

Deformação e Mecanismos de Endurecimento Metais

DEMEC – TM242-B
Prof Adriano Scheid



Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação

Deformação Elástica

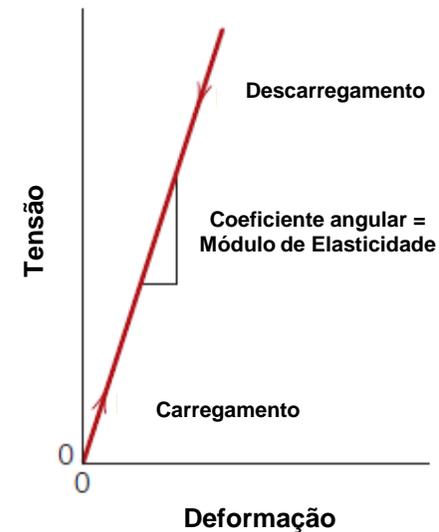
Comportamento tensão-Deformação

O grau com o qual a estrutura cristalina se deforma depende da magnitude da tensão aplicada.

Para tensões baixas, a relação entre a tensão e a deformação é dada por:

$$\sigma = E\epsilon$$

Esta é conhecida como lei de Hooke, com comportamento linear entre a tensão e a deformação, sendo E a constante de proporcionalidade ou Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young.





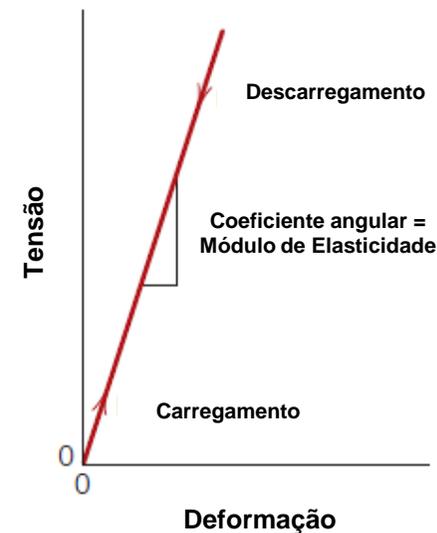
Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação

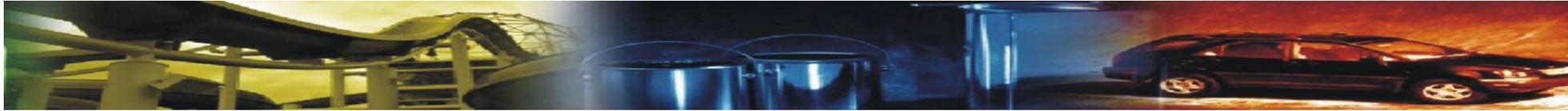
Deformação Elástica

Na região de deformação elástica, o comportamento pode ser pensado como a rigidez do material ou resistência à deformação Elástica.

Neste regime de deformação, uma vez que a carga for cessada, o componente retorna às suas dimensões originais.

Metal ou Liga	Módulo de Elasticidade	
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>
Alumínio	69	10
Latão	97	14
Cobre	110	16
Magnésio	45	6.5
Níquel	207	30
Aço	207	30
Titânio	107	15.5
Tungstênio	407	59



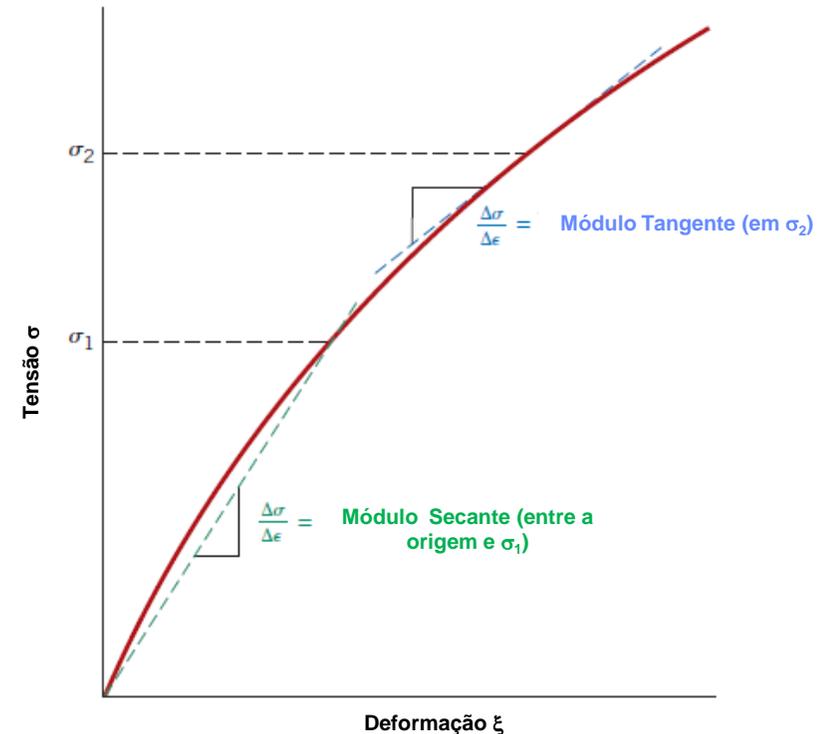


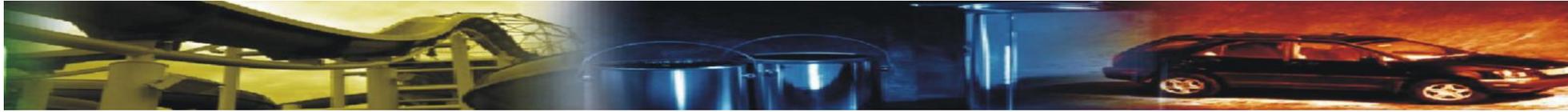
Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação

Deformação Elástica Não Linear

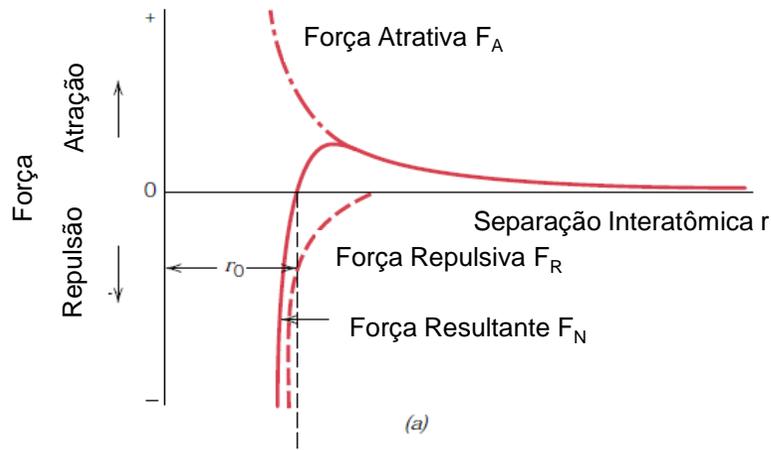
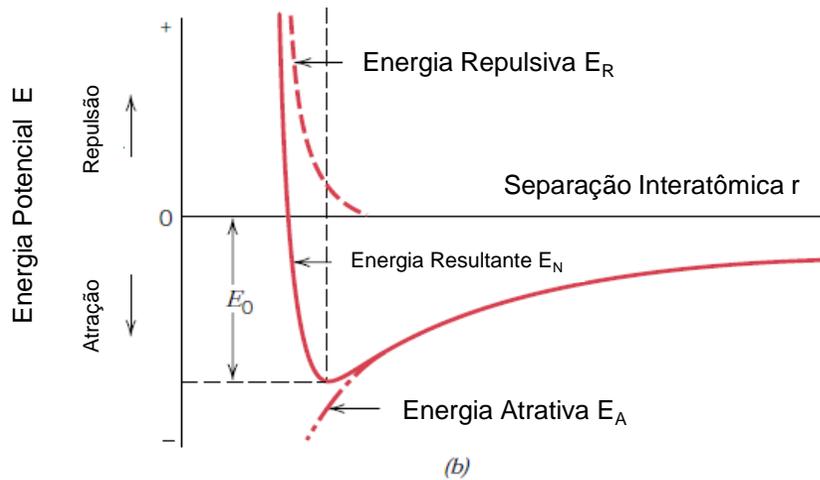
Alguns materiais (Ferro Fundido Cinzento, Polímeros, Concreto) podem apresentar comportamento não linear, sendo então representados pelos Módulos Tangente ou Secante.

O Módulo Tangente é calculado em uma determinada tensão e o Módulo Secante é sempre considerado da origem até um dado valor de tensão.

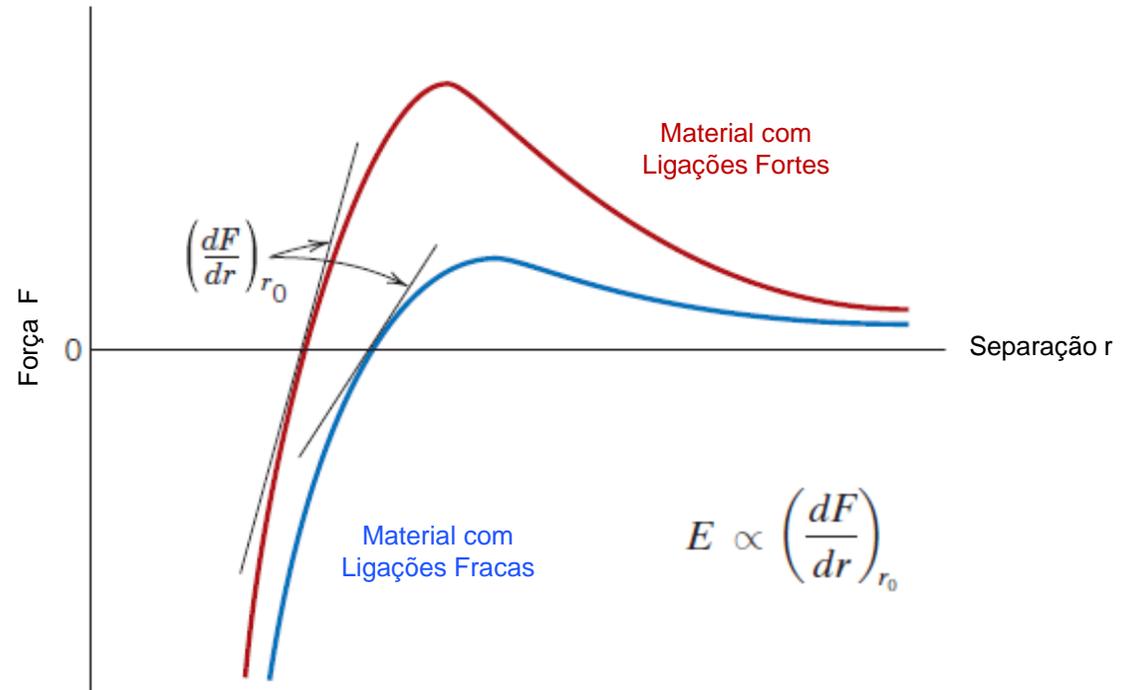


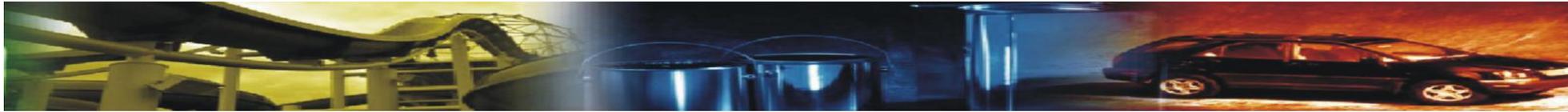


Propriedades Mecânicas: Deformação Elástica



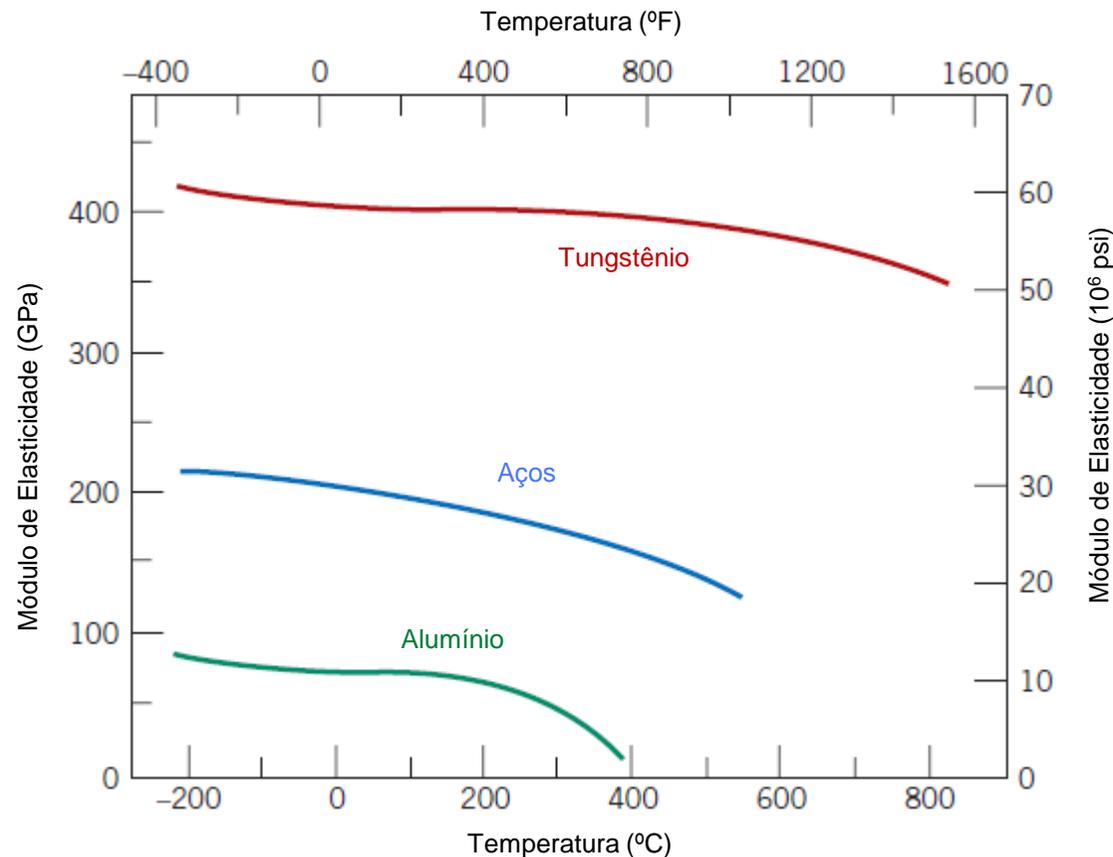
Em escala atômica, a deformação elástica é manifestada como pequenas mudanças no espaçamento atômico ou estiramento das ligações atômicas.





Propriedades Mecânicas: Deformação Elástica

O Módulo de Elasticidade é similar entre Metais e Cerâmicos, sendo significativamente menor para os Polímeros, como consequência dos diferentes tipos de ligação atômica de cada material.





