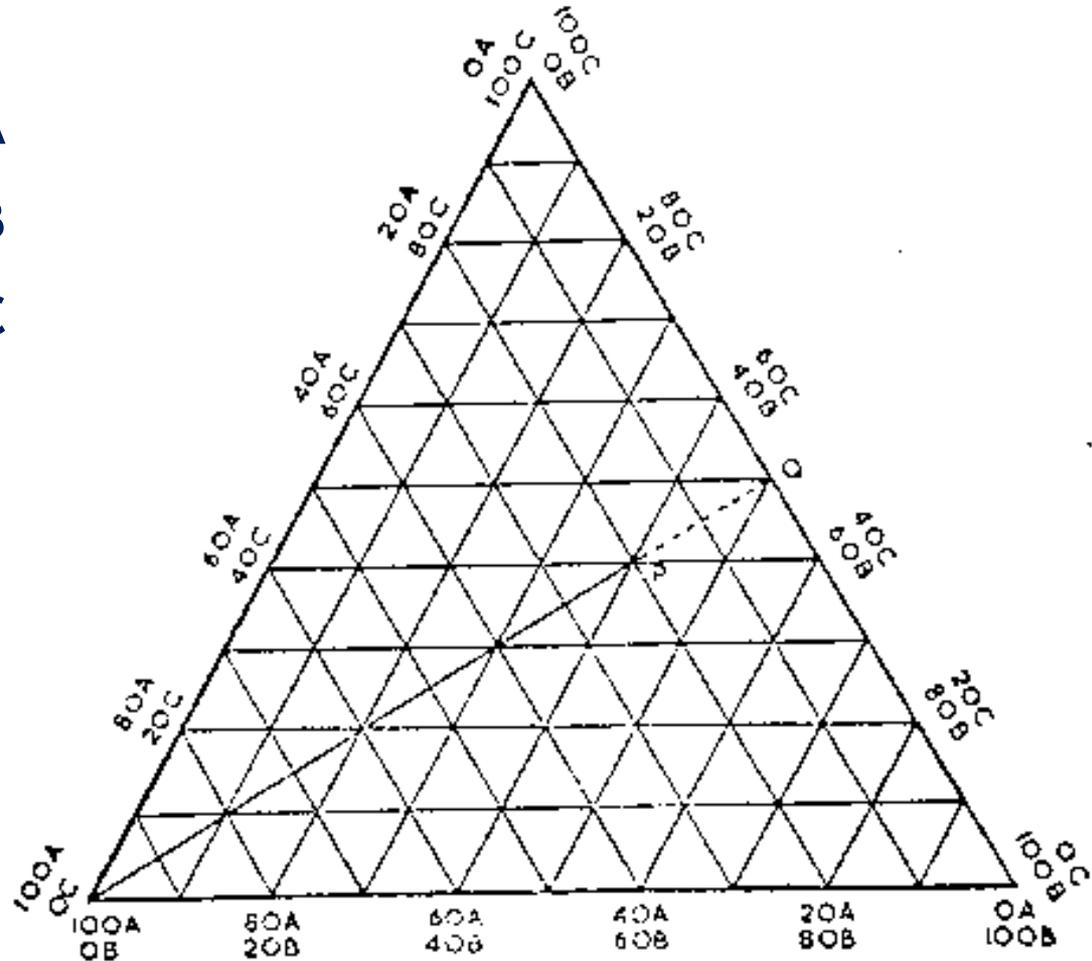
Por exemplo:

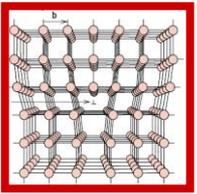
Ponto P: 20% A

40% B

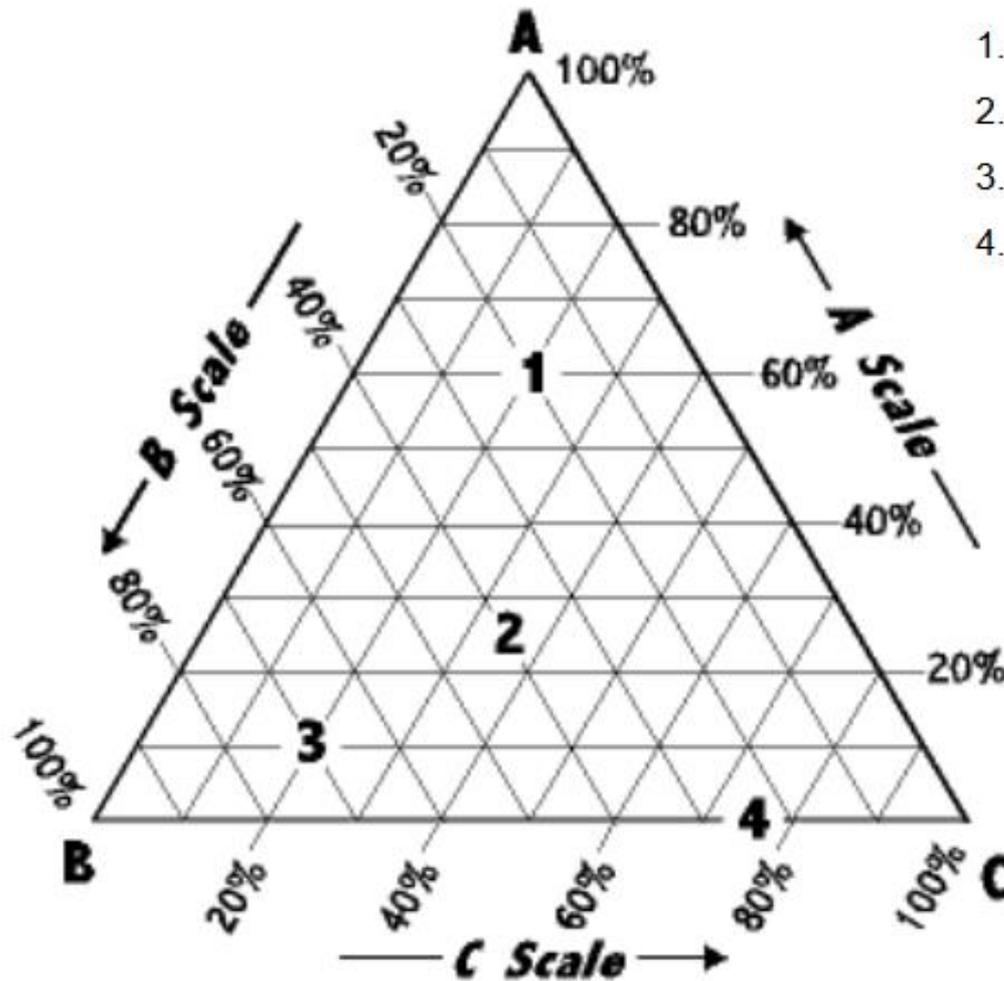
40% C

BASE GEOMÉTRICA

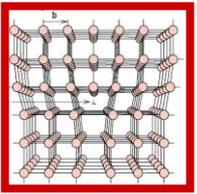




Diagramas Ternários



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:

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

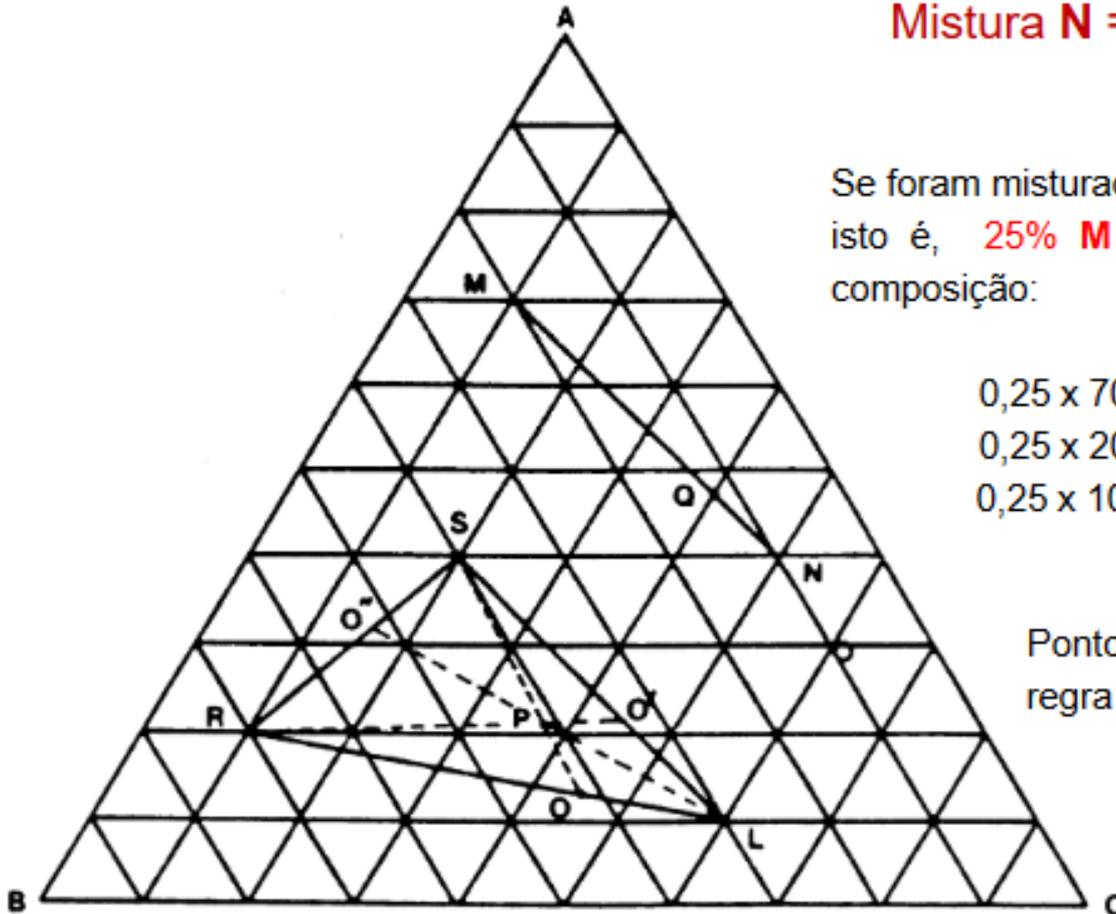
$$0,25 \times 20\% B + 0,75 \times 10\% B = 12,5\% B$$

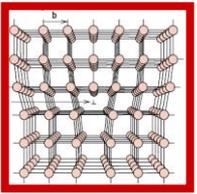
$$0,25 \times 10\% C + 0,75 \times 50\% C = 40,0\% C$$

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

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

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





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:

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

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

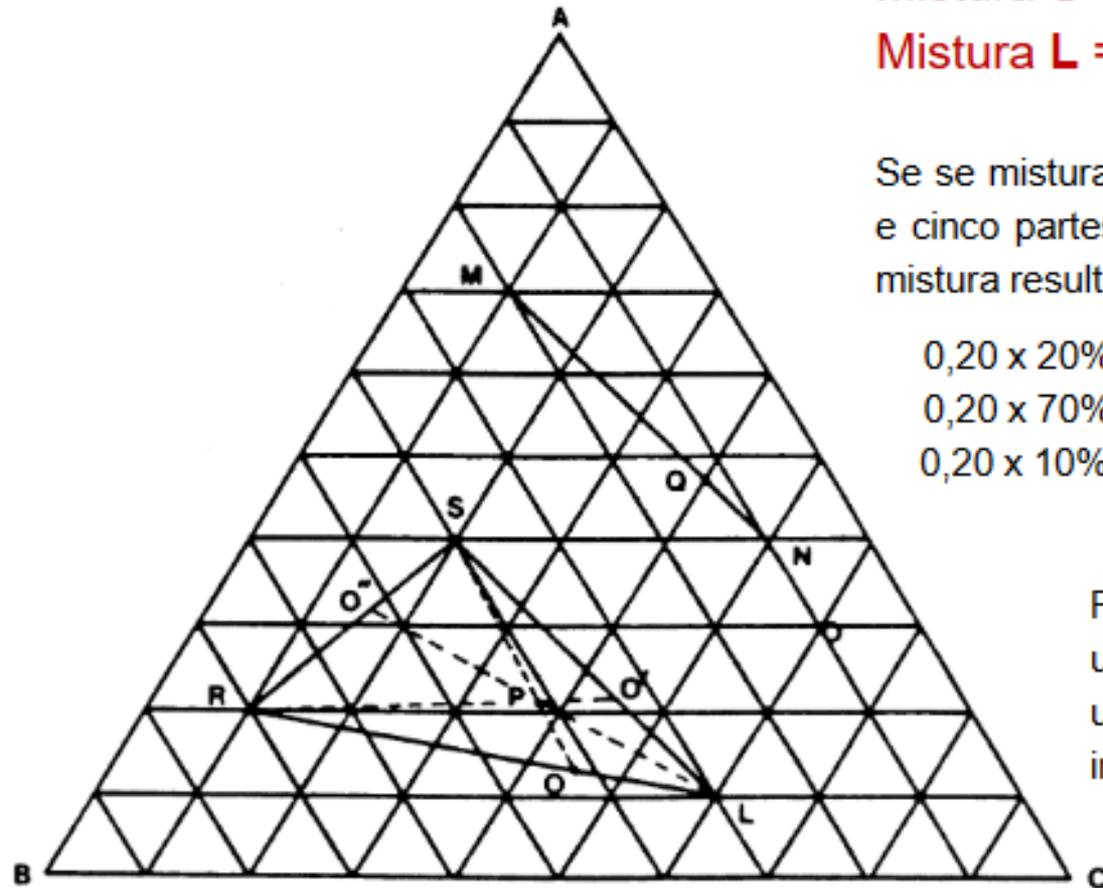
$$0,20 \times 10\% \text{ C} + 0,30 \times 20\% \text{ C} + 0,50 \times 60\% \text{ C} = 38\% \text{ C}$$

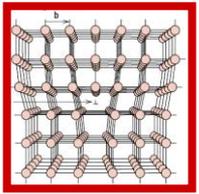
Pode-se calcular as proporções de **R**, **S** e **L** usando três alavancas lineares independentes, unindo cada um dos vértices ao ponto **P** até interceptar o lado oposto, tal que:

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

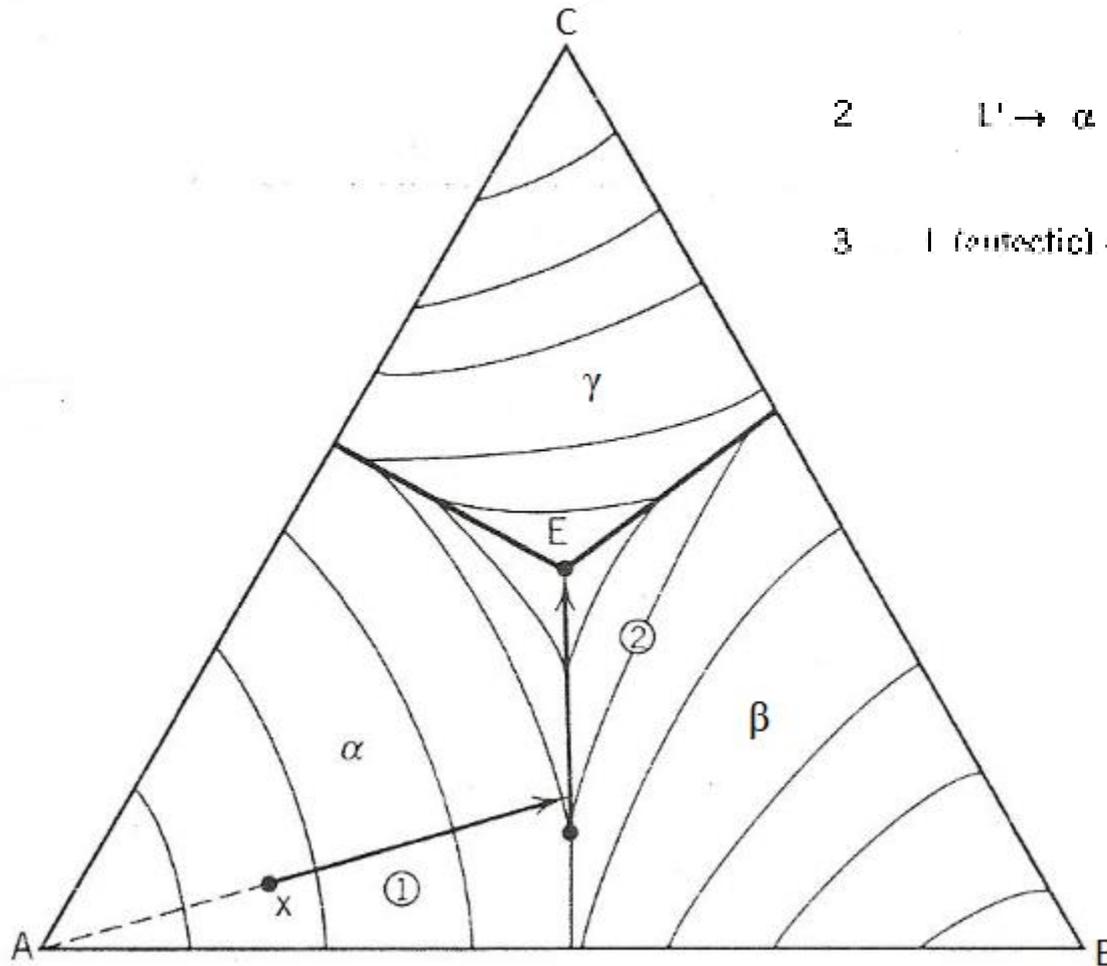
$$\% \text{ R} = (PO'/RO') \times 100 = 20\%$$