Propriedades Mecânicas: Anelasticidade

Em alguns materiais, existe uma dependência do tempo para o retorno da deformação a zero após a retirada da carga ou da tensão.

Em Metais, este valor é relativamente baixo, entretanto, para os Polímeros, a magnitude deste comportamento é maior e é normalmente chamado de **Comportamento Viscoelástico**.

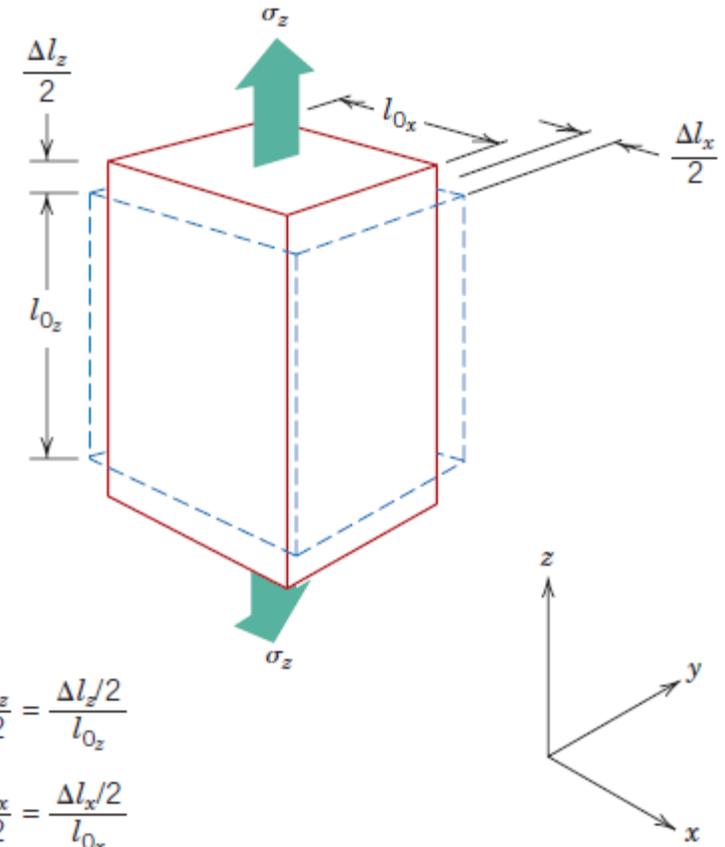


Propriedades Mecânicas

Propriedades Elásticas dos Materiais

Como resultado da aplicação de tensão no eixo z, surgem deformações nos eixos x e y.

A razão de Poisson (ν) é definida como a razão da deformação no eixo x e y em relação a z, conforme segue:

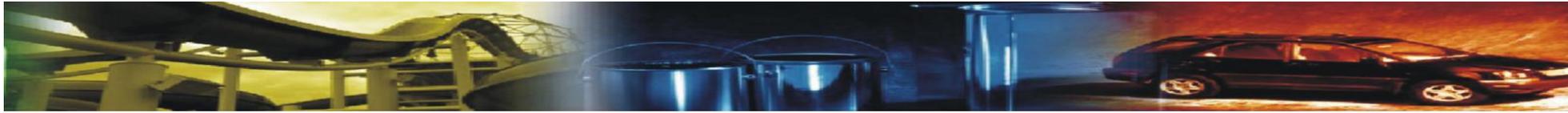


$$\frac{\epsilon_z}{2} = \frac{\Delta l_z / 2}{l_{0z}}$$

$$-\frac{\epsilon_x}{2} = \frac{\Delta l_x / 2}{l_{0x}}$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Metal ou Liga	Módulo de Elasticidade		Razão de Poisson
	GPa	10 ⁶ psi	
Alumínio	69	10	0.33
Latão	97	14	0.34
Cobre	110	16	0.34
Magnésio	45	6.5	0.29
Níquel	207	30	0.31
Aço	207	30	0.30
Titânio	107	15.5	0.34
Tungstênio	407	59	0.28



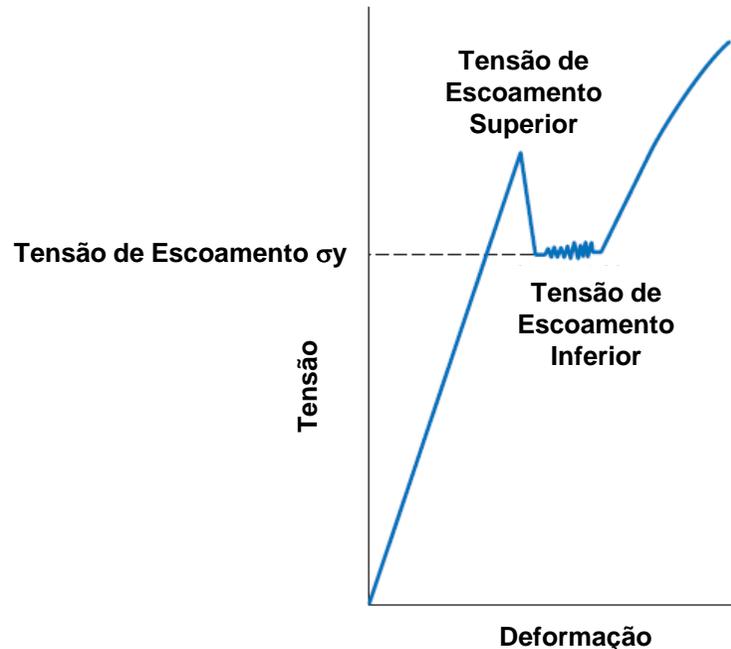
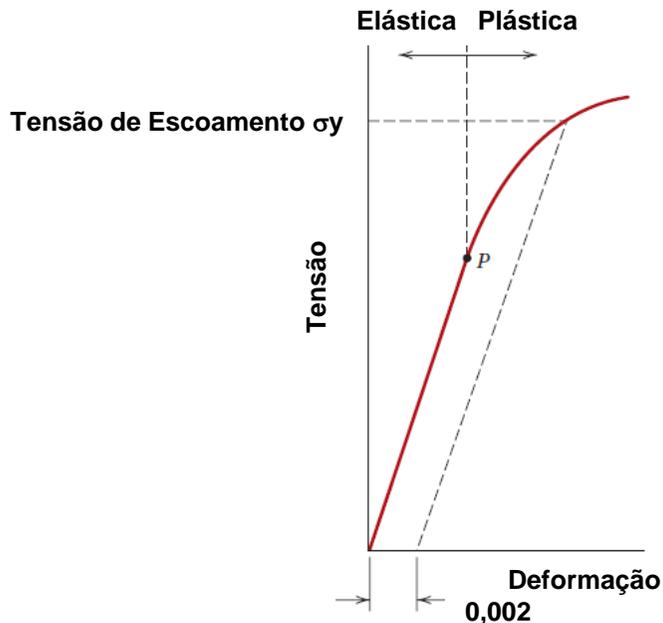
Propriedades Mecânicas

Limite de Escoamento

Os projetos são concebidos para que o componente trabalhe no regime elástico, sob pena de perder as dimensões ou deixar de funcionar adequadamente se deformado plasticamente.

Limite de Proporcionalidade ou
Limite de Escoamento de Engenharia

Limite de Escoamento Nítido

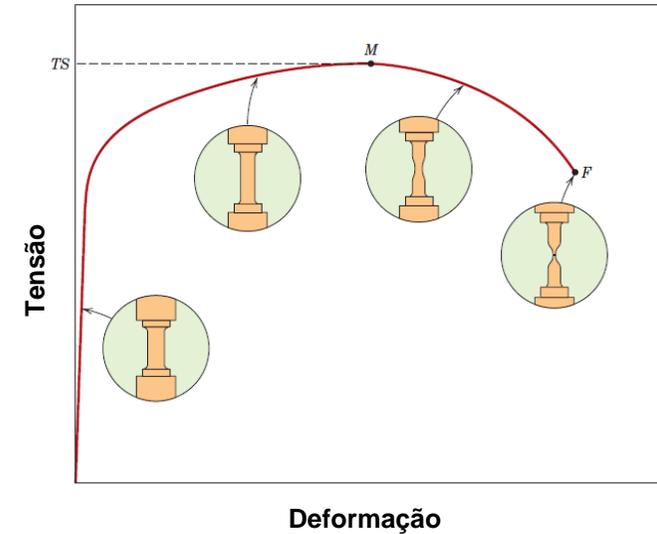




Propriedades Mecânicas: Deformação Plástica dos Materiais

A maioria dos materiais apresenta deformação no regime elástico até cerca de 0,5%.

Quando a tensão promove deformações superiores a este valor, surge um outro modo de deformação, chamado deformação Plástica. Neste regime, o material não retorna à dimensão original quando cessada a tensão.

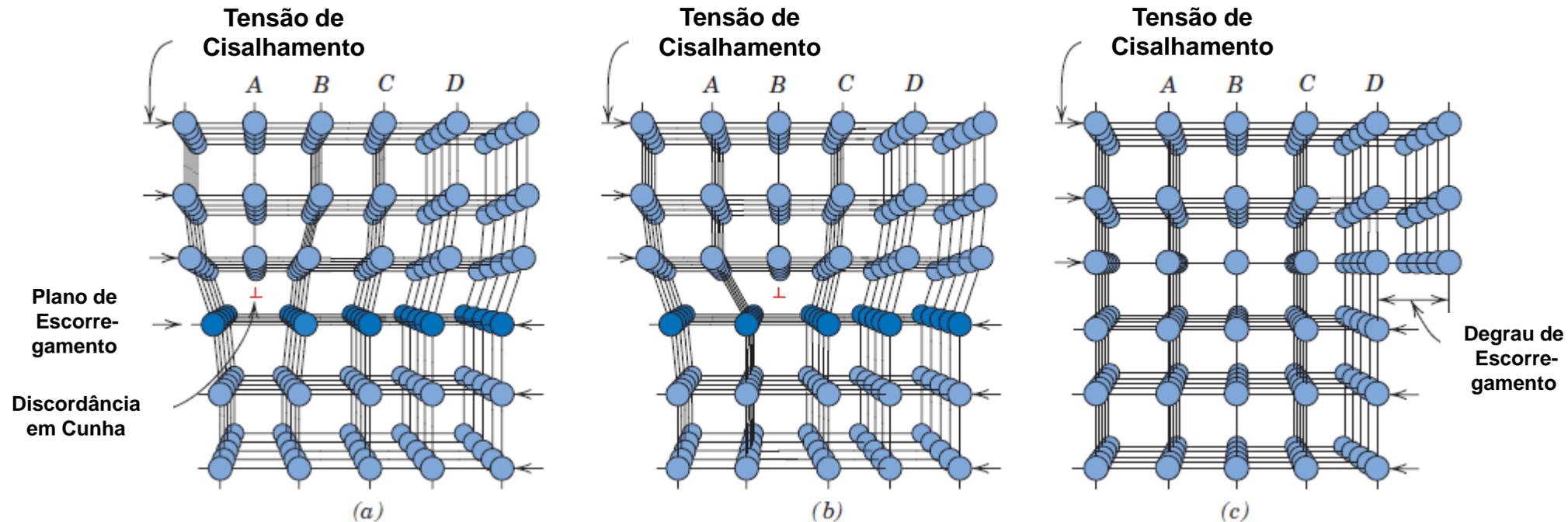
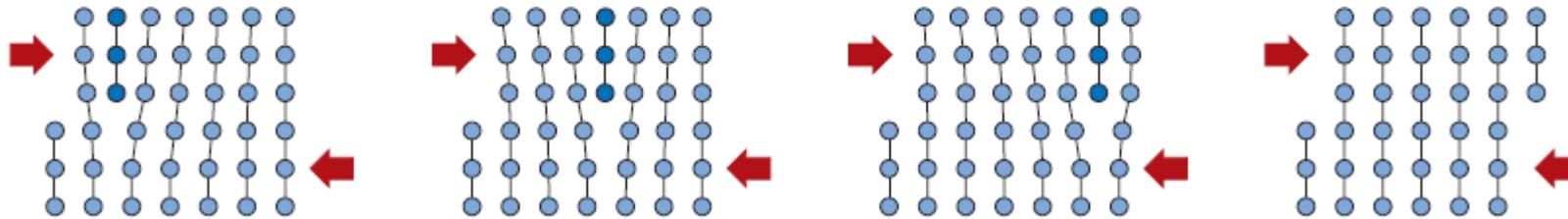


A deformação Plástica envolve a ruptura de ligações atômicas com a formação ou estabelecimento das ligações em regiões diferentes das anteriores no material.

Este processo ocorre pela geração de movimentação de discordâncias.



Deformação Plástica Metais – Movimento de Discordâncias



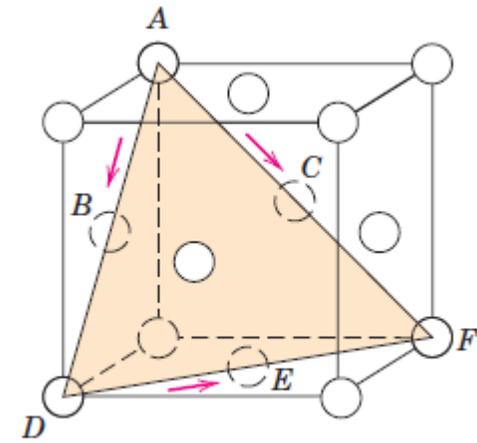


Deformação Plástica Metais – Movimento de Discordâncias

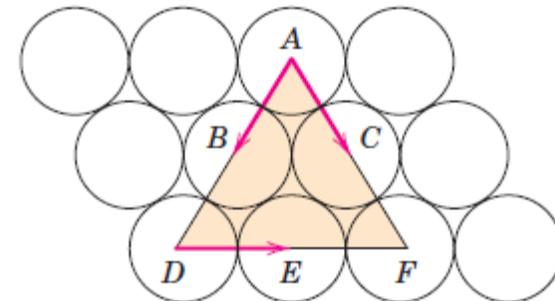
(a) Sistema de Escorregamento $\{111\}$ $[110]$ da estrutura CFC

(b) Plano (111) com as três direções de escorregamento $[110]$

Metais	Plano Escorregamento	Direção Escorregamento	Número de Sistemas Escorregamento
	Cúbica de Face Centrada		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	$\{111\}$	$\langle\bar{1}\bar{1}0\rangle$	12
	Cúbica de Corpo Centrado		
α -Fe, W, Mo	$\{110\}$	$\langle\bar{1}11\rangle$	12
α -Fe, W	$\{211\}$	$\langle\bar{1}11\rangle$	12
α -Fe, K	$\{321\}$	$\langle\bar{1}11\rangle$	24
	Hexagonal Compacto		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	$\{0001\}$	$\langle11\bar{2}0\rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle11\bar{2}0\rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle11\bar{2}0\rangle$	6



(a)



(b)