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

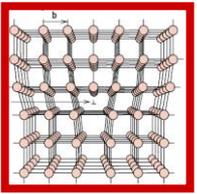




Diagramas Ternários

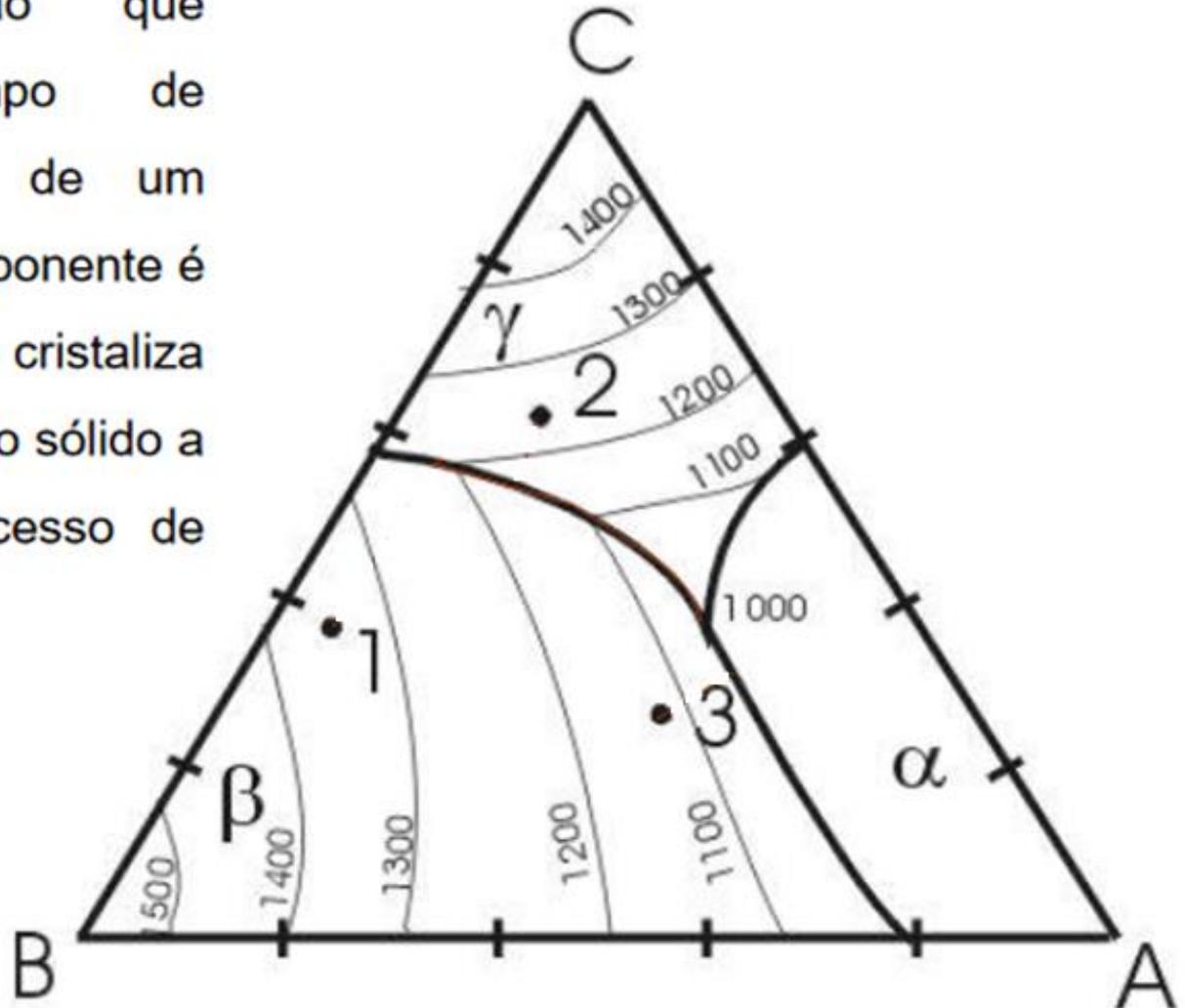


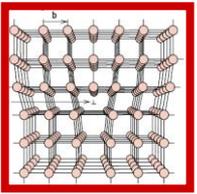
<u>Path</u>	<u>Reaction</u>	<u>Schematic microstructure</u>
1	$L \rightarrow \alpha + L'$	
2	$L' \rightarrow \alpha + \beta + L''$	
3	$L \text{ (eutectic)} \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$	



Diagramas Ternários

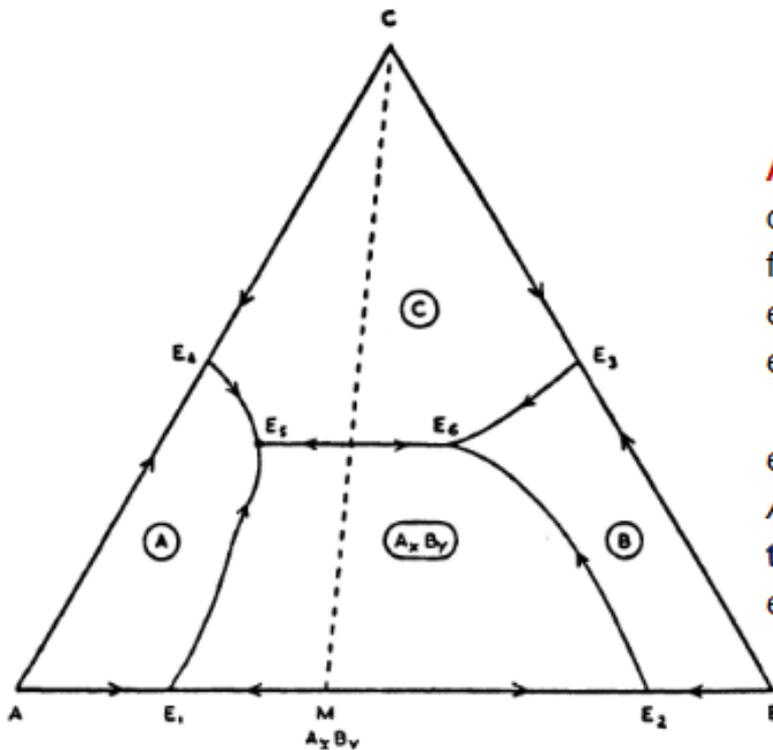
Qualquer composição que pertença ao campo de cristalização primária de um componente, esse componente é o primeiro sólido que se cristaliza a partir do líquido (último sólido a desaparecer num processo de fusão).