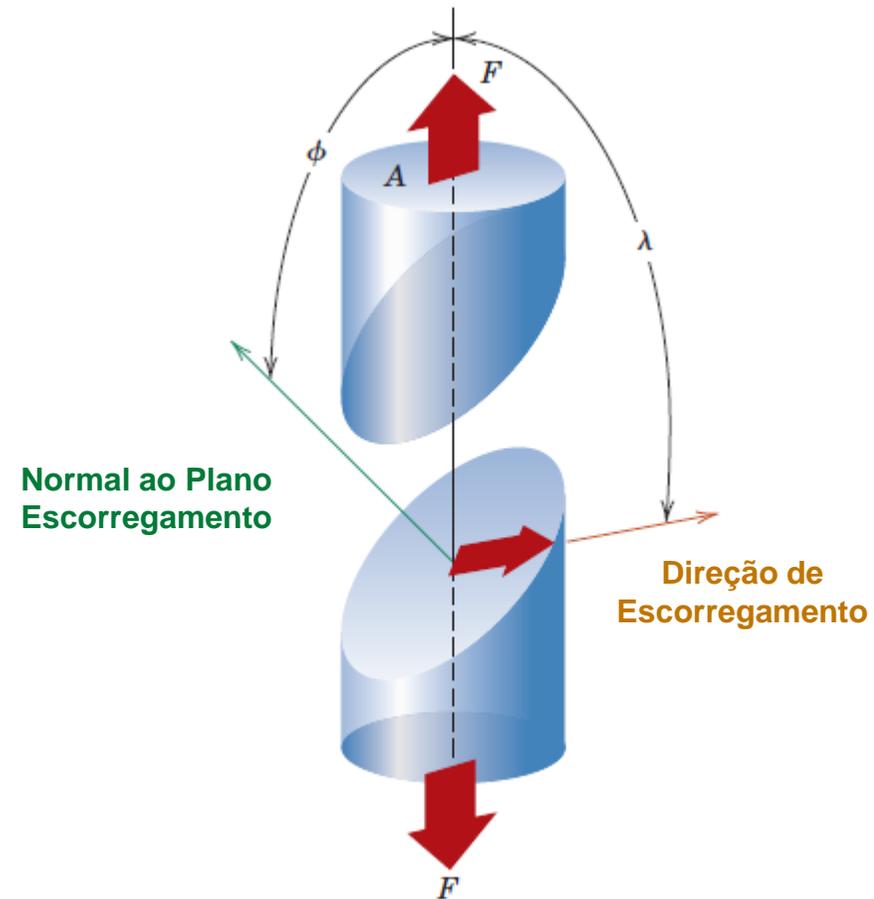
Deformação Plástica Metais - Monocristal

Conforme lei de Schmid, a tensão axial mínima para haver escorregamento ocorre quando :

$$\phi = \lambda = 45^\circ$$

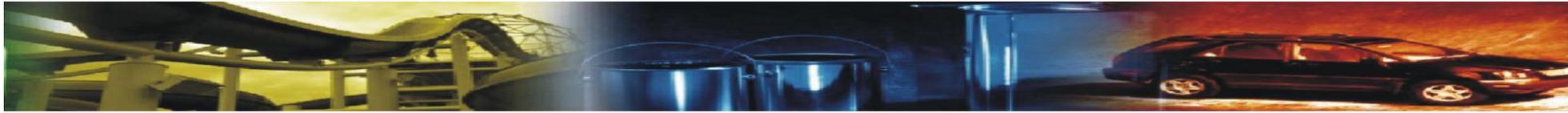
Neste caso, a tensão de cisalhamento crítica τ_R é a metade da tensão axial σ .

A tensão de cisalhamento efetiva é sempre menor que a metade da tensão axial para quaisquer outras orientações.



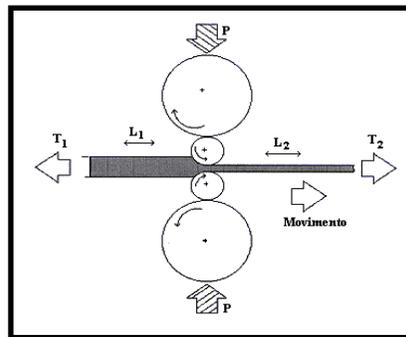
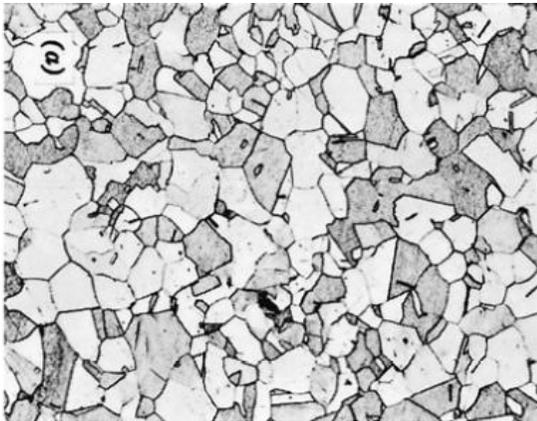
$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

Lei de Schmid



Deformação Plástica - Metais Policristalinos

Em materiais Policristalinos, a movimentação da discordância ocorre ao longo do sistema de escorregamento que possui orientação mais favorável.





Propriedades Mecânicas

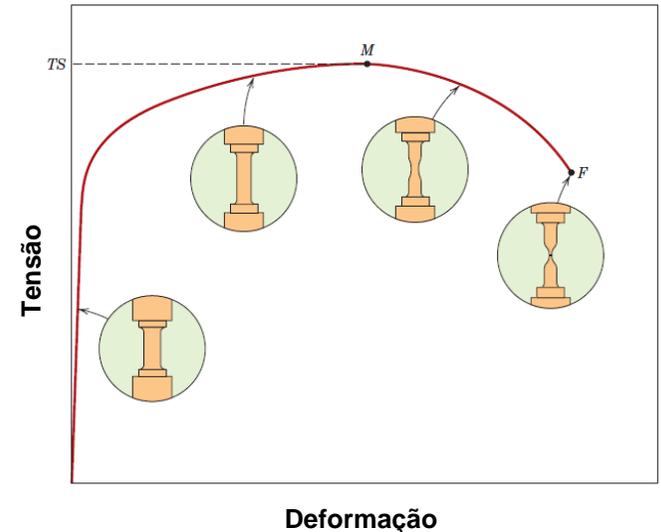
Limite de Resistência à Tração

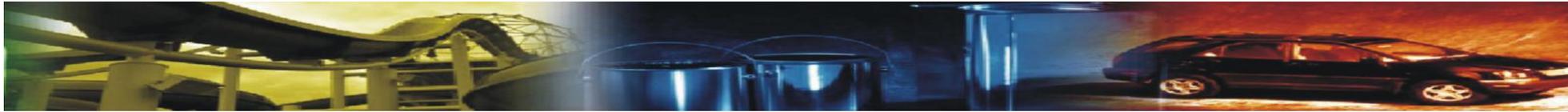
A tensão máxima ou limite de Resistência à tração é a máxima tensão suportada pelo material submetido a ensaio de tração.

A partir do escoamento, o material:

a- se deforma plasticamente até o máximo M da curva (deformação uniforme) com encruamento associado.

b- Entre M e F , a tensão cai, como resultado do coslescimento de microcavidades, o que resulta na estrição do corpo de prova.





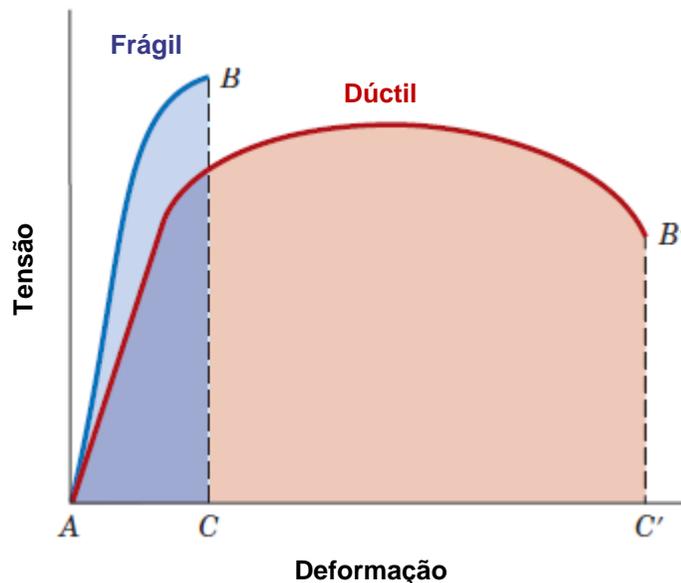
Propriedades Mecânicas: Ductilidade

A ductilidade é uma medida do grau de deformação plástica até a fratura. Os materiais podem ser:

a- **Frágeis**: pequena (<5%) deformação plástica até a fratura.

b- **Dúcteis**: apresentam grande deformação plástica até a fratura.

É uma propriedade importante para referir a deformação até a ruptura e para conhecer a capacidade de deformação plástica em processos.



$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

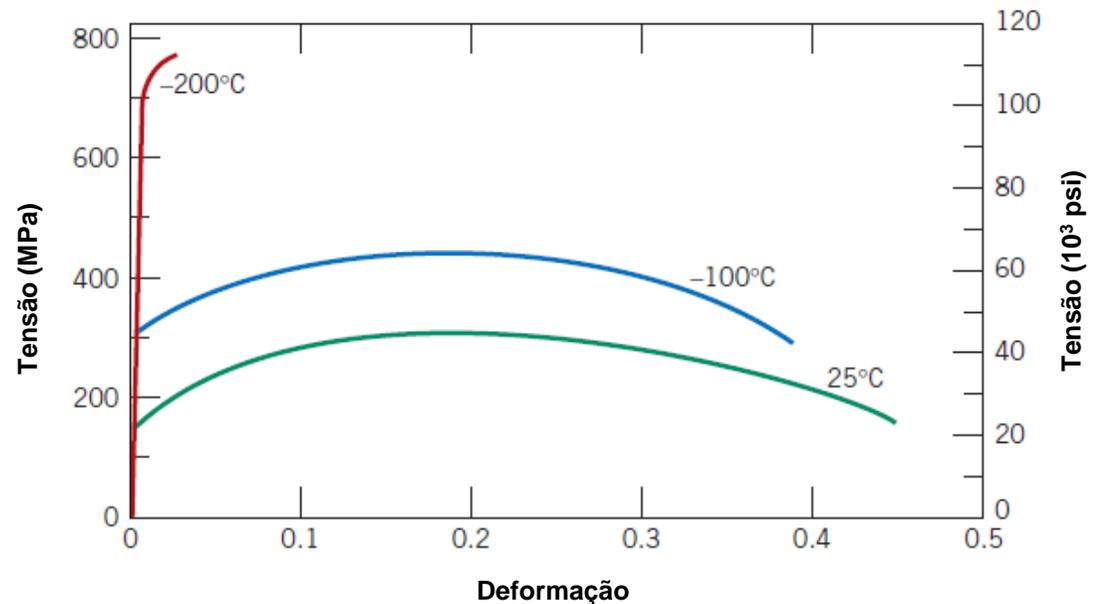
$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$



Propriedades Mecânicas

Liga Metálica	Escoamento MPa (ksi)	Resistência MPa (ksi)	Ductilidade A (%) em 50mm
Alumínio	35 (5)	90 (13)	40
Cobre	69 (10)	200 (29)	45
Latão (70Cu-30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Ferro	130 (19)	262 (38)	45
Níquel	138 (20)	480 (70)	40
Aço (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titânio	450 (65)	520 (75)	25
Molibdênio	565 (82)	655 (95)	35

O limite de escoamento, a resistência mecânica e a ductilidade são sensíveis à temperatura.



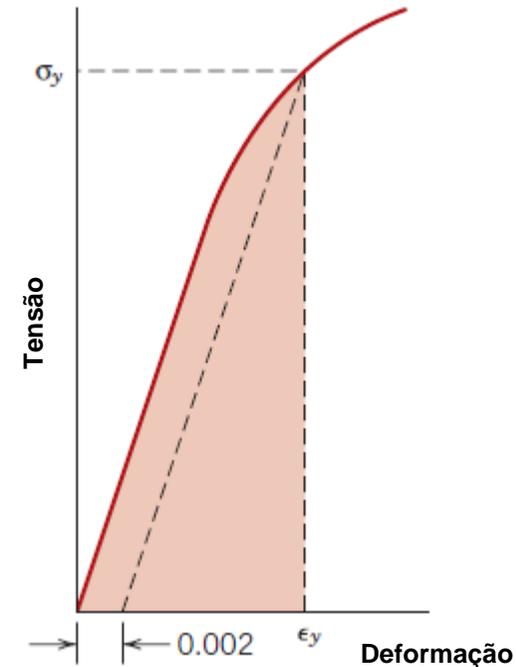


Propriedades Mecânicas

Resiliência

É a capacidade de absorver energia quando deformado elasticamente e, então, devolvê-la no descarregamento. O módulo de resiliência é dado por U_r

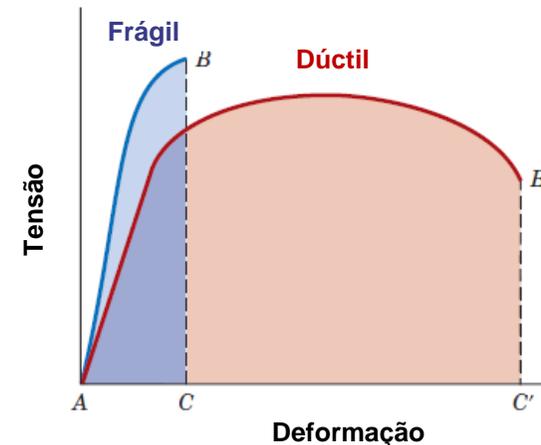
$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

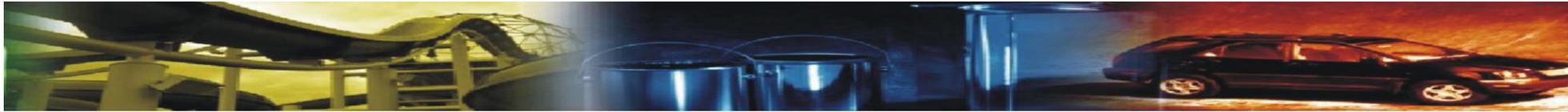


Tenacidade

É a capacidade do material de absorver energia até a fratura. Um material tenaz precisa ser resistente e dúctil.

É uma medida da área abaixo da curva tensão-deformação.



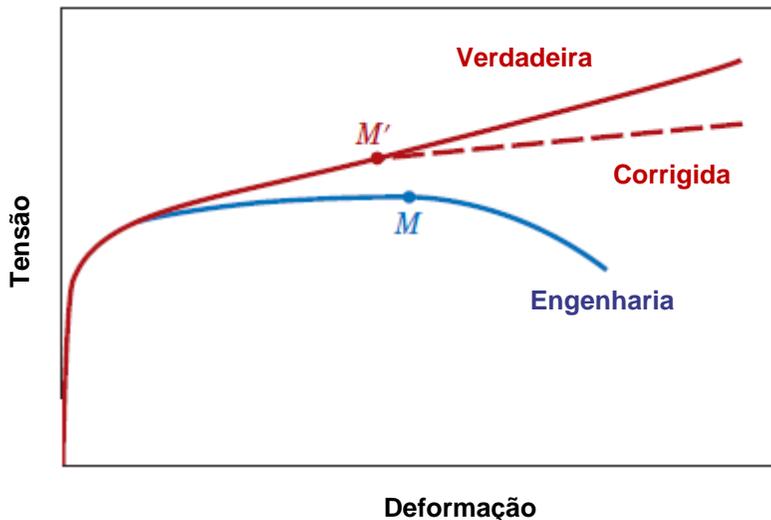


Propriedades Mecânicas

Curva Tensão-Deformação Verdadeira

A curva tensão-deformação verdadeira considera a área instantânea da seção ao invés da área inicial do corpos de prova.