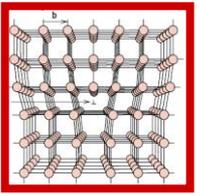
Diagramas Ternários

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 Alkemade, 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

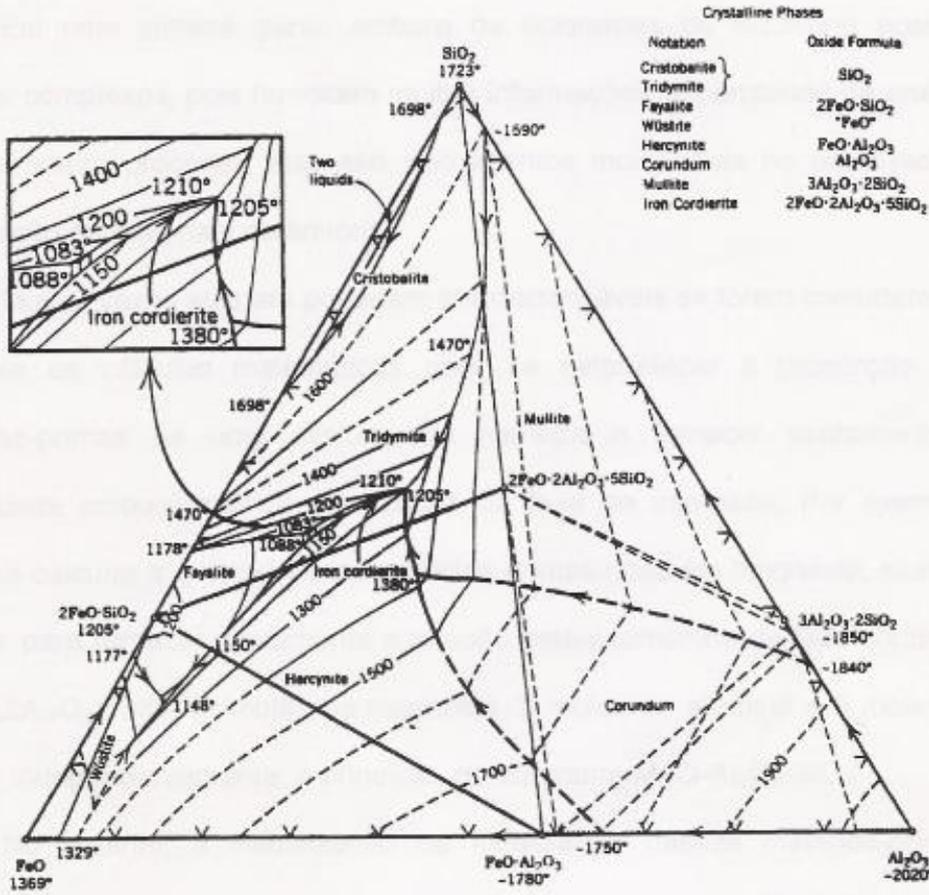


Figura 28: Sistema $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

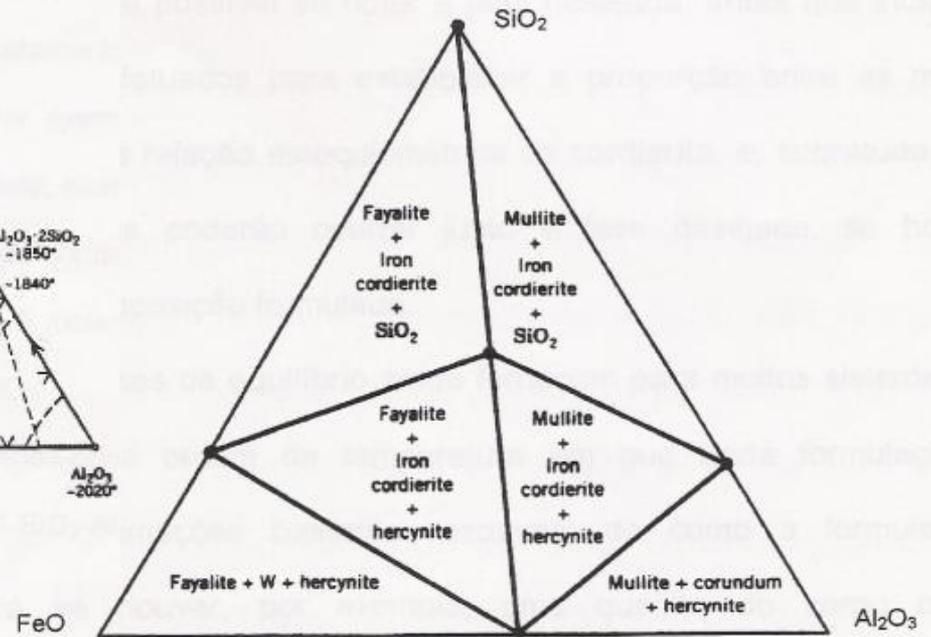