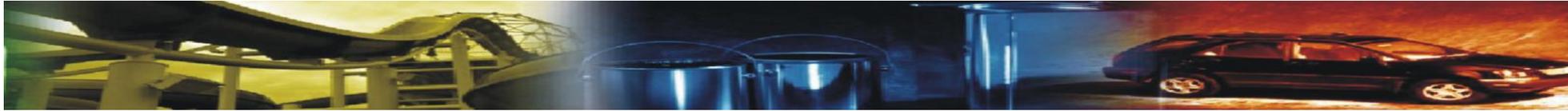
Para a região de estricção, surgem componentes de tensão adicionais à tensão axial, de forma que surge a curva de tensão verdadeira corrigida:



$$\sigma_T = \frac{F}{A_i}$$

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n$$

$$\epsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_0}$$



Propriedades Mecânicas

Curva Tensão-Deformação Verdadeira

Onde n é o expoente de encruamento, dependente de cada material e K também é uma constante.

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n$$

Material	n	K	
		MPa	psi
Aço Baixo Carbono (Recozido)	0.21	600	87,000
Aço Liga 4340 Temperado e Revenido a 315°C)	0.12	2650	385,000
Aço Inoxidável 304 (Recozido)	0.44	1400	205,000
Cobre (Recozido)	0.44	530	76,500
Latão Naval (Recozido)	0.21	585	85,000
Liga Alumínio 2024 (Trat. Térm. T3)	0.17	780	113,000
Liga Magnésio AZ-31B (Recozida)	0.16	450	66,000



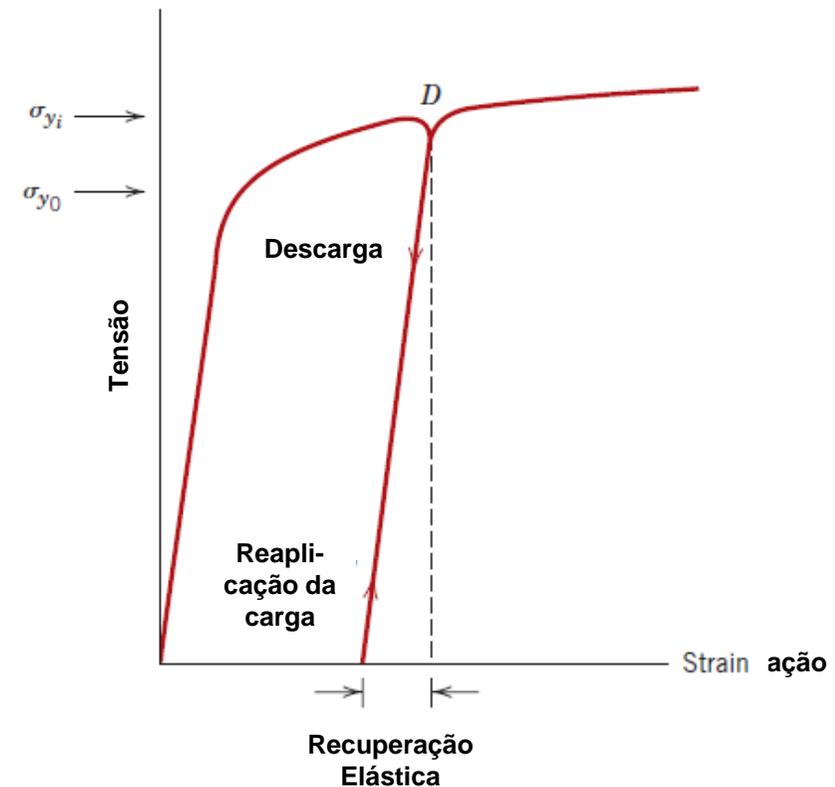
Propriedades Mecânicas

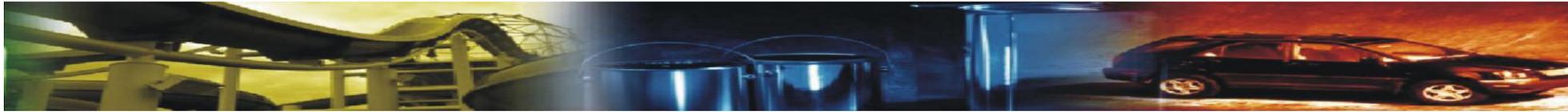
Recuperação Elástica após Deformação Plástica

Quando a deformação plástica é cessada, ocorre uma recuperação da deformação referente ao comportamento elástico. Esta recuperação é particularmente importante para processos de conformação mecânica a frio.

Outro efeito importante da deformação plástica está relacionado ao novo limite de escoamento que o material apresenta após ter sido deformado plasticamente.

O novo Limite de Escoamento é maior que o original, sem deformação plástica associada.





Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

Se:

Deformação Plástica → Movimento de Discordâncias

Elevar a Resistência Mecânica → Dificultar Movimento de Discordâncias

Elevar a Ductilidade → Facilitar Movimento de Discordâncias



Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

Mecanismos Disponíveis:

a- Encruamento

b- Refinamento de Grão

c- Soluções Sólidas

d- Segunda Fase

e- Transformações de Fase



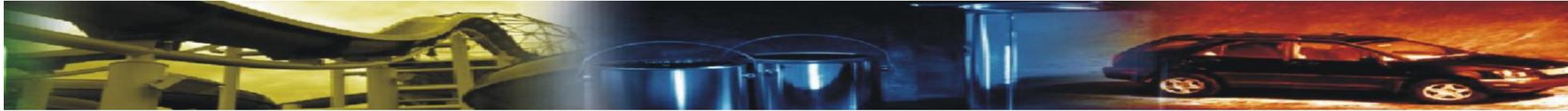
Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

a- Encruamento – Endurecimento por deformação a frio. A resistência à movimentação de discordâncias se eleva como resultado do aumento da densidade de discordâncias no material.

Trabalho a Frio ($T < T_{rec.}$) x Trabalho a Quente ($T > T_{rec.}$)

$$T_{recristalização} \sim (0,3 - 0,5) T_{fusão} (K)$$

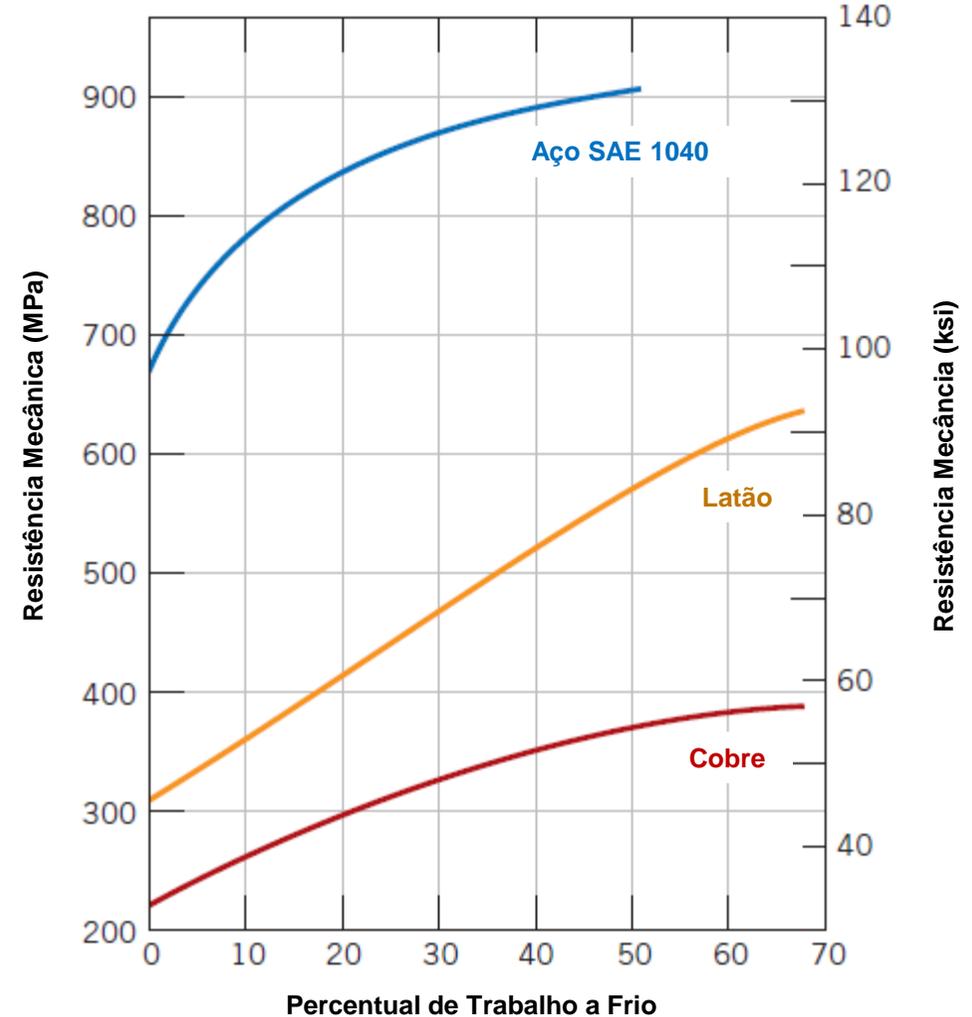
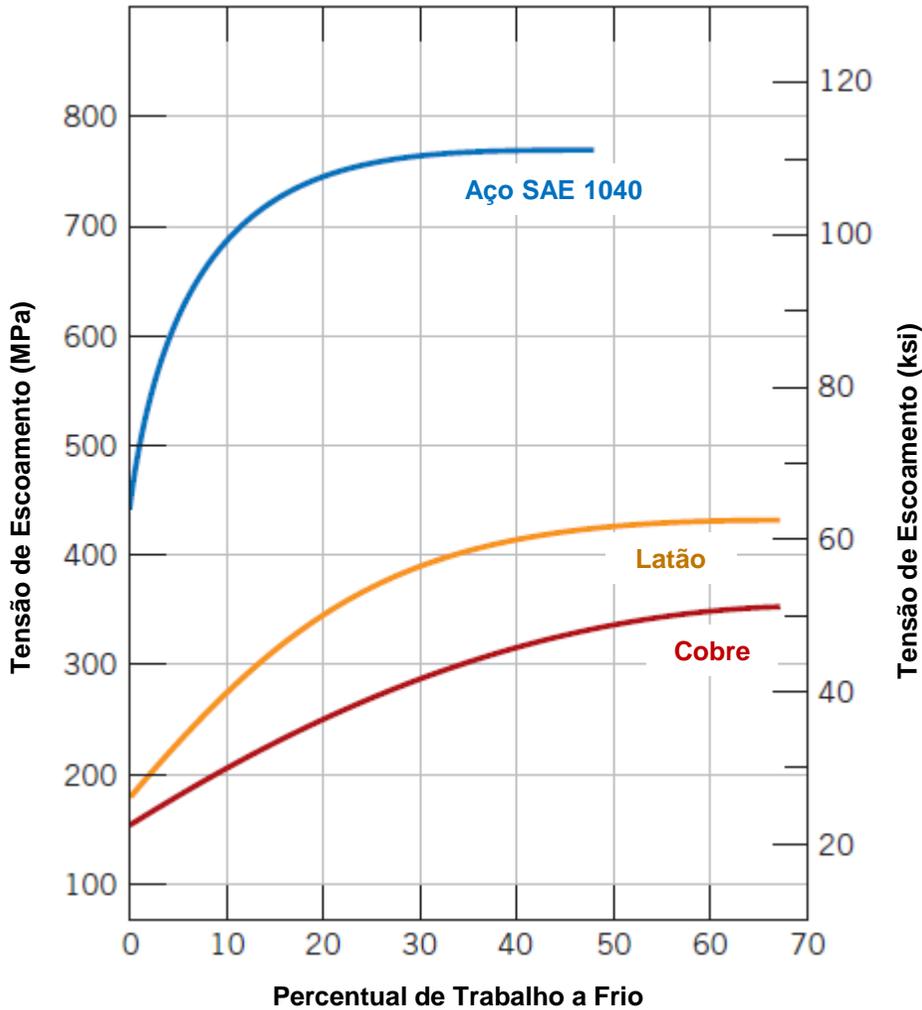
Metal	Temperatura de Recristalização		Temperatura de Fusão	
	°C	°F	°C	°F
Chumbo	-4	25	327	620
Estanho	-4	25	232	450
Zinco	10	50	420	788
Alumínio (99,999%)	80	176	660	1220
Cobre (99,999%)	120	250	1085	1985
Latão (60Cu – 40Zn)	475	887	900	1652
Níquel (99,99%)	370	700	1455	2651
Ferro	450	840	1538	2800
Tungstênio	1200	2200	3410	6170



Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

a- Encruamento - Trabalho a Frio:

$$\% CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

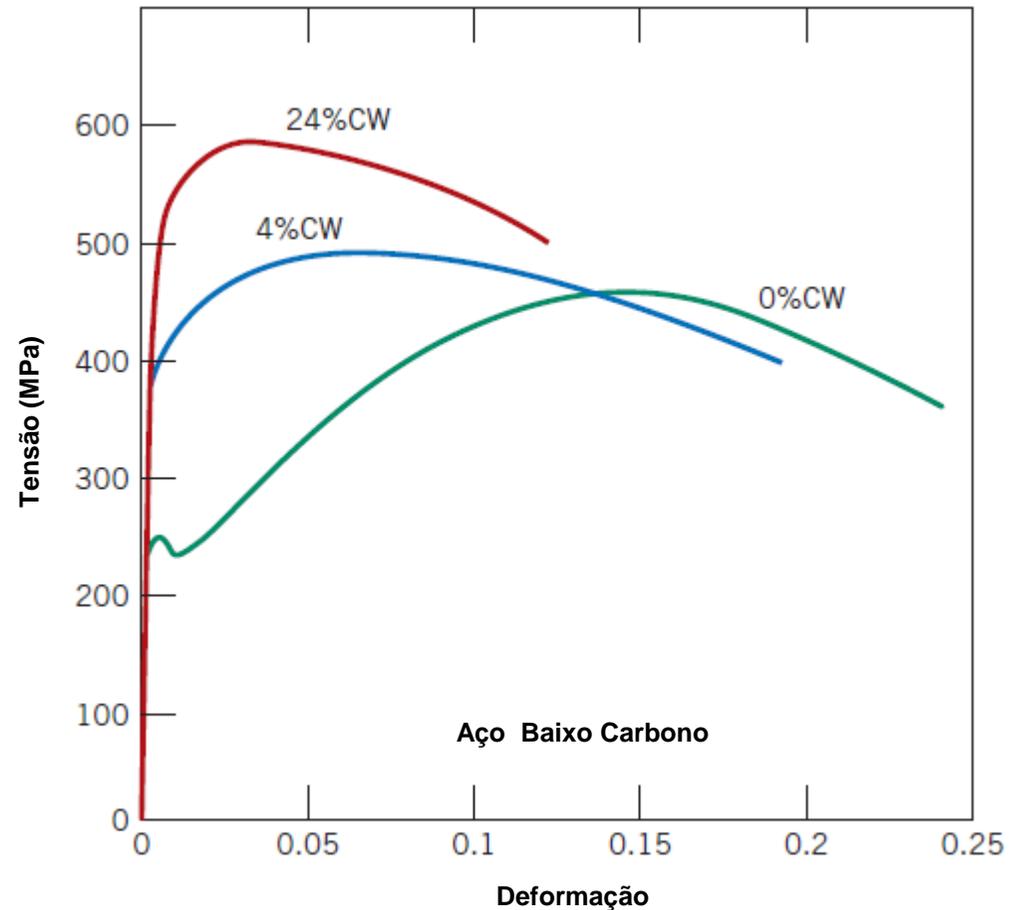
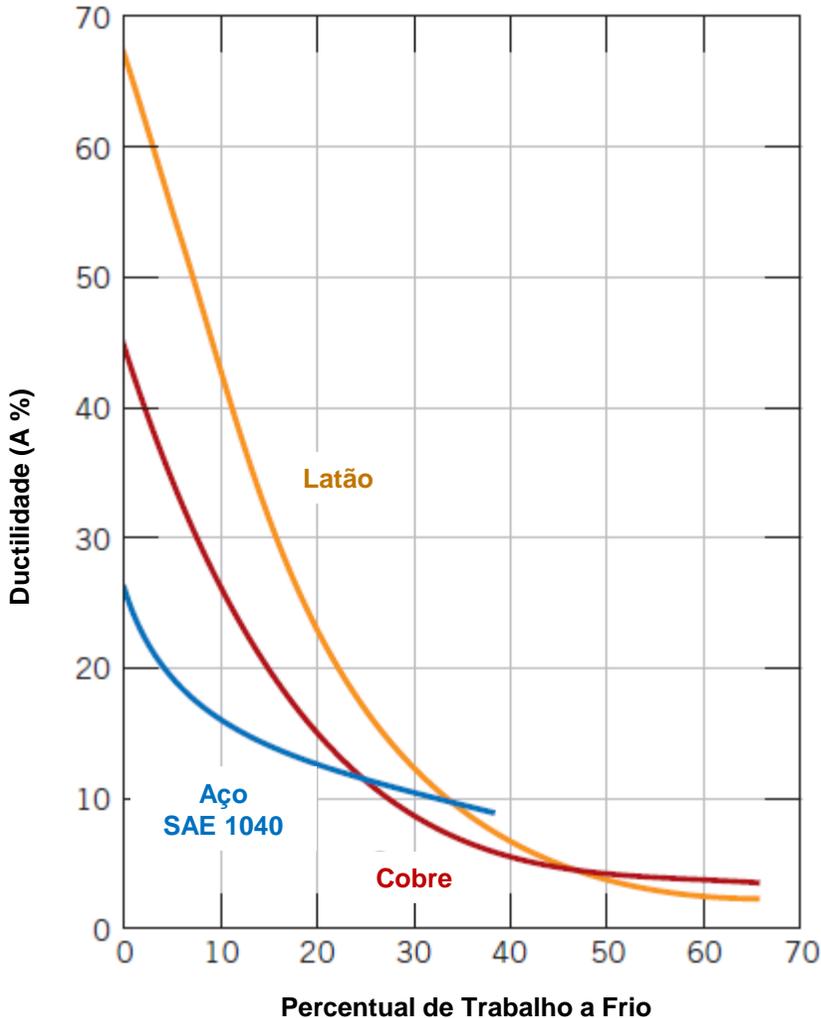




Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

a- Encruamento - Trabalho a Frio:

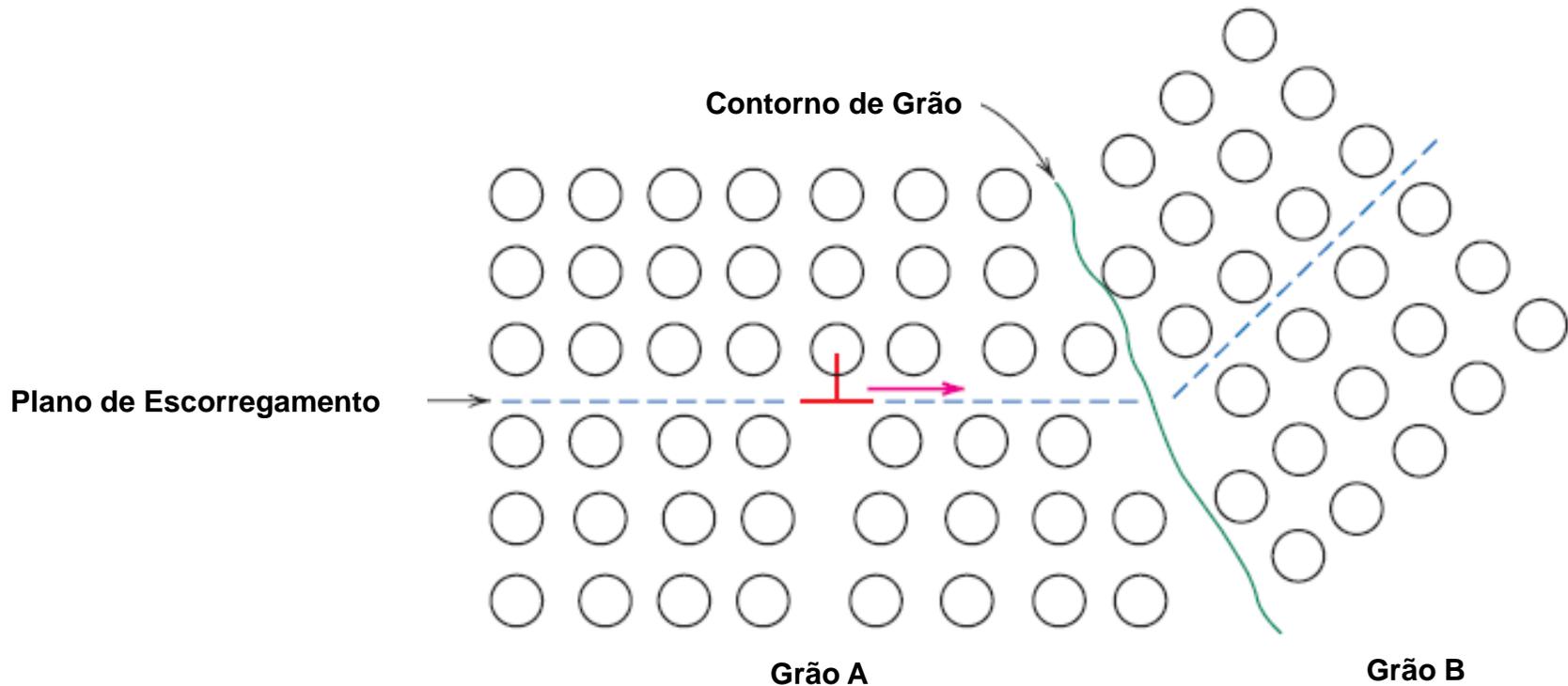
$$\% \text{CW} = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$





Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

b- Refinamento de Grão: Os contornos de grão são locais de bloqueio ao movimento de discordâncias, já que os dois grãos tem diferentes orientações e dificilmente a discordância encontrará um plano para seguir o escorregamento.

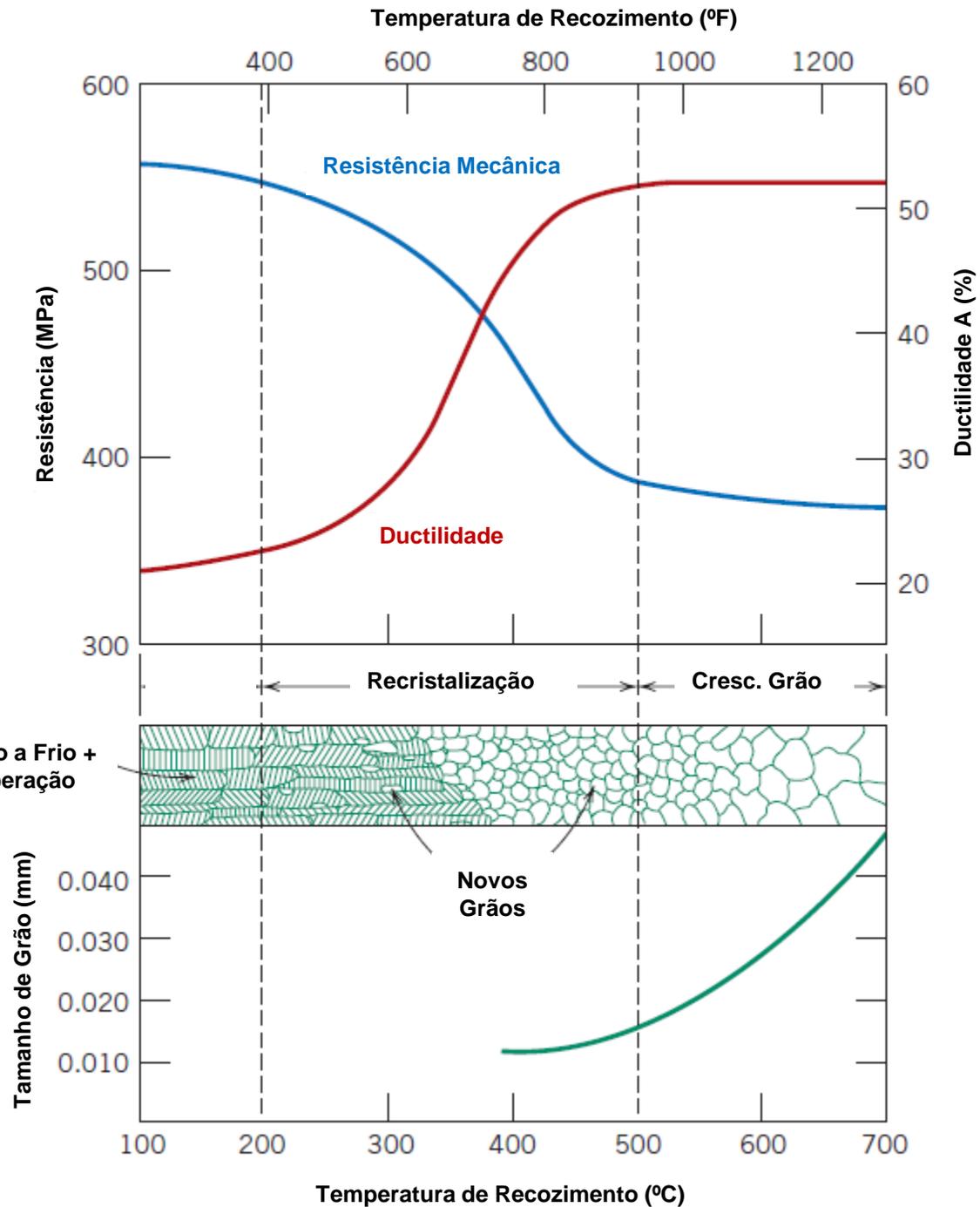
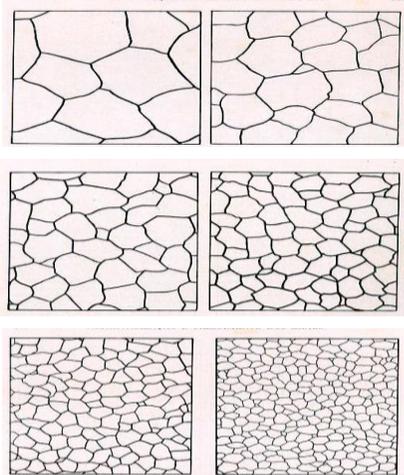




b- Refinamento de Grão:

Equação de Hall-Petch:

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





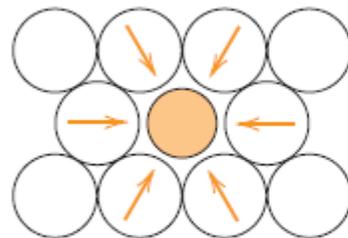
Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

c- Solução Sólida: A adição de elementos de liga visando a formação de soluções sólidas (substitucionais ou intersticiais) é outra forma de elevar a resistência de metais.

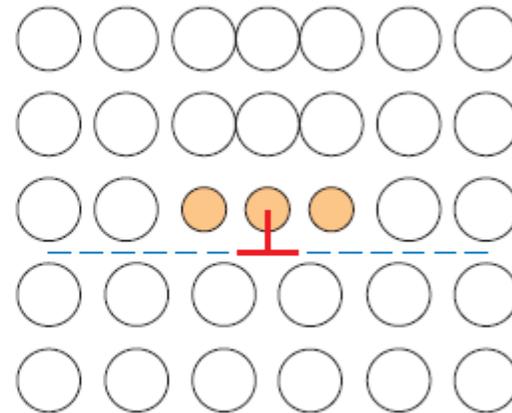
O Metal Puro é sempre menos resistente que a liga correspondente.

(a) Átomo substitucional de menor tamanho.

(b) Possíveis locais do átomo em relação à discordância.



(a)



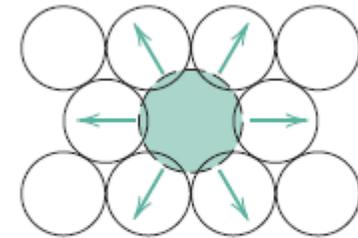
(b)



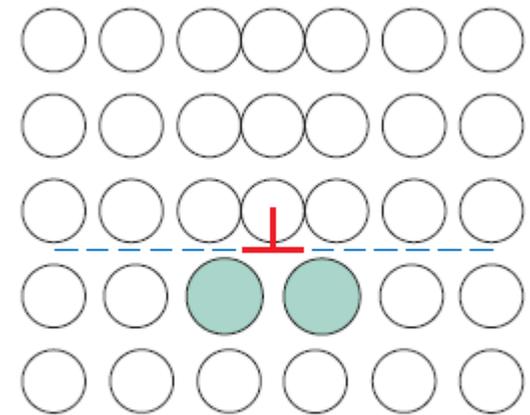
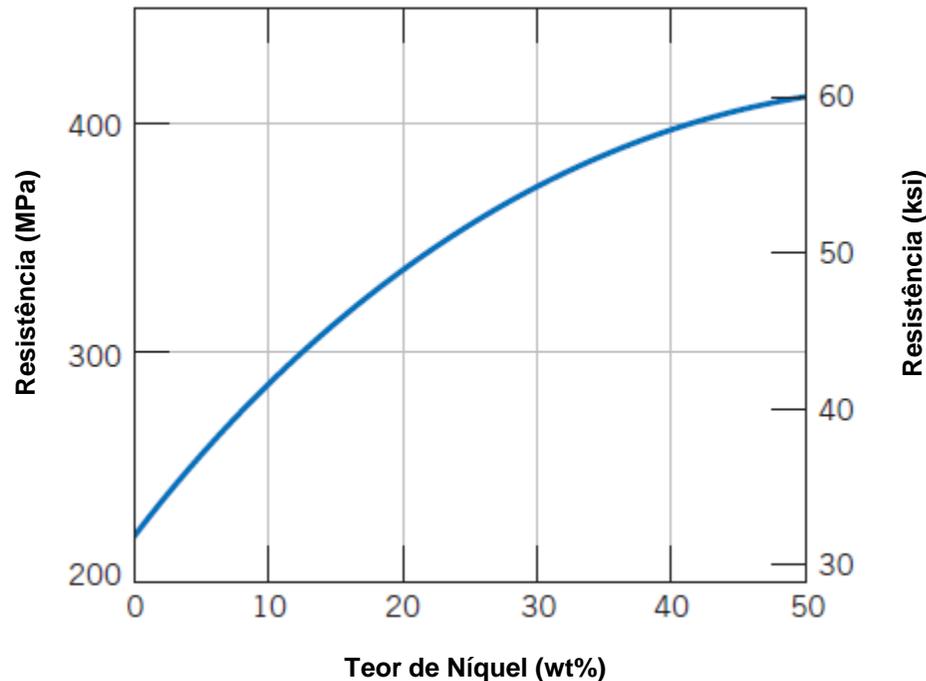
Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

c- Solução Sólida

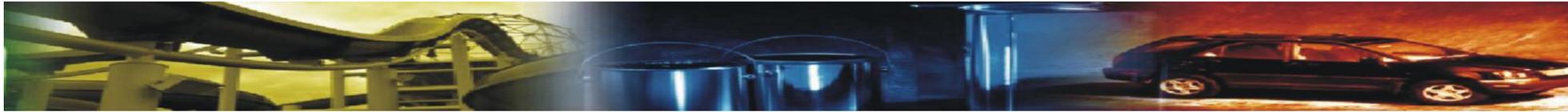
- (a) Átomo substitucional de maior tamanho.
- (b) Possíveis locais do átomo em relação à discordância.



(a)

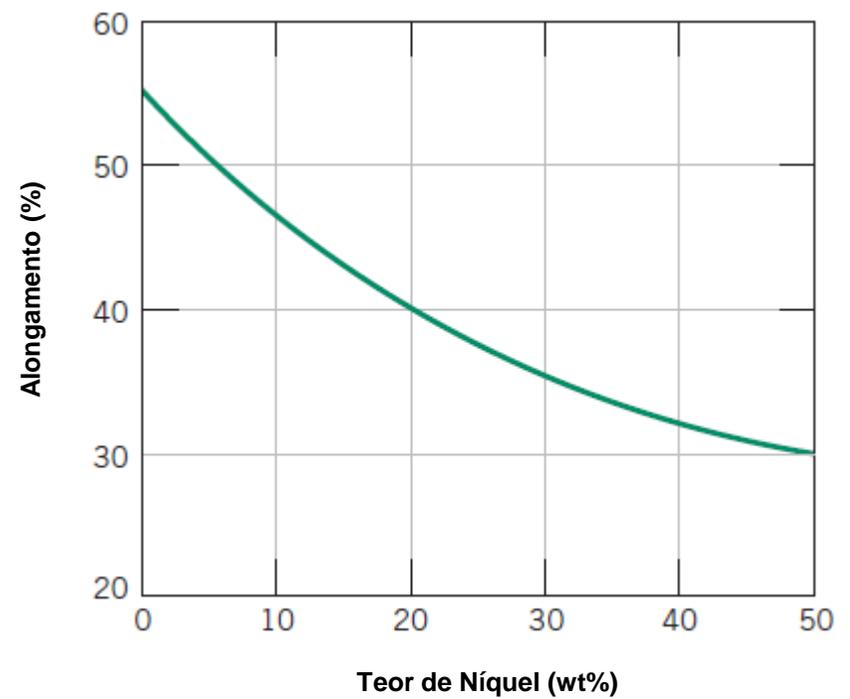
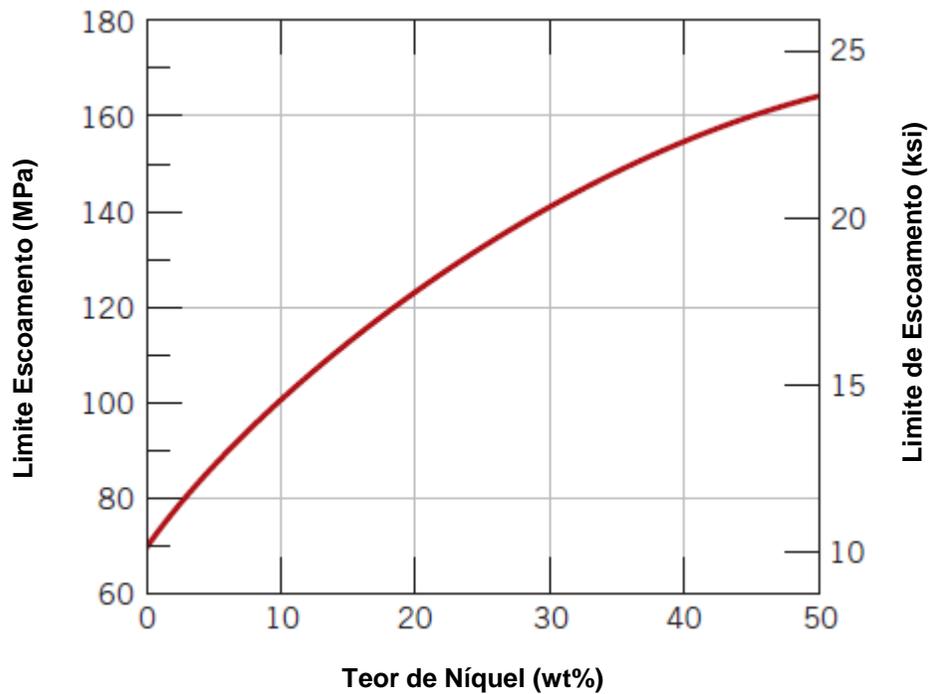


(b)



Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

c- Solução Sólida



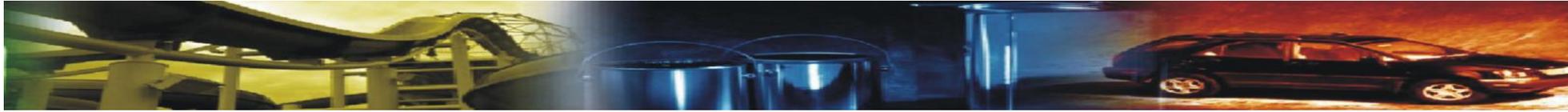


Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

d- Segunda Fase: A segunda fase surge quando o limite de solubilidade é ultrapassado. Diversos fatores influem nas propriedades desenvolvidas por segunda fase nos metais, como:

- Natureza da segunda fase,**
- Estrutura cristalina,**
- Tamanho, forma, distribuição.**

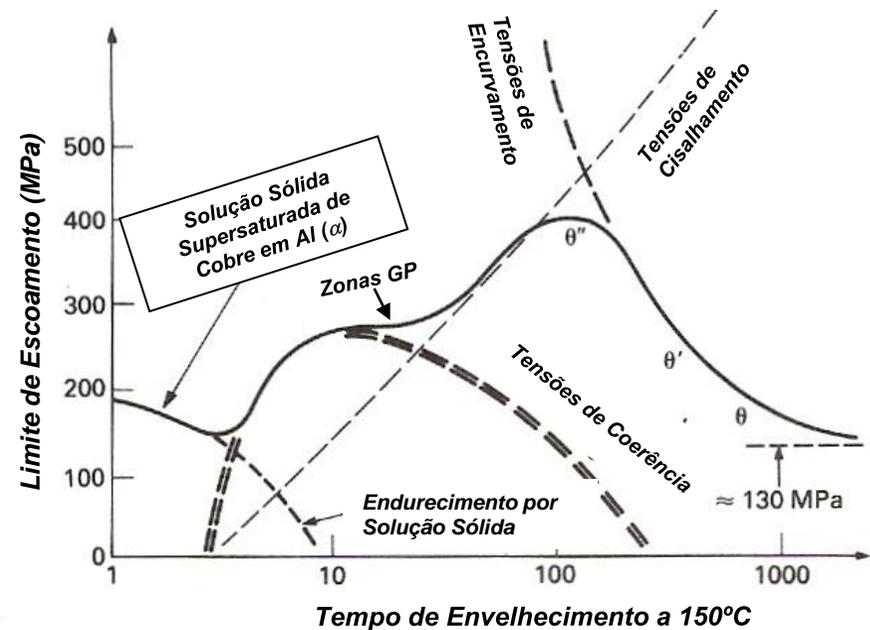
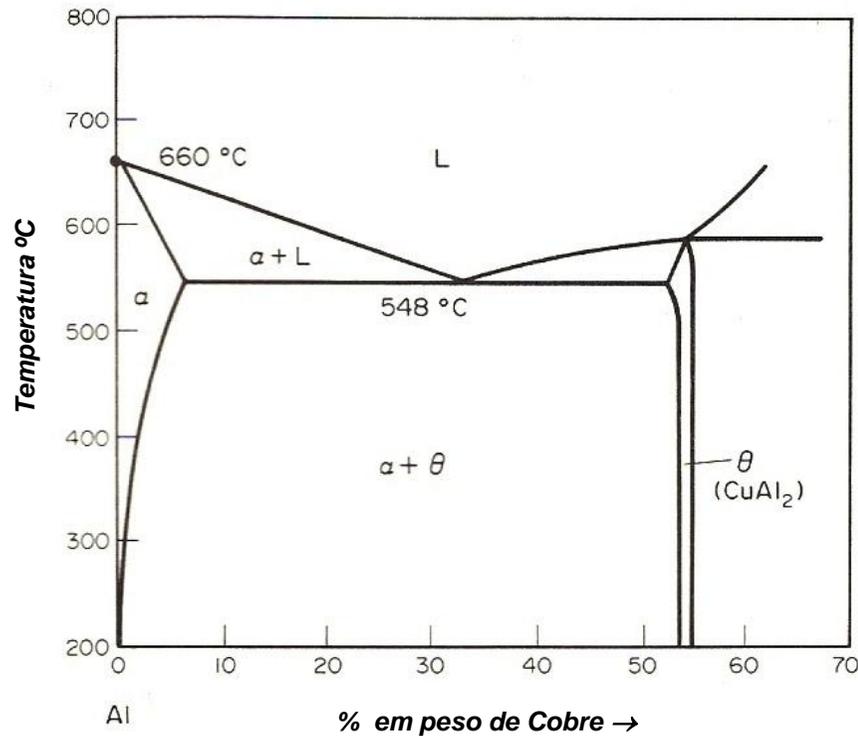
Uma segunda fase (partícula dispersa) numa liga metálica atua como obstáculo ao livre movimento das discordâncias, resultando na alteração da resistência mecânica e da Ductilidade.

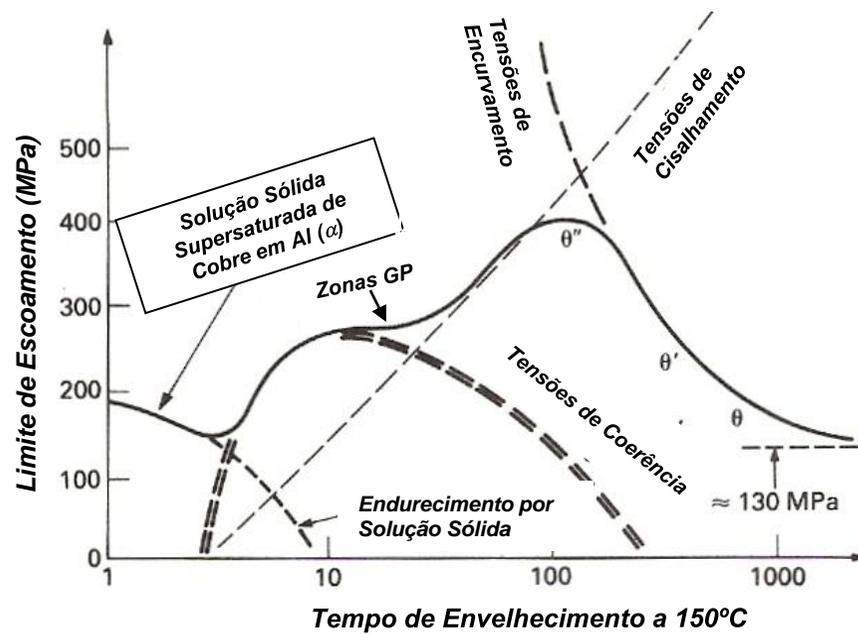
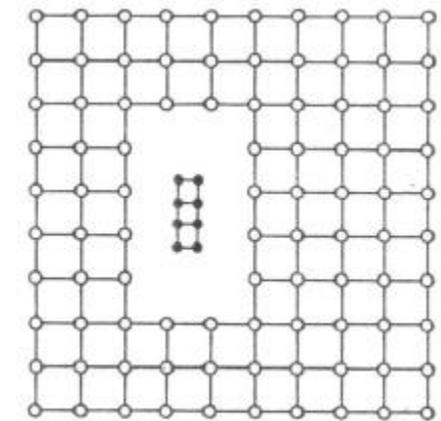
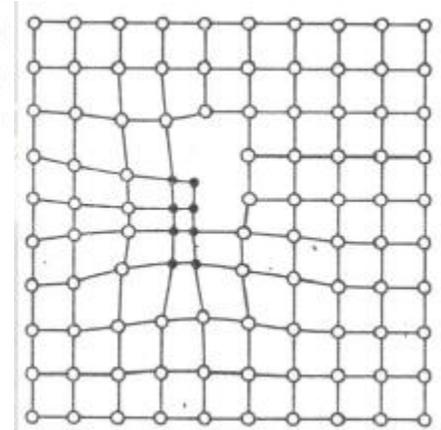
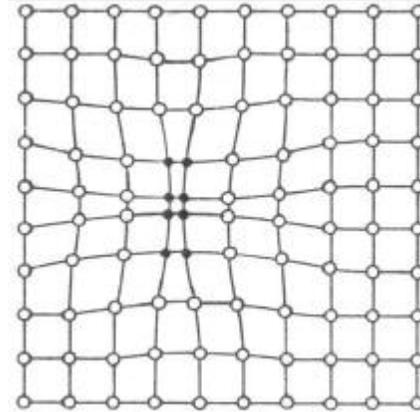
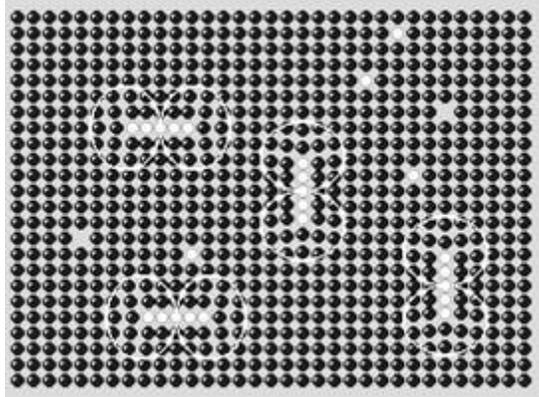
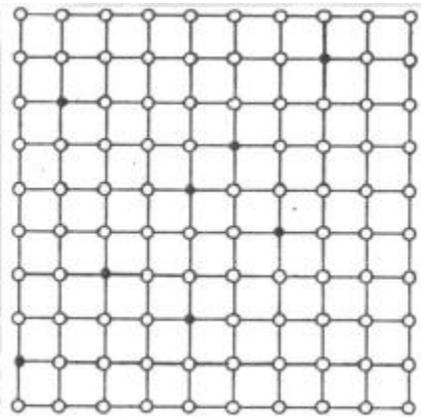
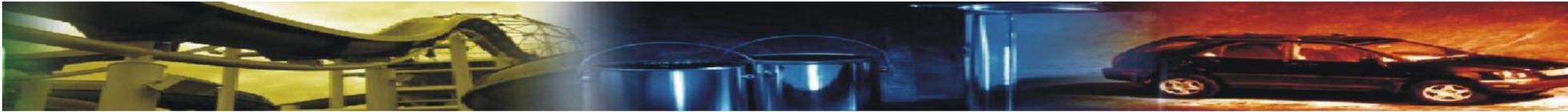


Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

d- Segunda Fase:

A segunda fase endurecedora das ligas Al-Cu é CuAl_2 (θ)

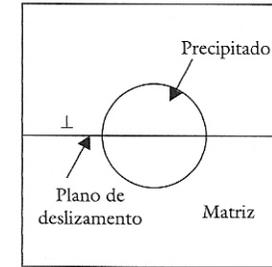
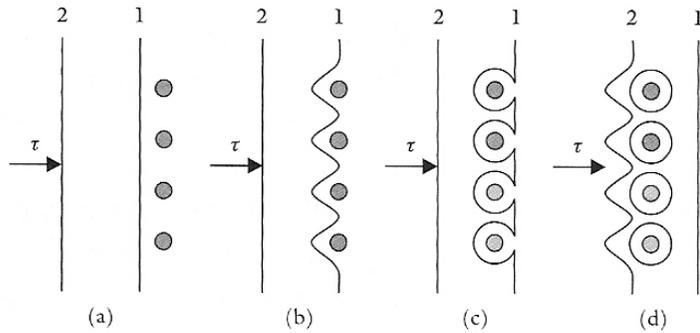




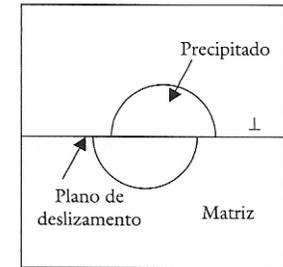


Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

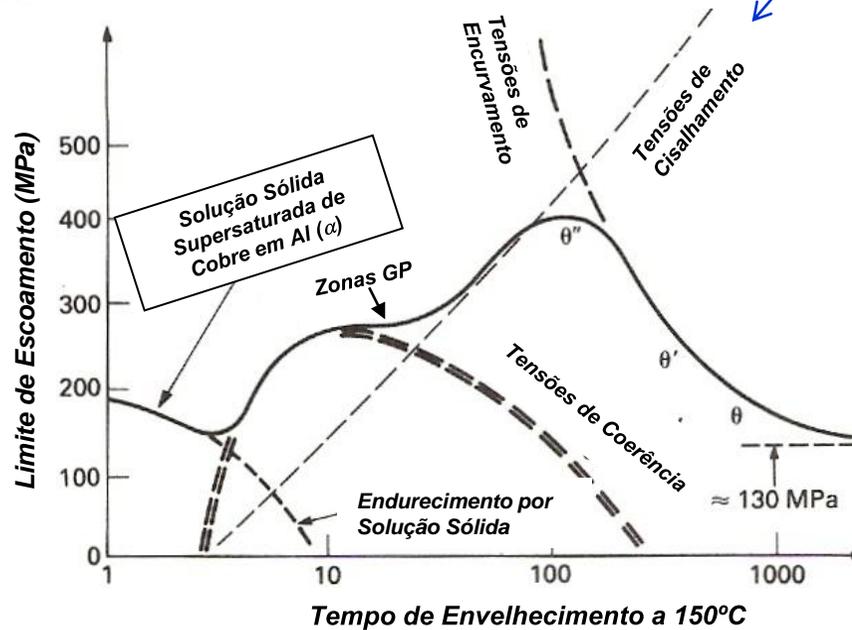
d- Segunda Fase:



(a)



(b)

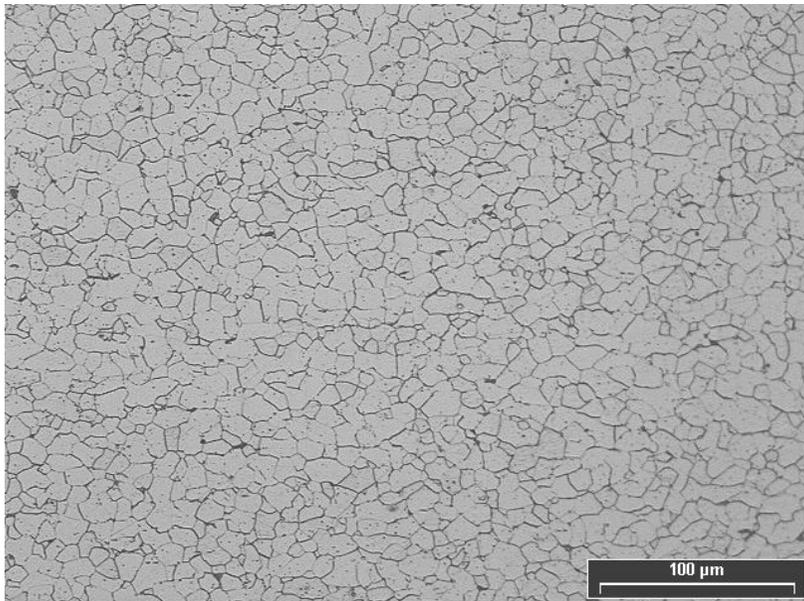




COMBINAÇÃO DOS MECANISMOS DE ENDURECIMENTO

(Solução Sólida + Refino de grão ferrítico + Precipitação ou Segunda Fase)

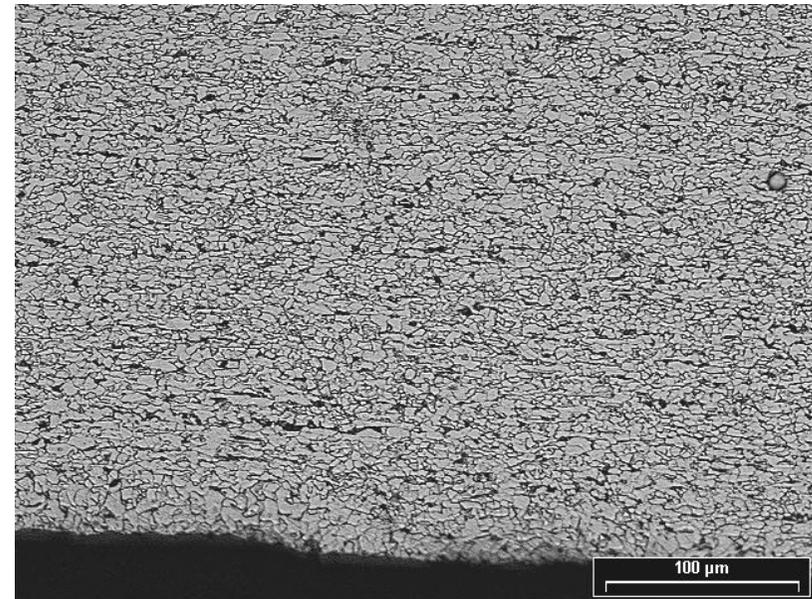
Aço CCT250
L.E. = 180 a 250 MPa



C- 0,06 %p máx.
Mn- 0,35 %p máx

200 x

Aço LNE50
L.E. = 500 a 620 MPa



C- 0,11 %p máx.
Mn- 1,50 %p máx.
Si- 0,35 %p máx.

Ti- 0,05 %p máx.
Nb- 0,05 %p máx.

200 x



Mecanismos de Endurecimento em Metais e Ligas Metálicas

e- Transformações de Fase: As Transformações de Fase são a última possibilidade de alteração nas propriedades dos metais ou ligas metálicas. Podem afetar de forma significativa:

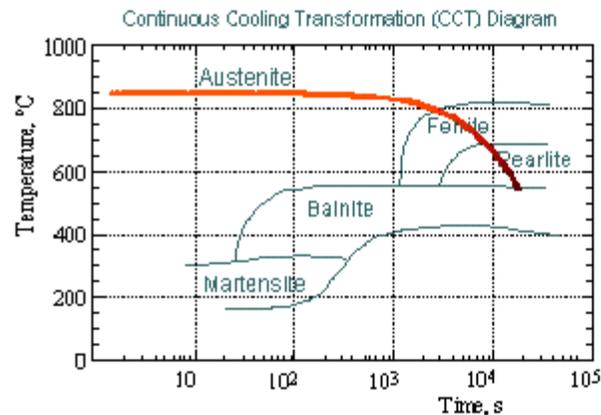
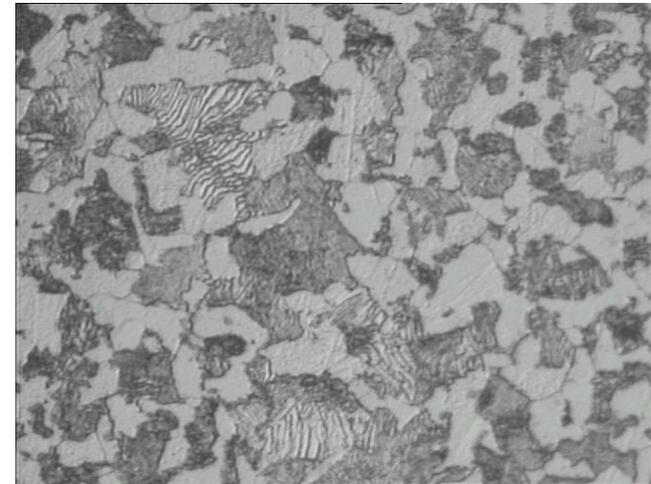
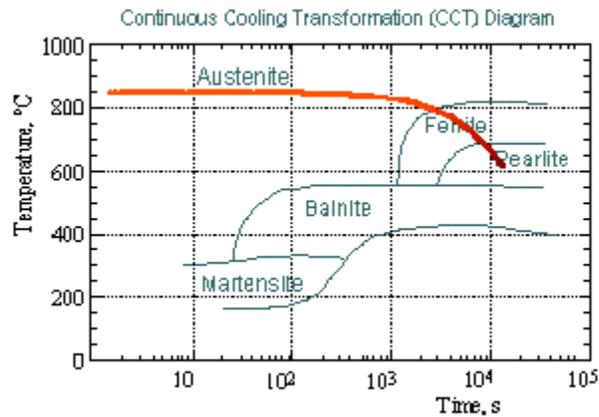
- As soluções sólidas,**
- A morfologia e distribuição da segunda fase,**
- Em casos especiais, podem levar à mudança na estrutura cristalina com drástica mudança nas propriedades (Aços).**

Neste último, a formação de diferente estrutura cristalina altera os sistemas de deslizamento, resultando em elevação na resistência mecânica.



e- Transformações de Fase:

Diagramas de resfriamento contínuo



COMPOSIÇÃO QUÍMICA

C – 0,40 %-p
Mn – 1,50 %-p

Durezas:

Perlita fina:

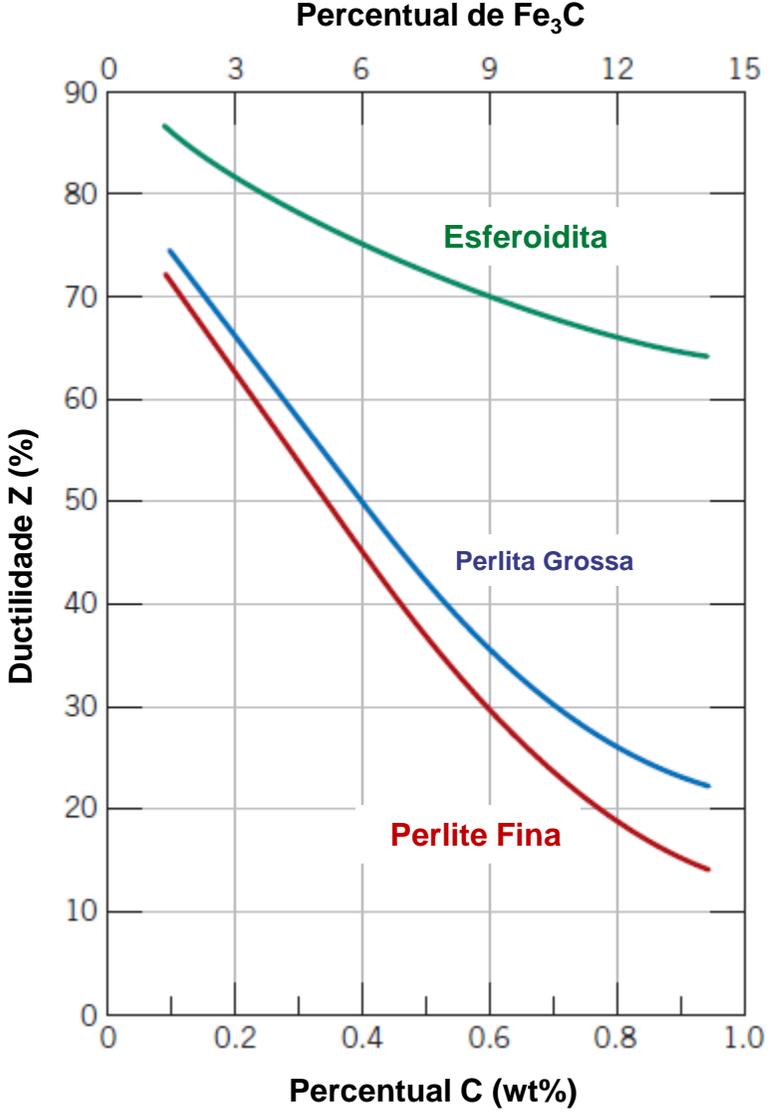
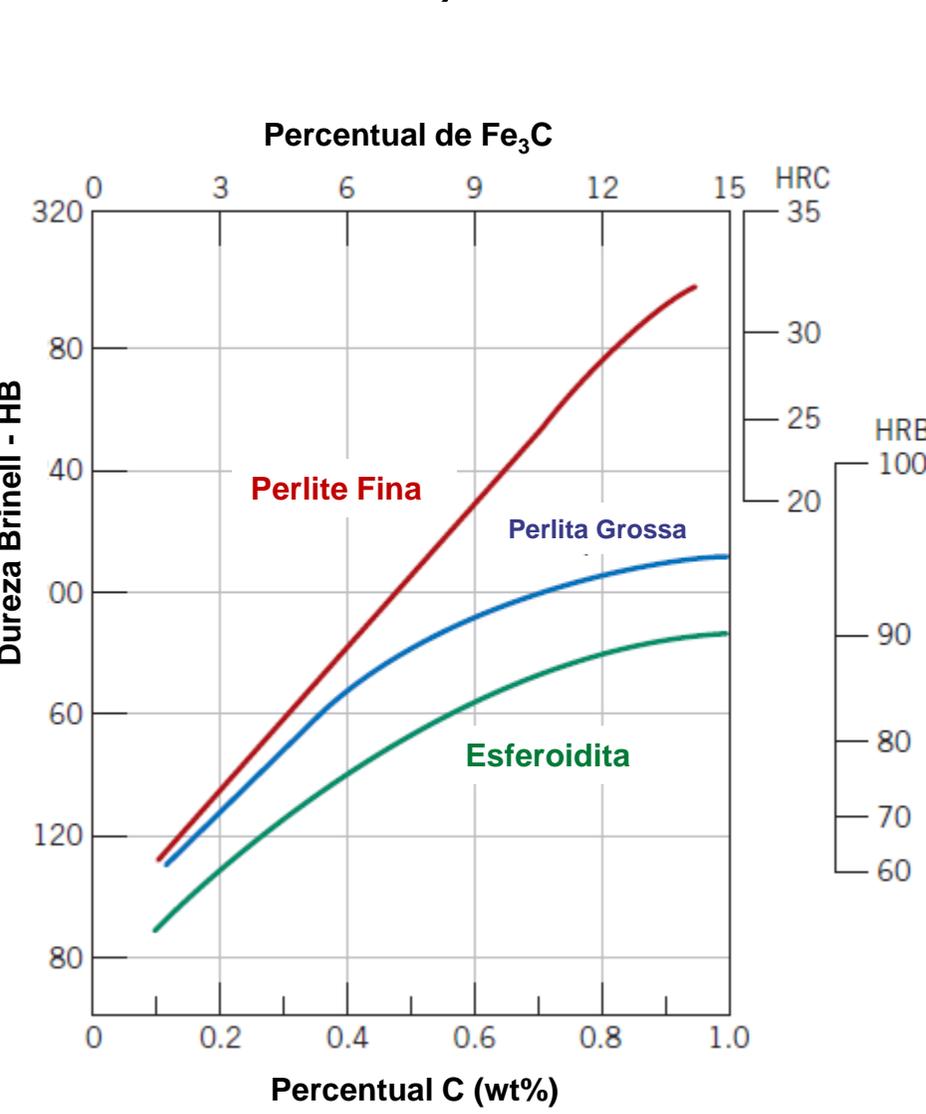
20-30 HRC