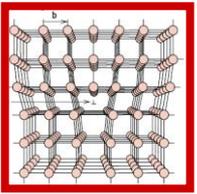
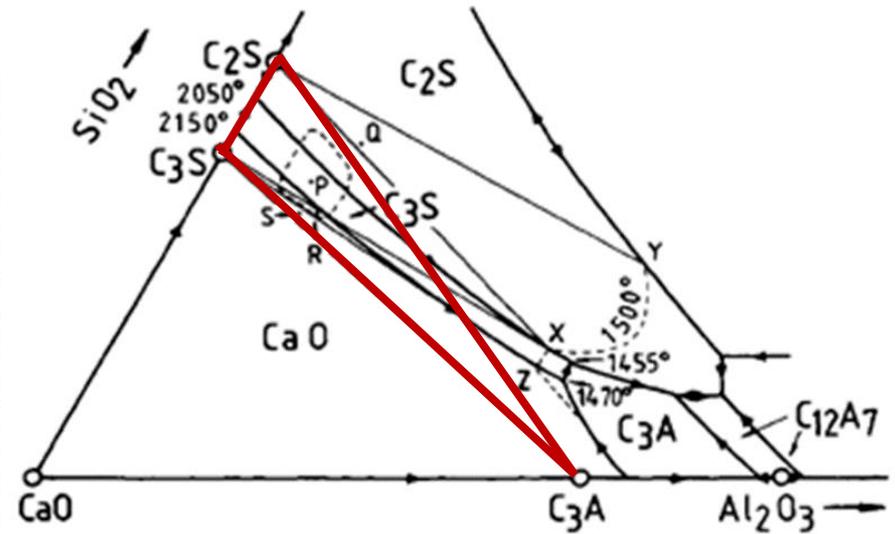
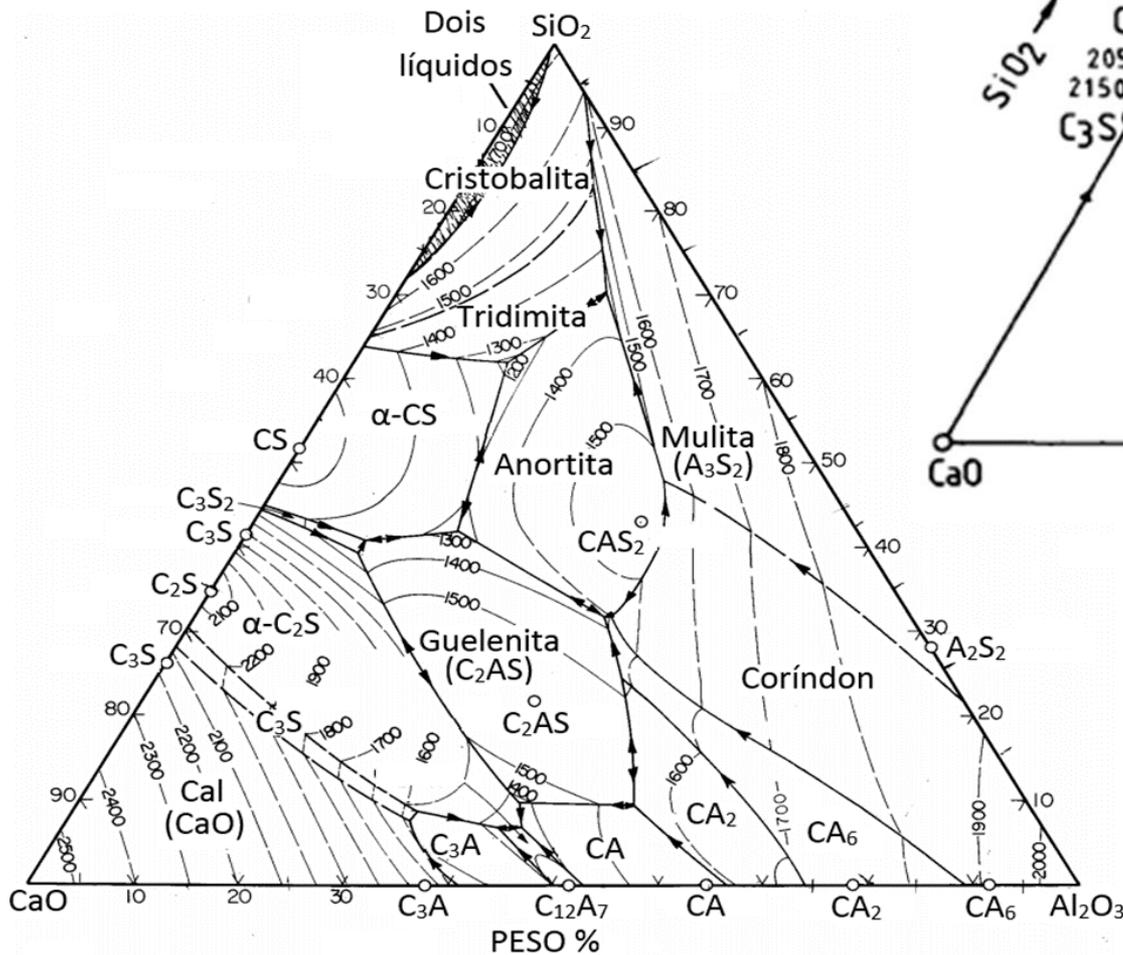


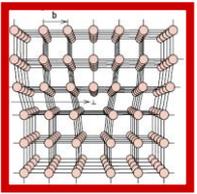
Figura 29: Triângulos de compatibilidade para o sistema $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ à temperatura ambiente.



Diagramas Ternários

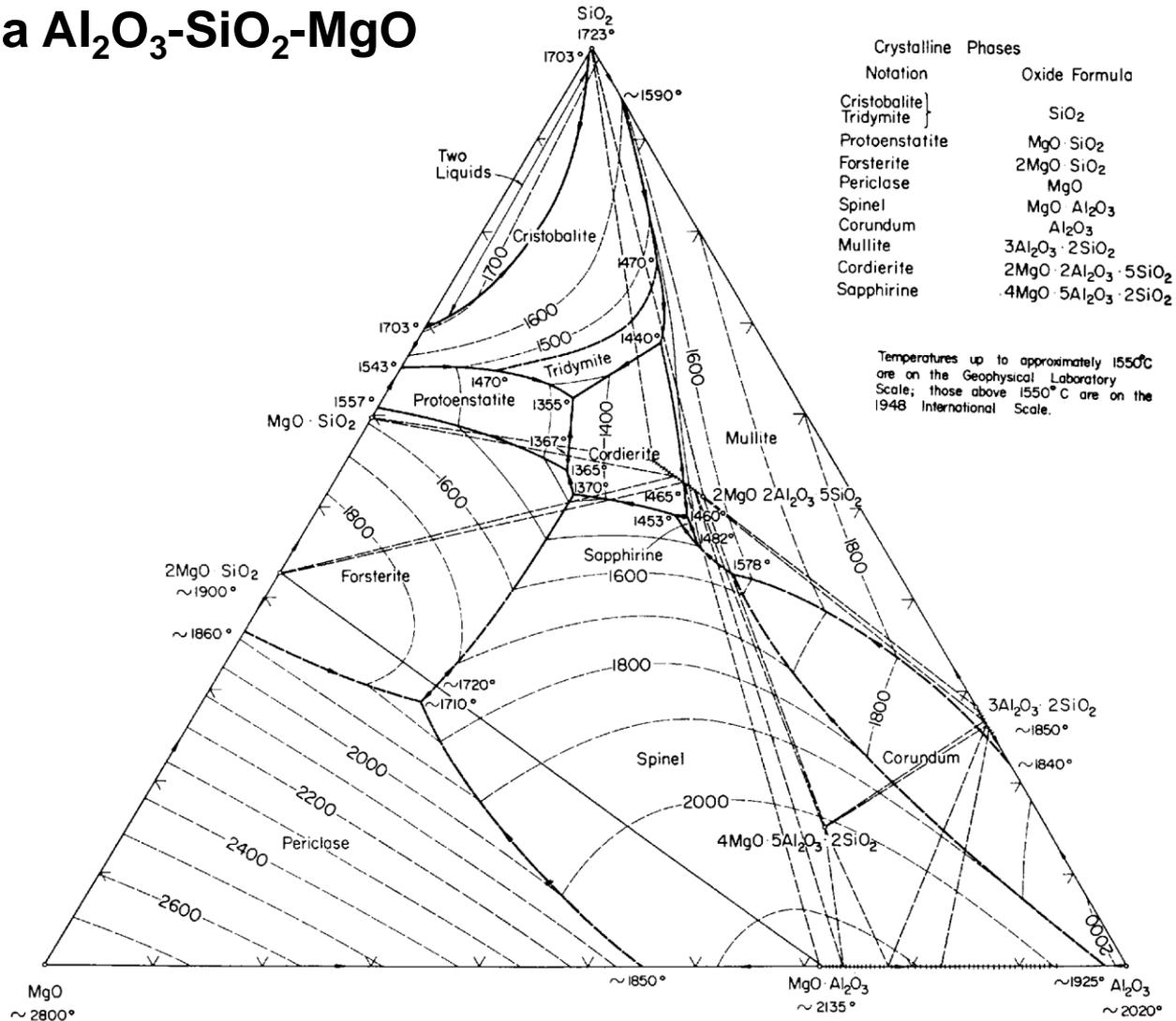
Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$

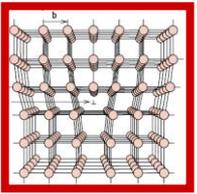




Diagramas Ternários

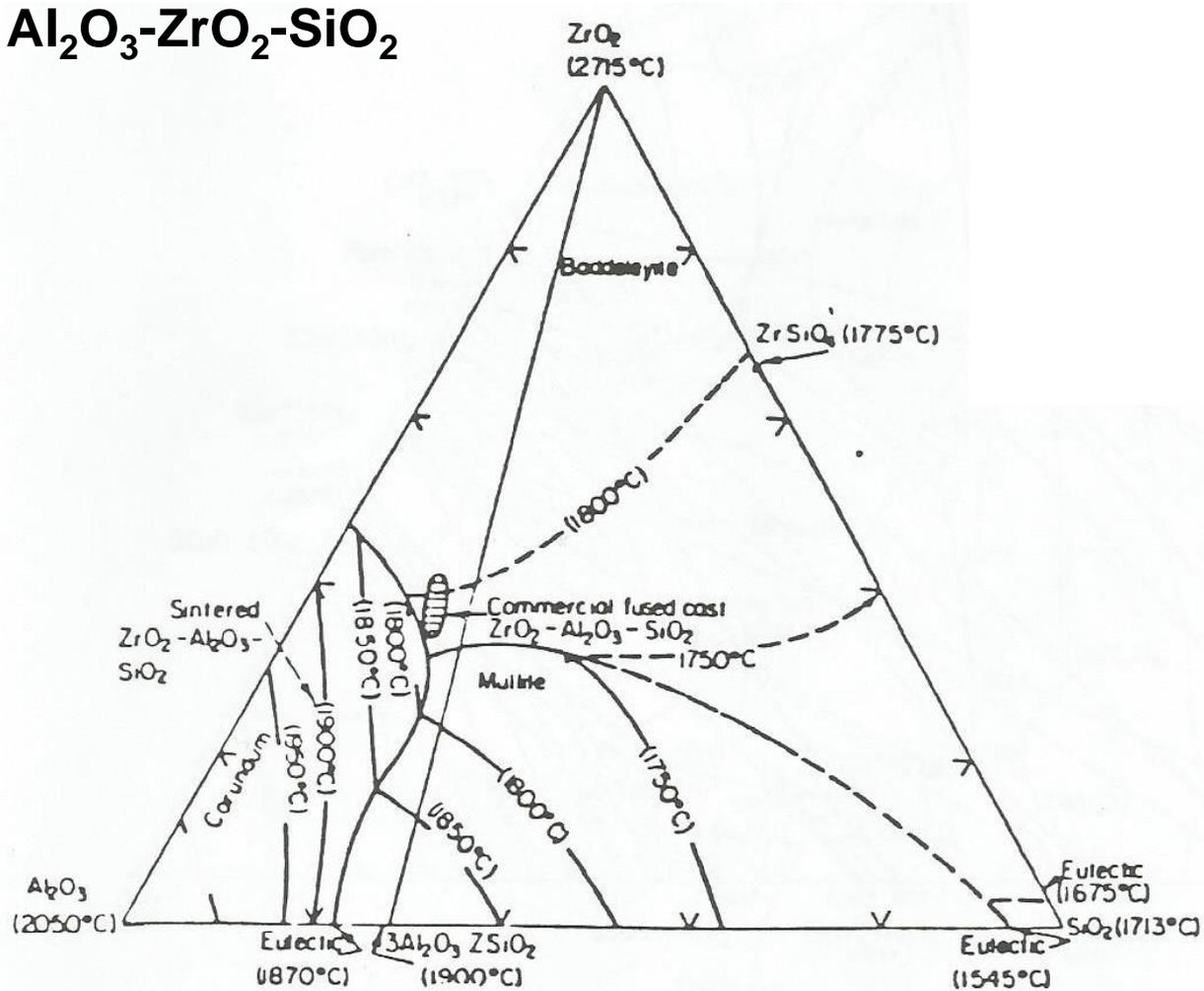
Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$

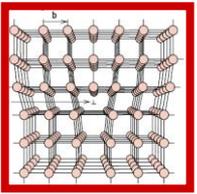




Diagramas Ternários

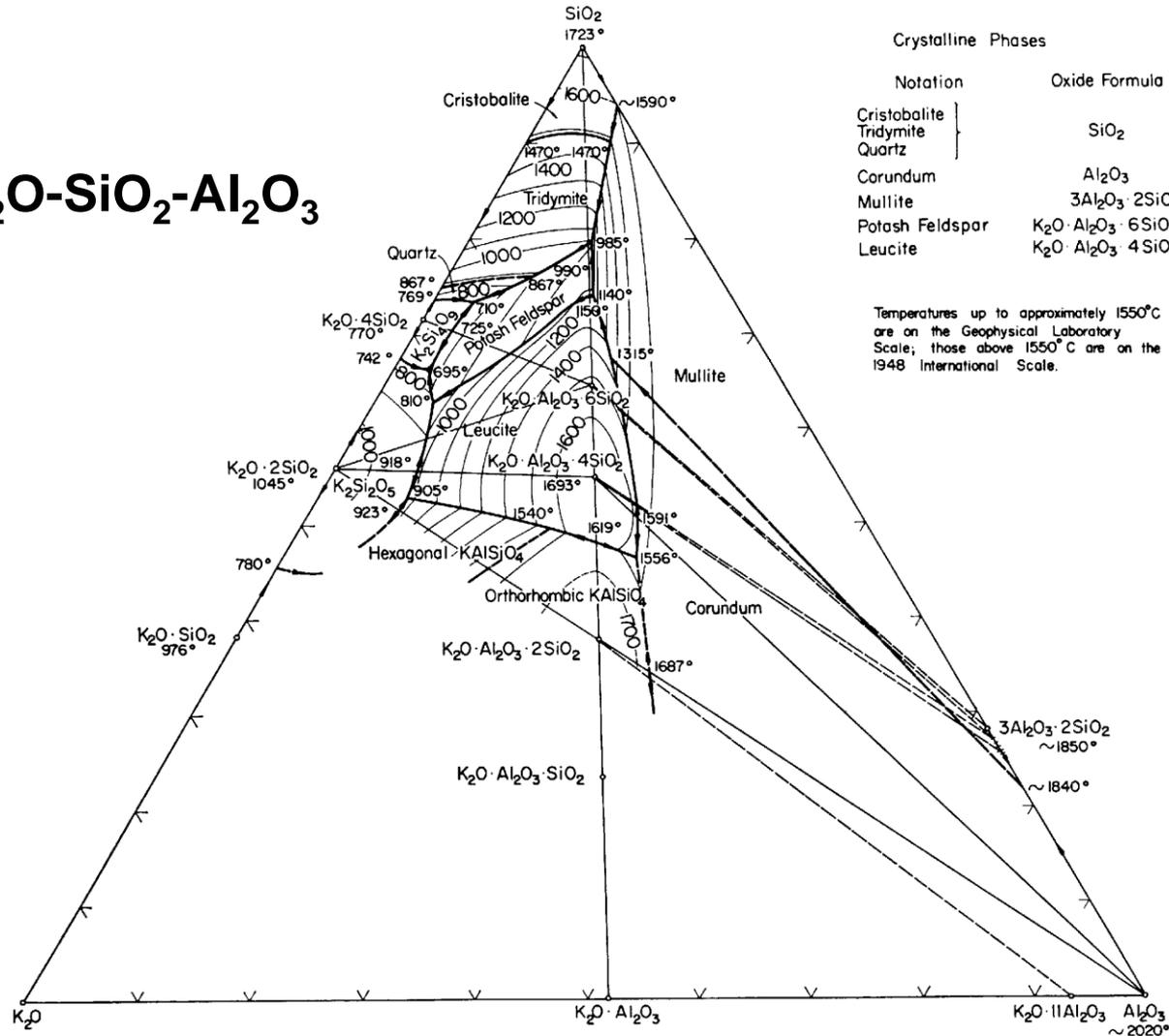
Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$





Diagramas Ternários

Sistema $K_2O-SiO_2-Al_2O_3$





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																																																																																																																																																													
1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36		37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54		55		56		57		58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86		87		88		89		90		91		92		93		94		95		96		97		98		99		100	
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