Perlita grossa:

86-97 HRB



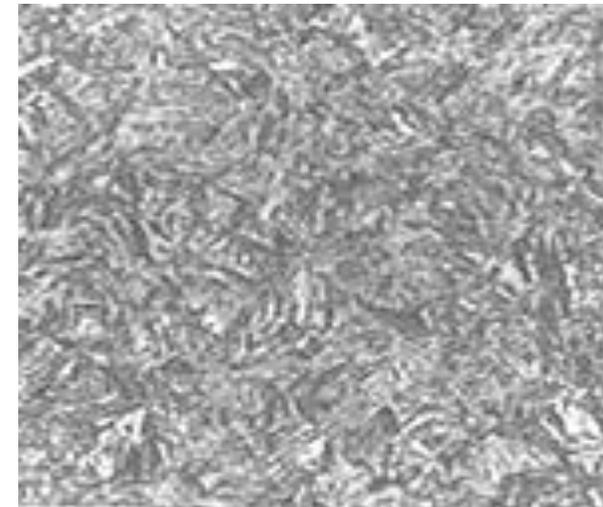
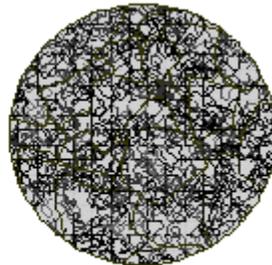
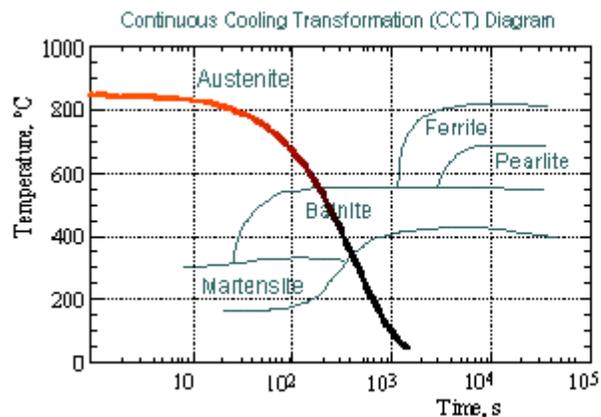
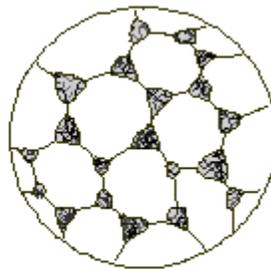
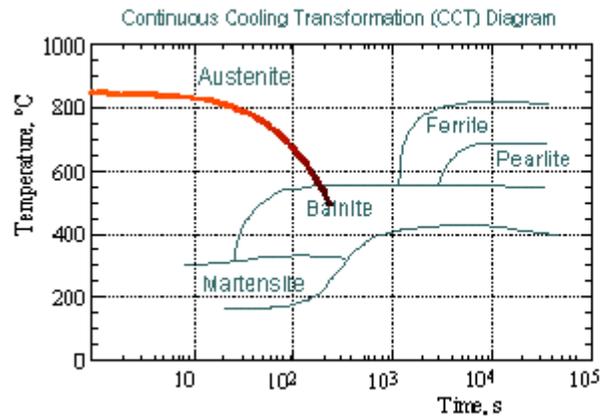
e- Transformações de Fase:





e- Transformações de Fase:

Diagramas de resfriamento contínuo



COMPOSIÇÃO QUÍMICA

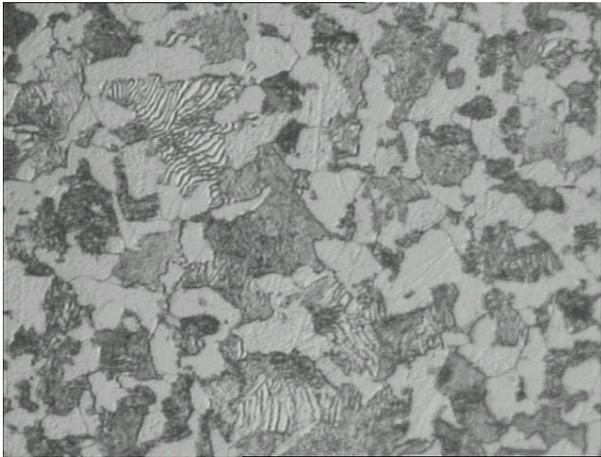
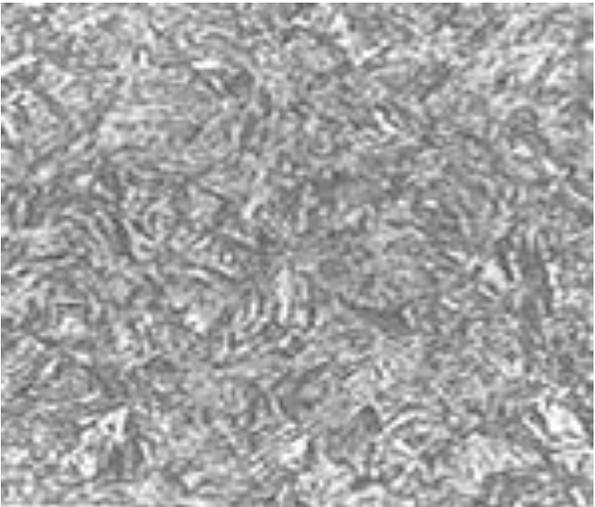
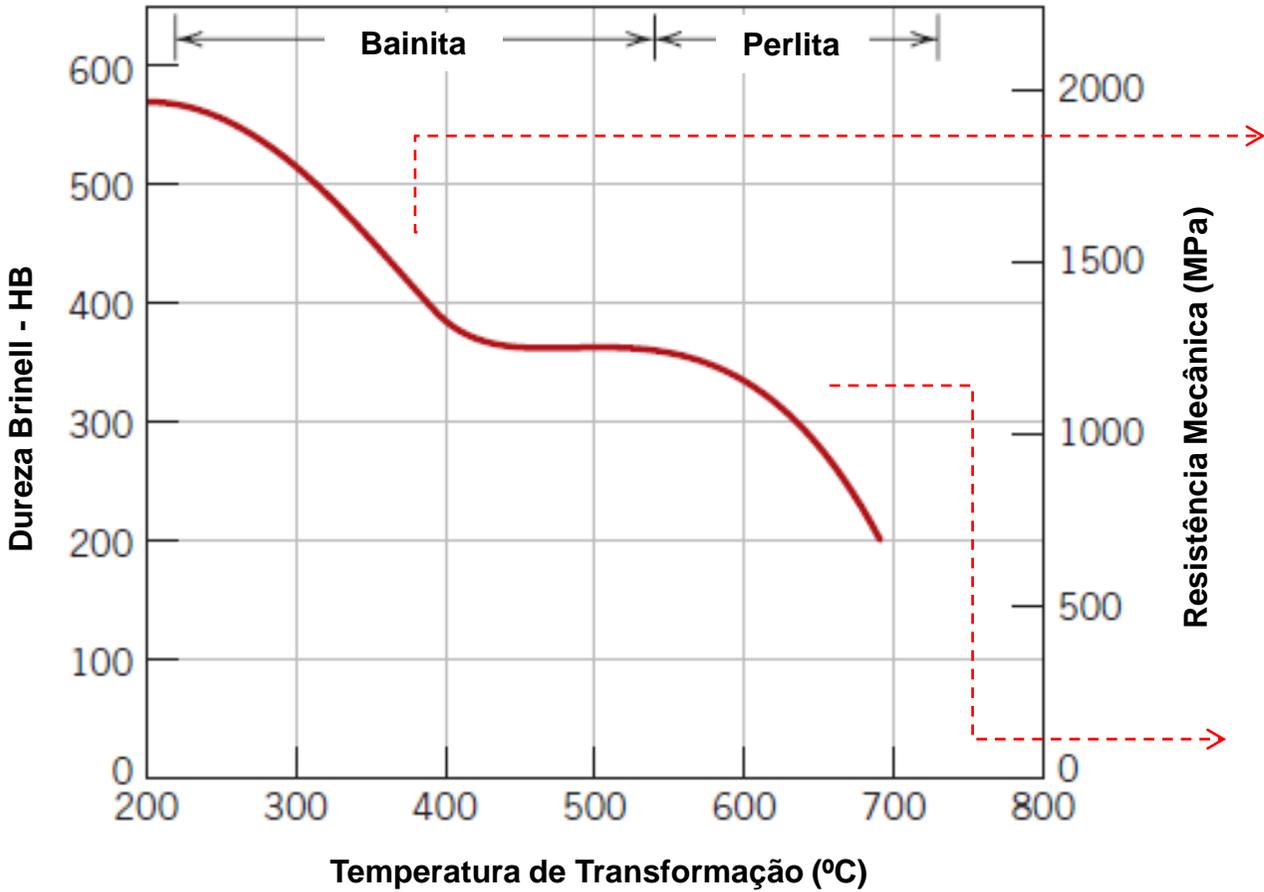
C – 0,40 %-p
Mn – 1,50 %-p

Dureza:
Bainita

40 a 50 HRC



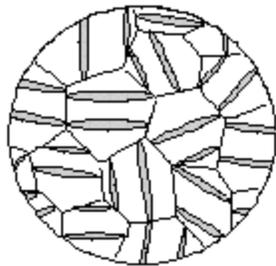
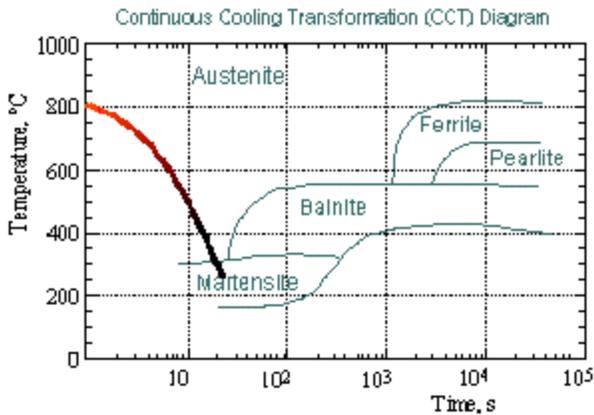
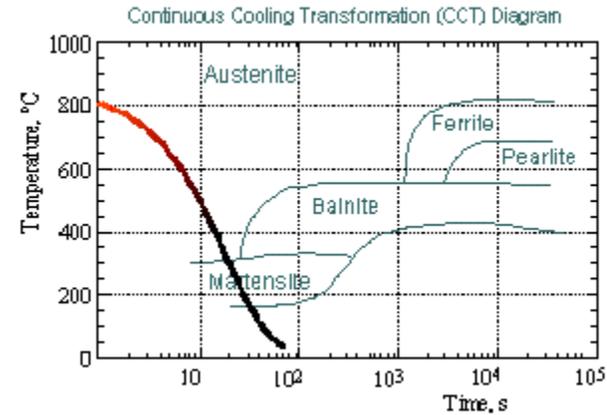
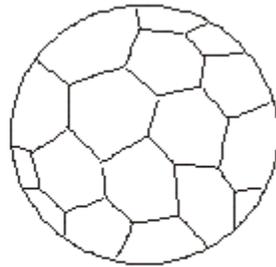
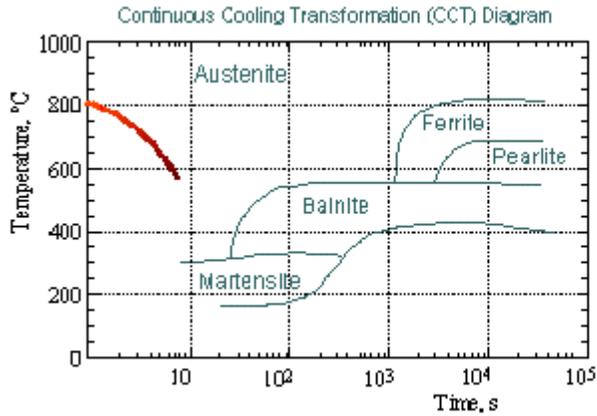
e- Transformações de Fase:





e- Transformações de Fase:

Diagramas de resfriamento contínuo



COMPOSIÇÃO QUÍMICA

C – 0,40 %-p
Mn – 1,50 %-p

Dureza: Martensita (50 – 55 HRC)



e- Transformações de Fase:

