



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação
ENGENHARIA CIVIL

PLASTICIDADE

Antonio Figueiredo & Renata Monte

Objetivos da aula:

- ◆ Apresentar como ocorrem as deformações plásticas nos metais e polímeros a partir de sua microestrutura.
- ◆ Discutir a importância dos principais aspectos de microestrutura na deformação plástica dos metais e polímeros termoplásticos
- ◆ Discutir a importância da temperatura na deformação plástica dos metais e polímeros termoplásticos

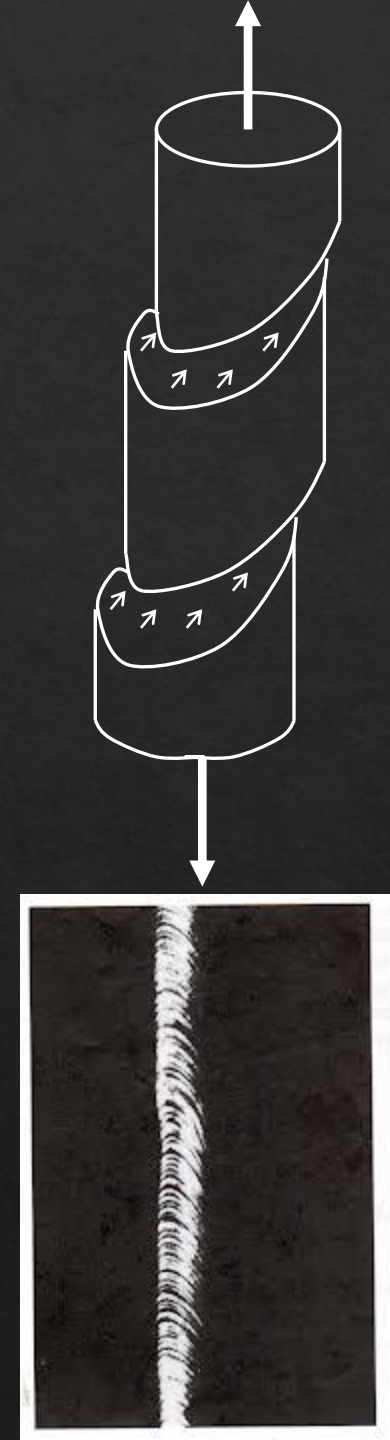
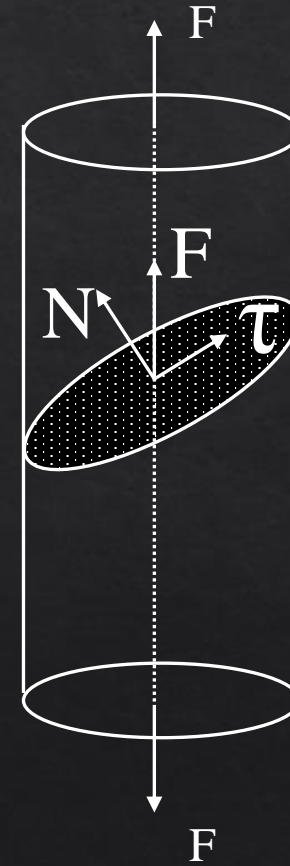
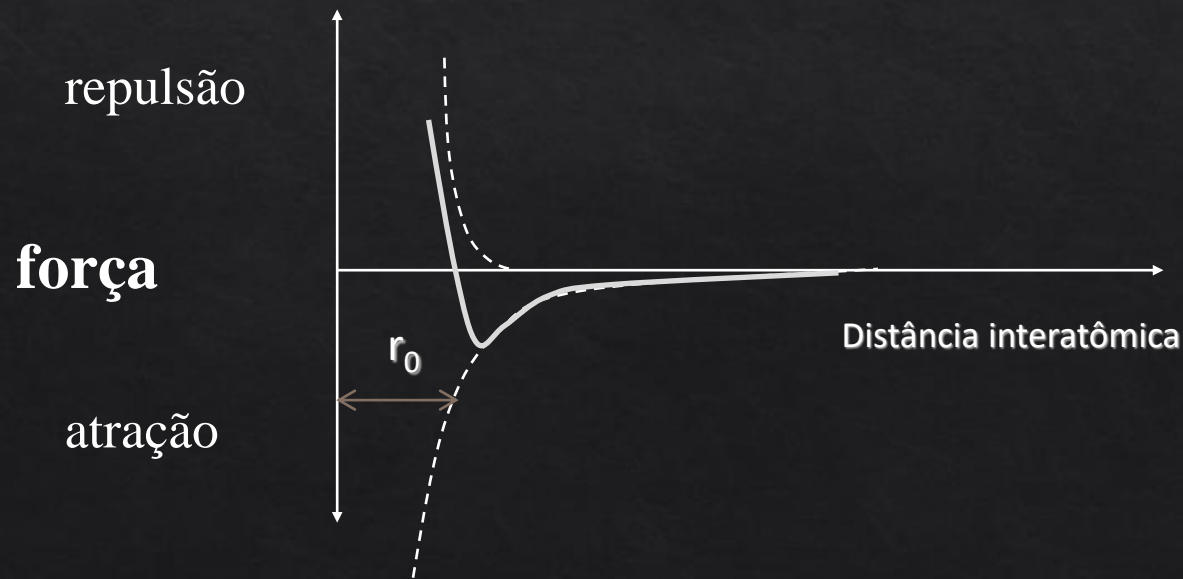
Deformação Plástica

- ◆ Alteração permanente da posição dos átomos ou moléculas (ou seus grupos) na microestrutura:
Escorregamento/deslocamento relativo
- ◆ Irreversível
- ◆ Materiais cristalinos: escorregamentos segundo os planos cristalográficos
- ◆ Materiais amorfos: escorregamentos de moléculas (distribuídos aleatoriamente pelo material)

Microplasticidade no cristal metálico

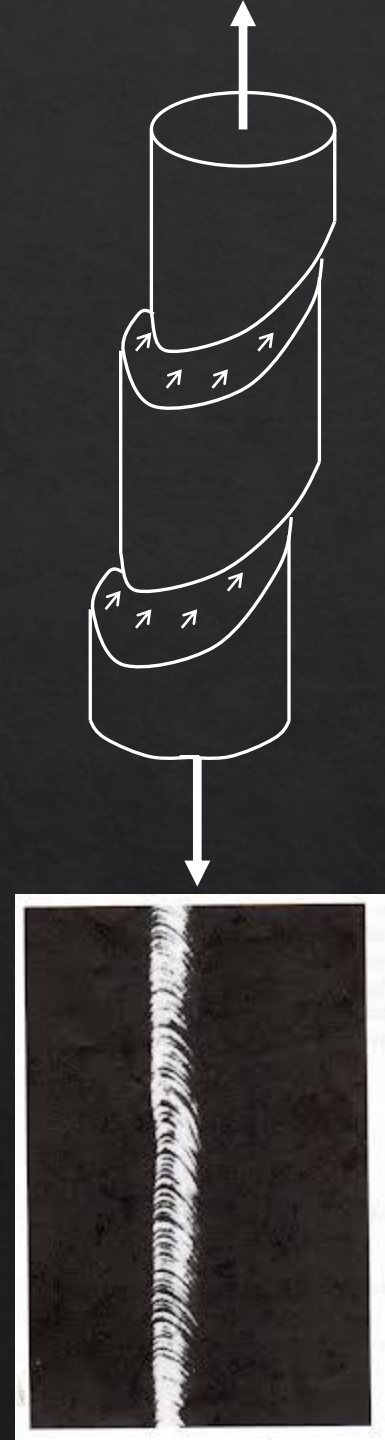
◆ Deformação plástica mais comum:

◆ escorregamento devido a esforços cortantes: mais comum



Tensão crítica de cisalhamento: escorregamento

- ◆ Deslocamento relativo de parte do cristal em relação à outra segundo planos cristalográficos
- ◆ Os planos de escorregamento são, em geral, os planos mais densamente empacotados, pois têm maior espaçamento entre si



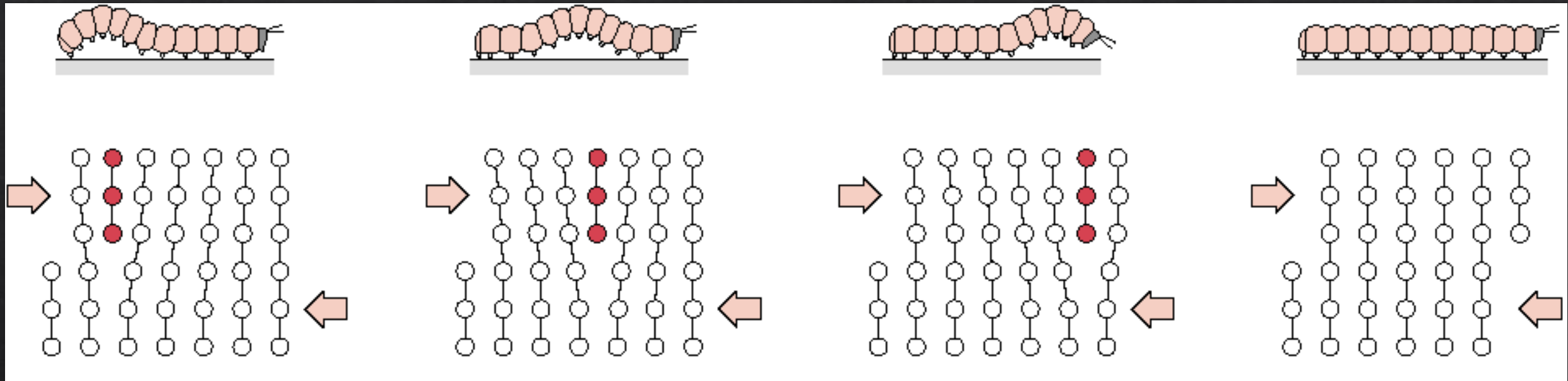
Escorregamento de planos cristalinos

- ◊ Ocorrem de maneira progressiva pela movimentação de discordâncias
- ◊ Menor gasto de energia do que na movimentação do plano cristalino como um todo
- ◊ Movimento de lagarta ou escorregamento de dobra de tapete

Curta metragem: “Clotilde em movimento” por Gabriel Figueiredo

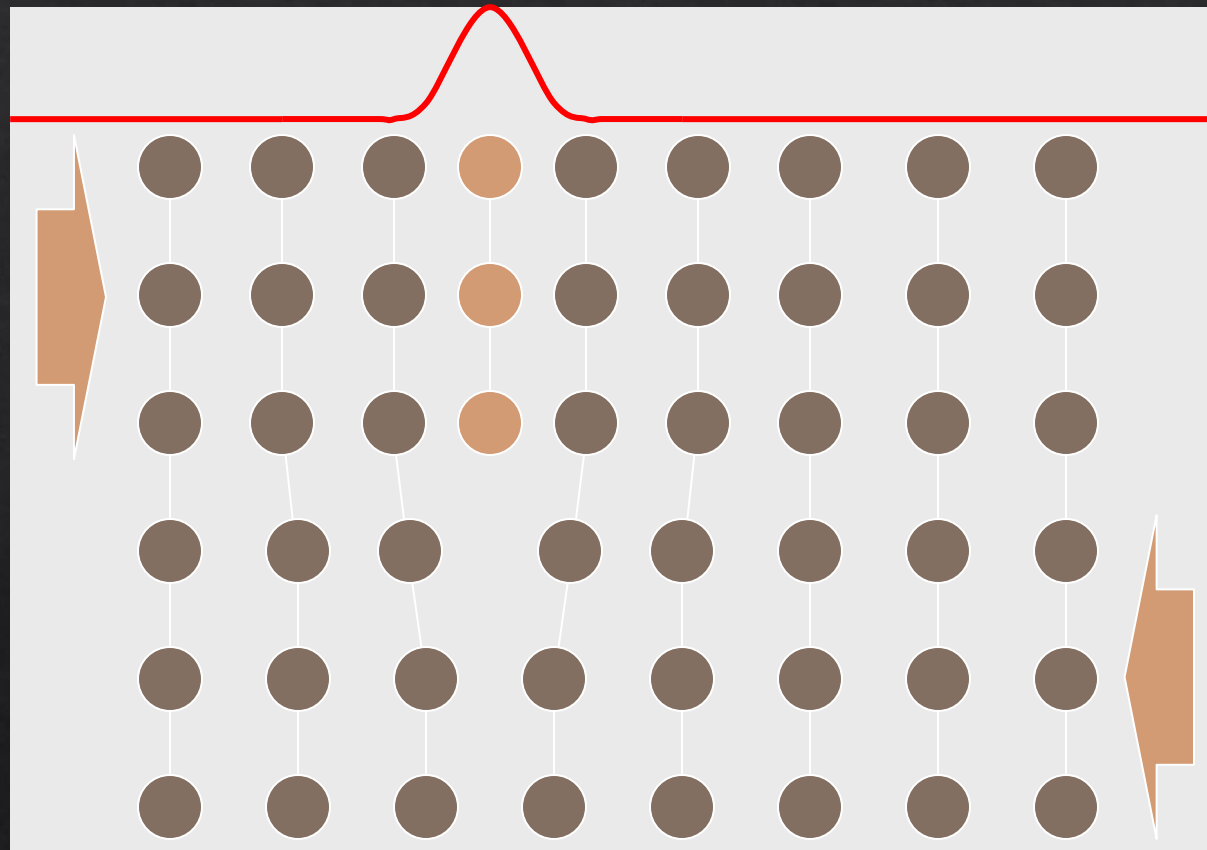


Movimento da lagarta

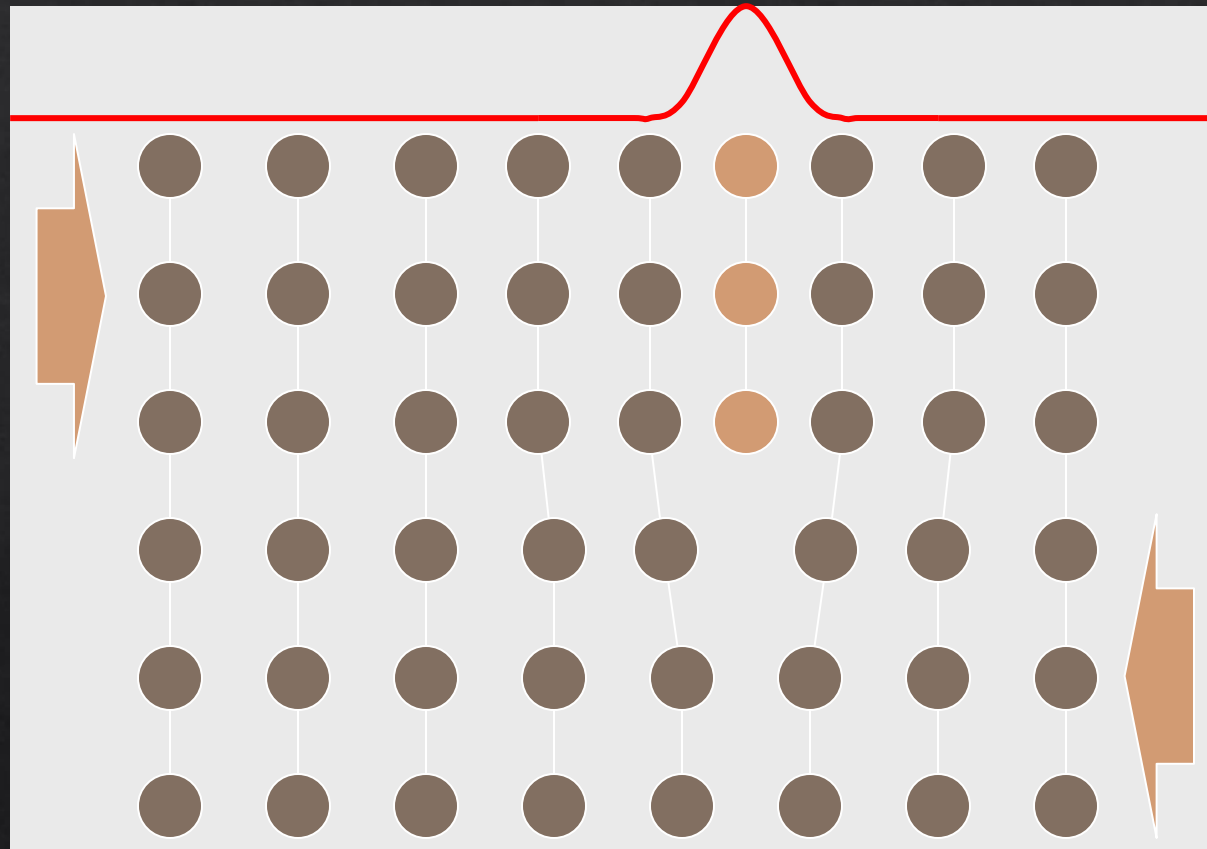


A lagarta quando se desloca concentra a tensão em um único ponto do corpo.

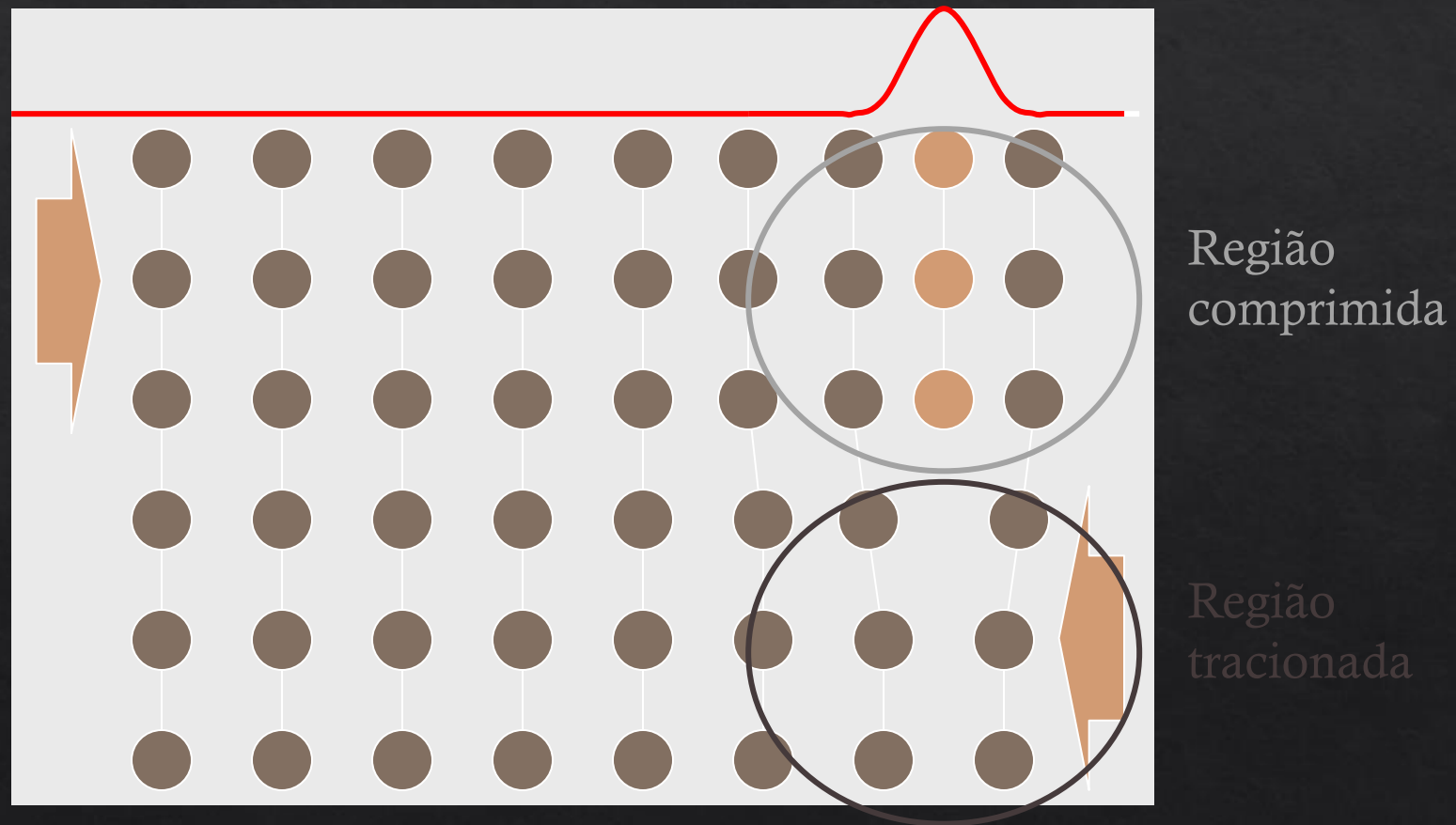
Movimento de discordância → deformação plástica



Movimento de discordância → deformação plástica



Movimento de discordância → deformação plástica



Observação de discordâncias em MET



**Micrografia em liga de Ti. As
linhas escuras são
discordâncias mistas.
51.450x**

Movimento
de
discordância

01-27 00:51:01:3



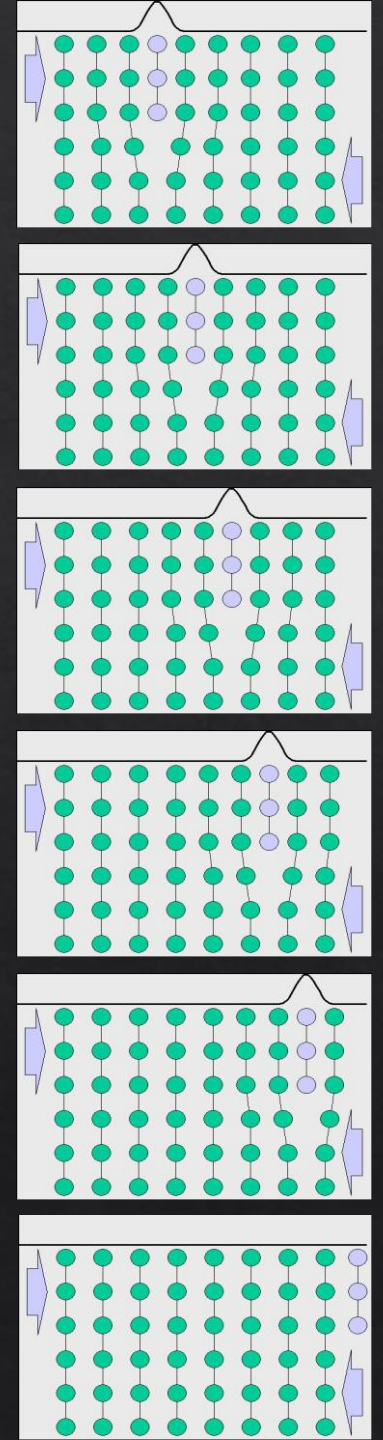


Parâmetros da microestrutura que influenciam a deformação plástica dos metais

Deformação plástica dos metais

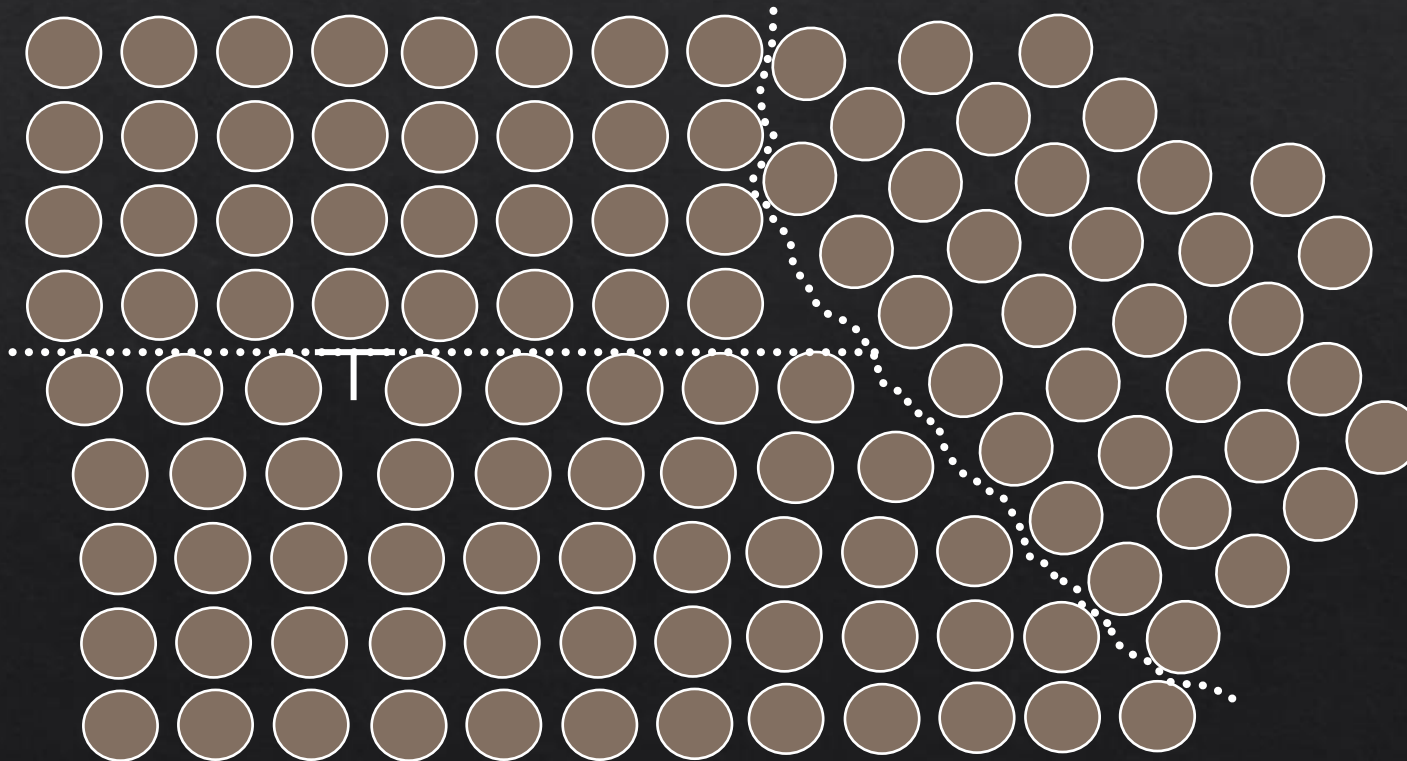
Maneiras de diminuir a deformação plástica (bloqueio de movimento de discordâncias):

- Encruamento (pré-indução de uma deformação plástica) e/ou
- Inserção de elementos de liga (substituição ou solução)
- Diminuição do tamanho dos grãos (bloqueio para movimentação das discordâncias)



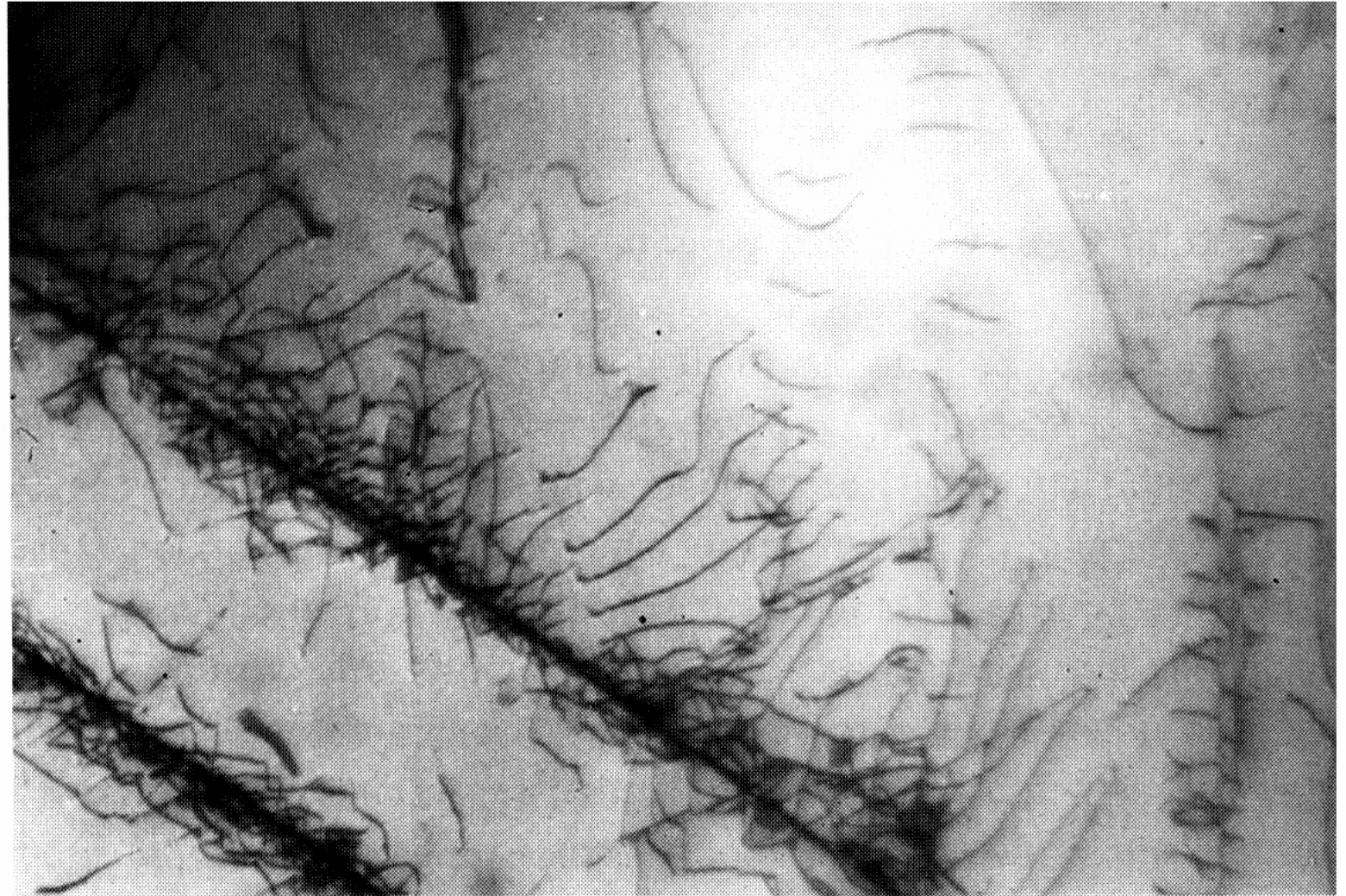
Deformação plástica dos metais

- ◆ Contornos agem como barreiras à progressão dos deslocamentos

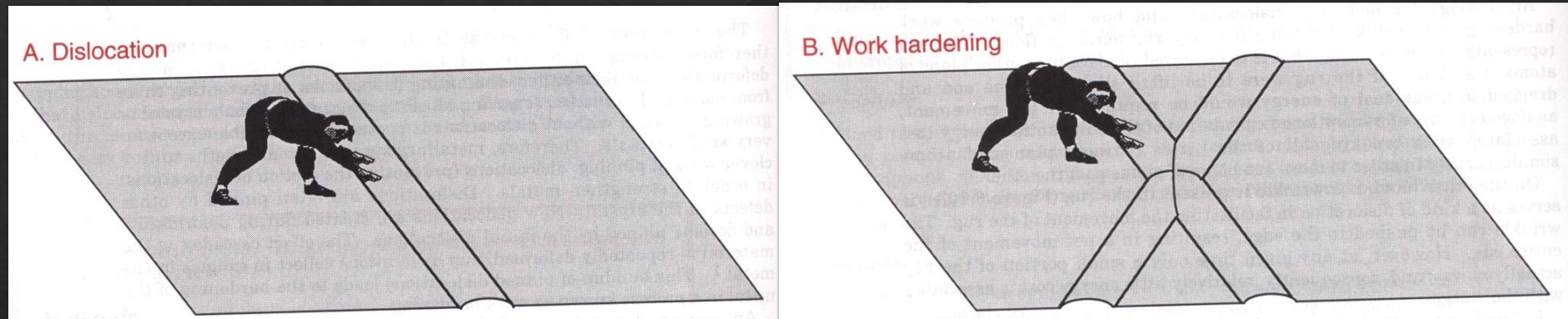


Observação de discordâncias em MET

Concentração de discordâncias em região adjacente a um contorno de grão. 60.000x



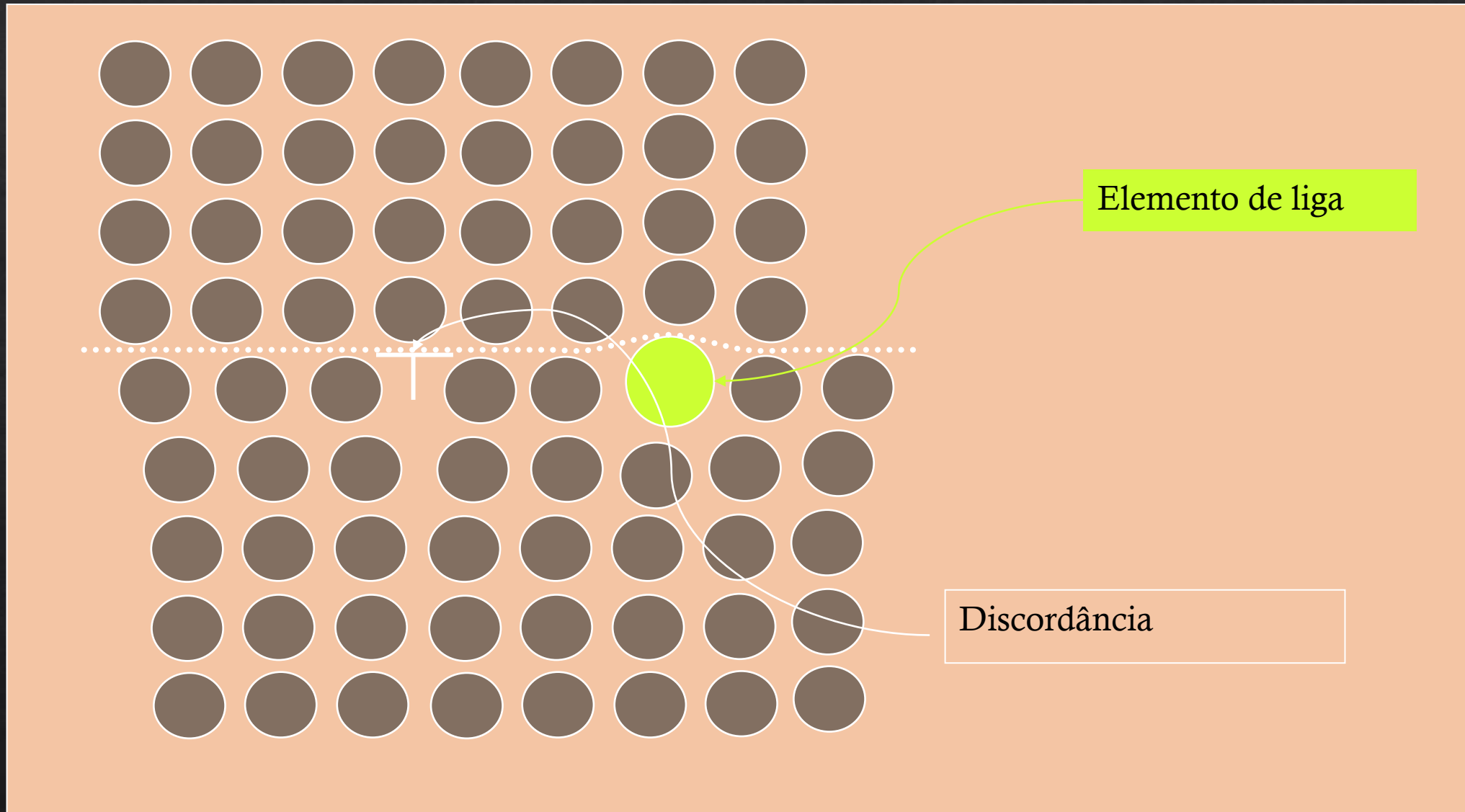
Interação do movimento de discordâncias: analogia com o movimento do tapete



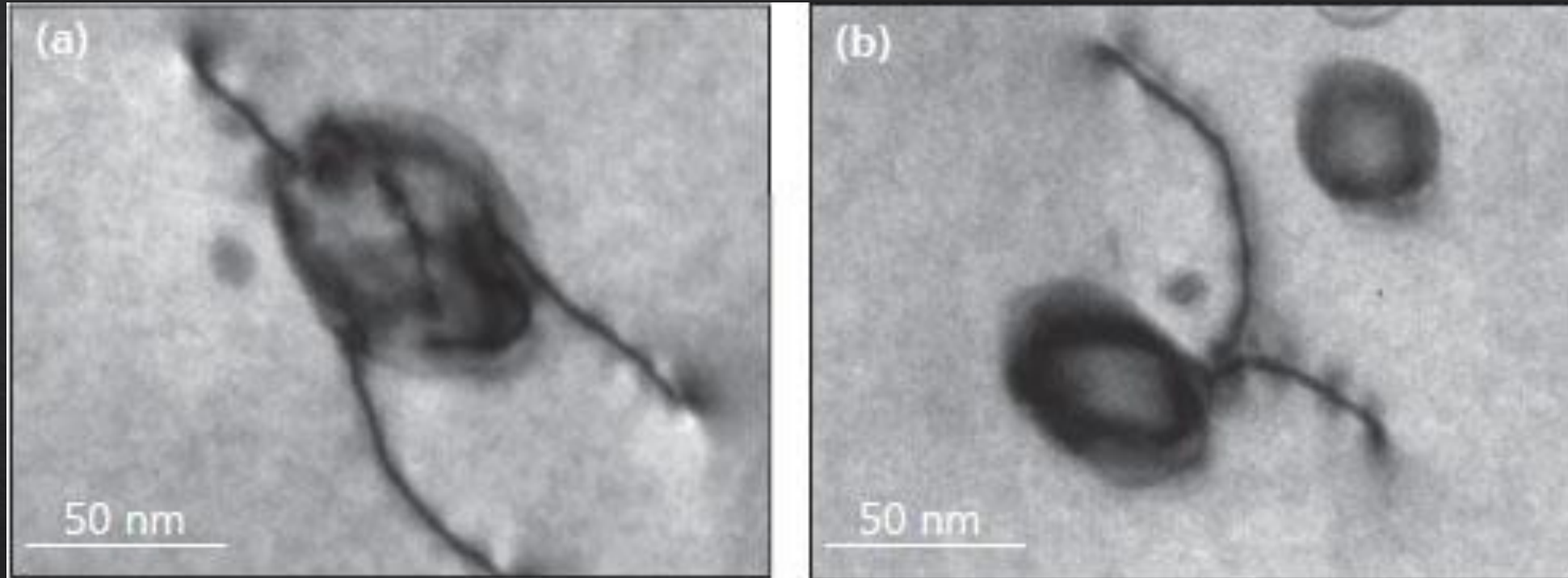
Patamar de escoamento com liberdade de movimento da dobra

Encruamento obtido com a interação progressiva das discordâncias : a tensão deve aumentar para gerar deslocamento

Influência de elementos “dificultadores de escorregamentos” - Defeitos pontuais em ligas com soluções sólidas



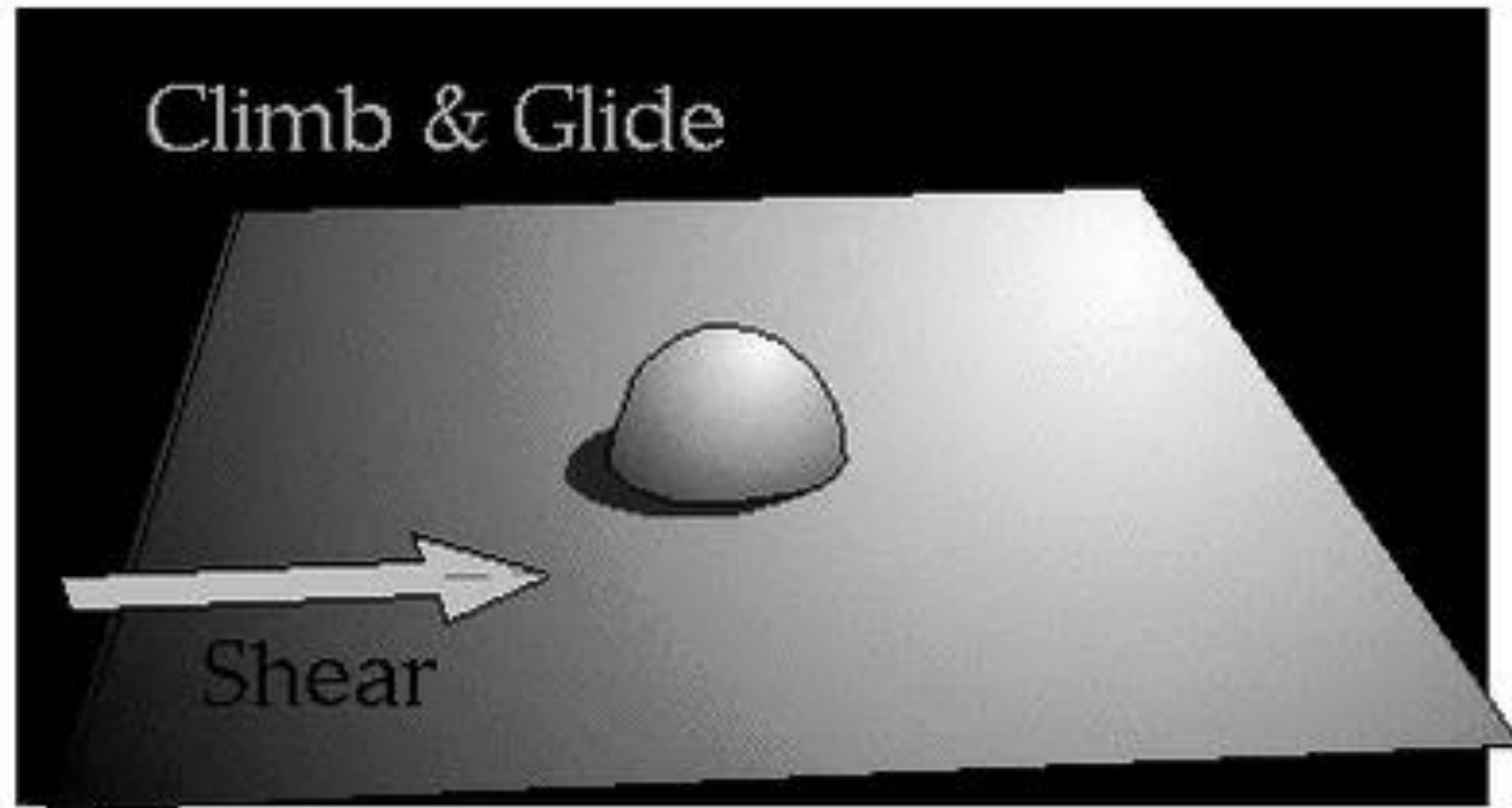
“Subida da discordância”



(a) Escalada de discordâncias sobre uma partícula de óxido; (b) retenção da parte traseira de uma discordância na interface matriz / partícula

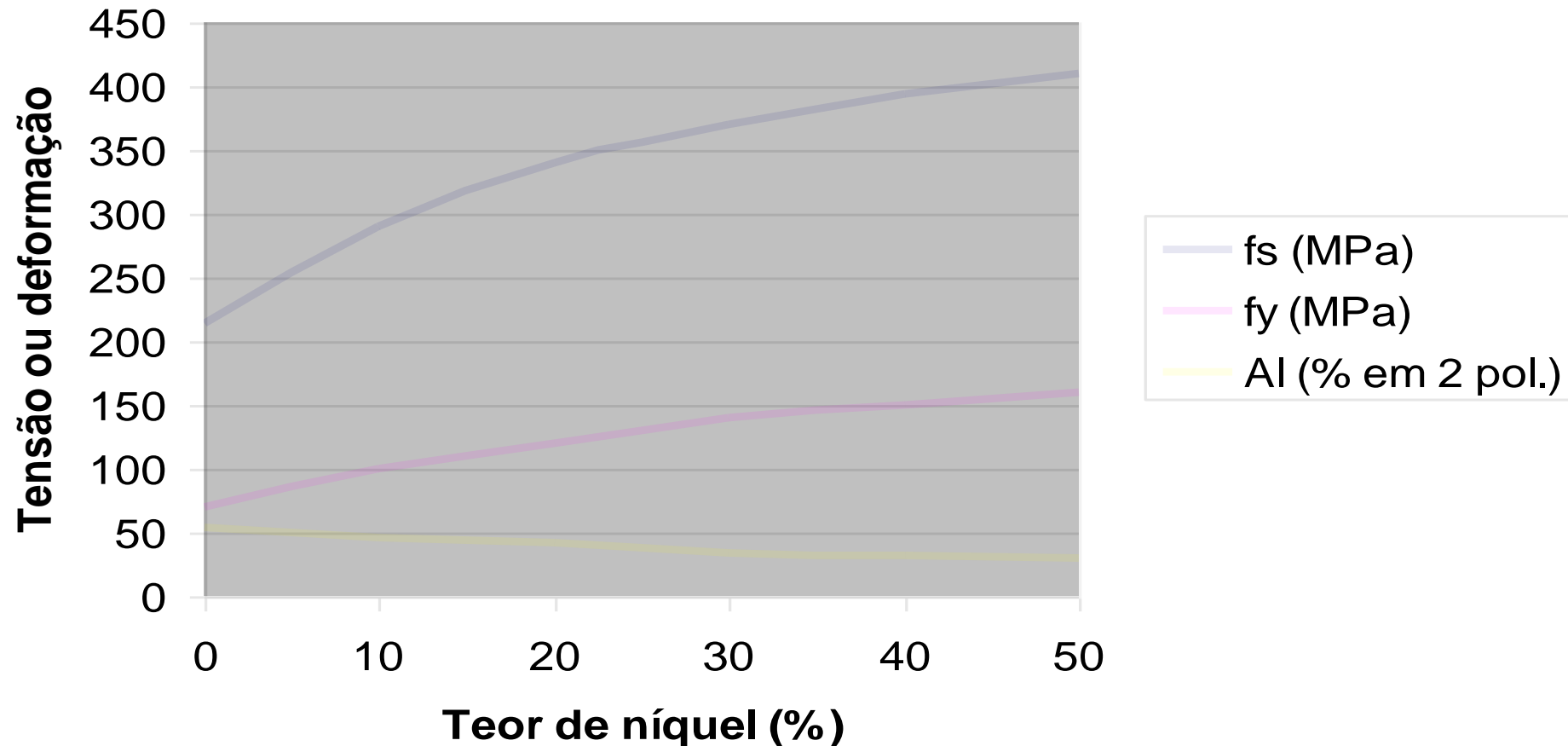
Teichmann, K. et al. High Temperature Strengthening Mechanisms in the Alloy Platinum-5% Rhodium DPH. *Platinum Metals Rev.*, 2011, 55, (4), 217

Subida de elemento de liga

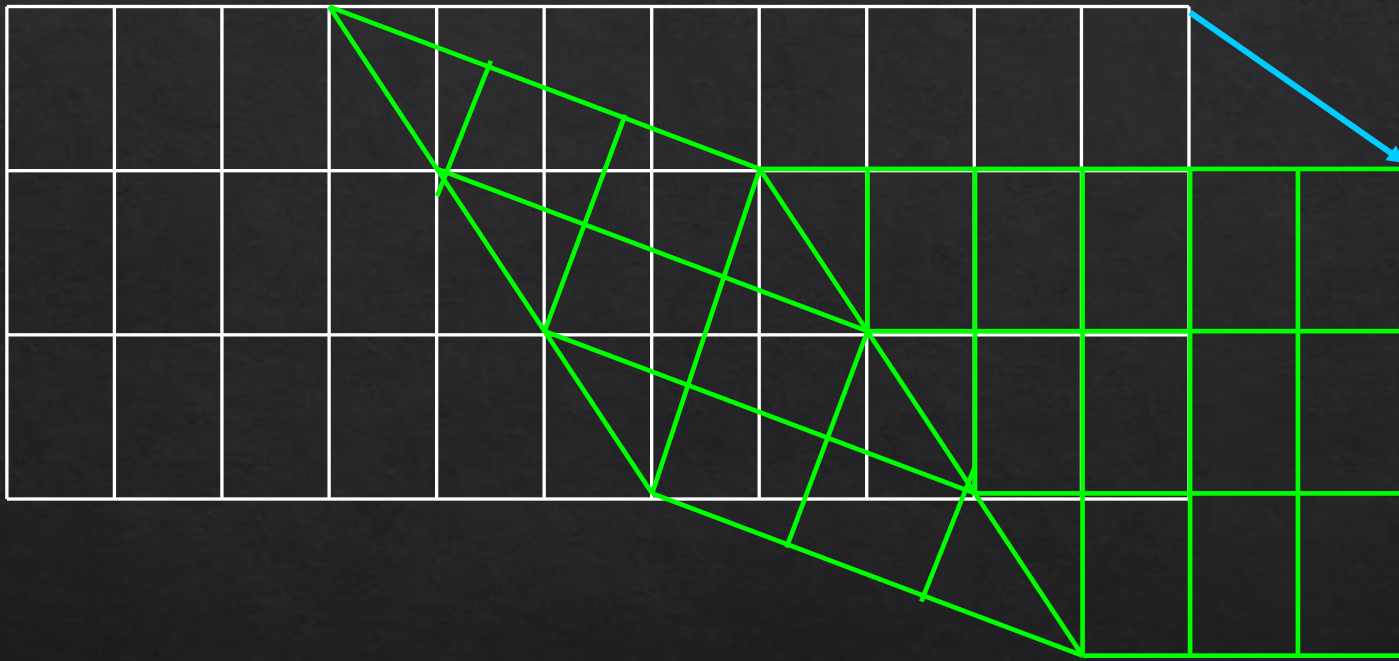


Influência de compostos dificultadores de escorregamentos

Efeito do teor de níquel numa liga cobre-níquel

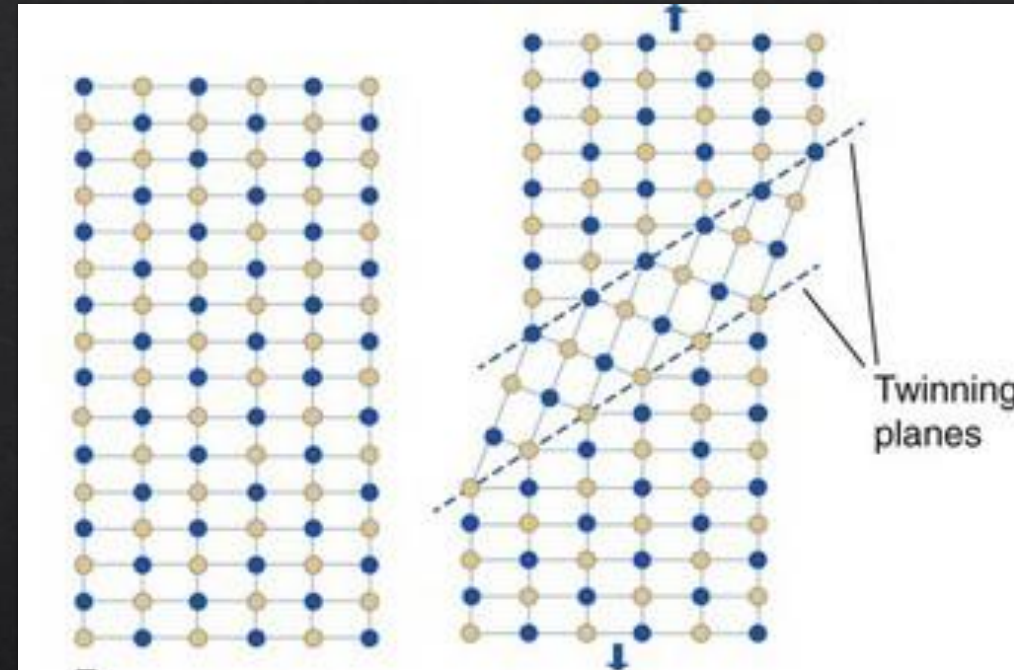


Geminação ou maclagem



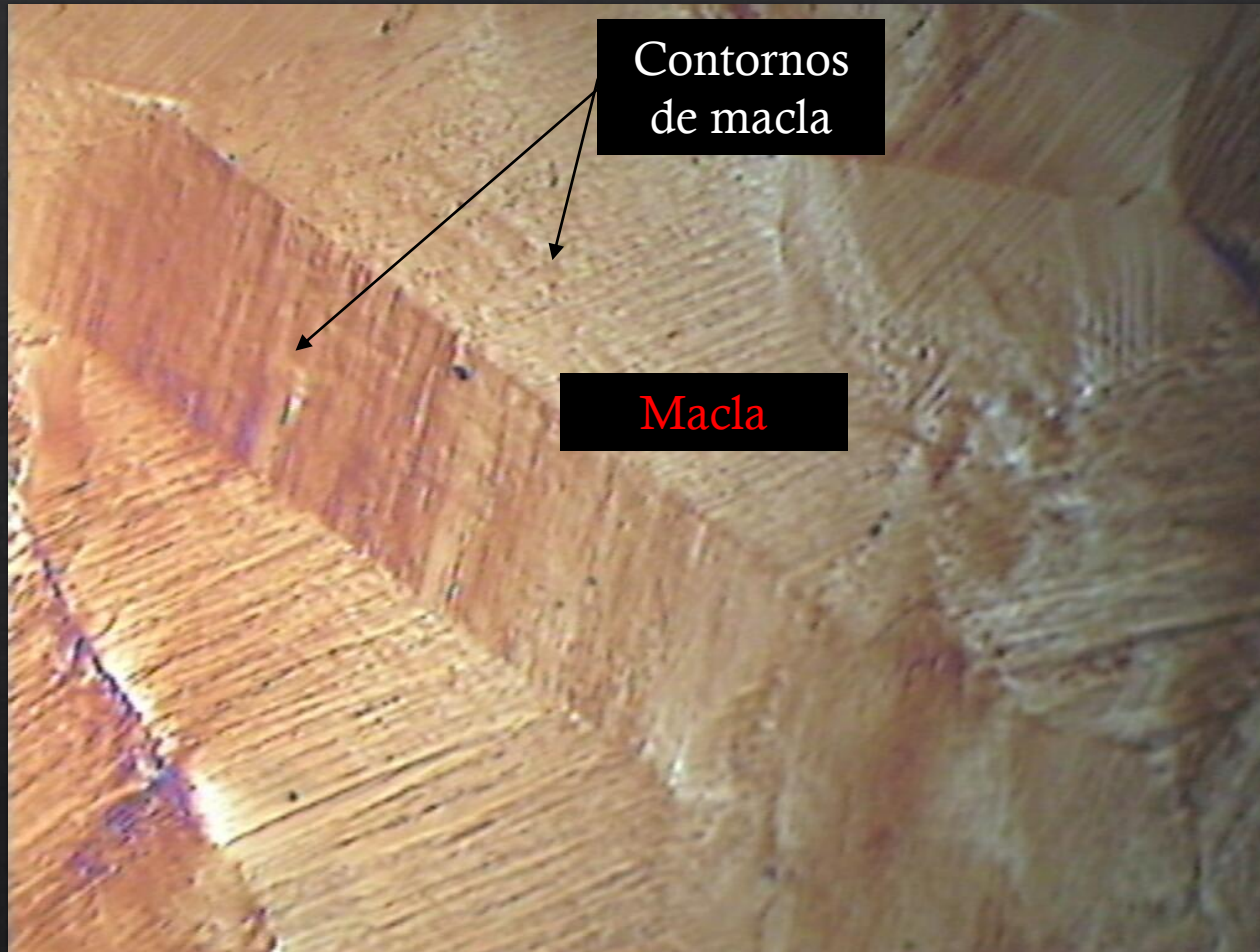
Outra possibilidade de produção de deformação em metais cristalinos sem escorregamento de discordâncias.

Normalmente associada à estrição



<https://pocketdentistry.com/17-wrought-metals/>

Maclagem



Bandas de deslizamento produzidas por fadiga evidenciando maclas de recozimento.

Micrografia óptica utilizando Contraste por Interferência Diferencial (DIC).

Amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304L, sem ataque químico.

Aumento original: 500X.

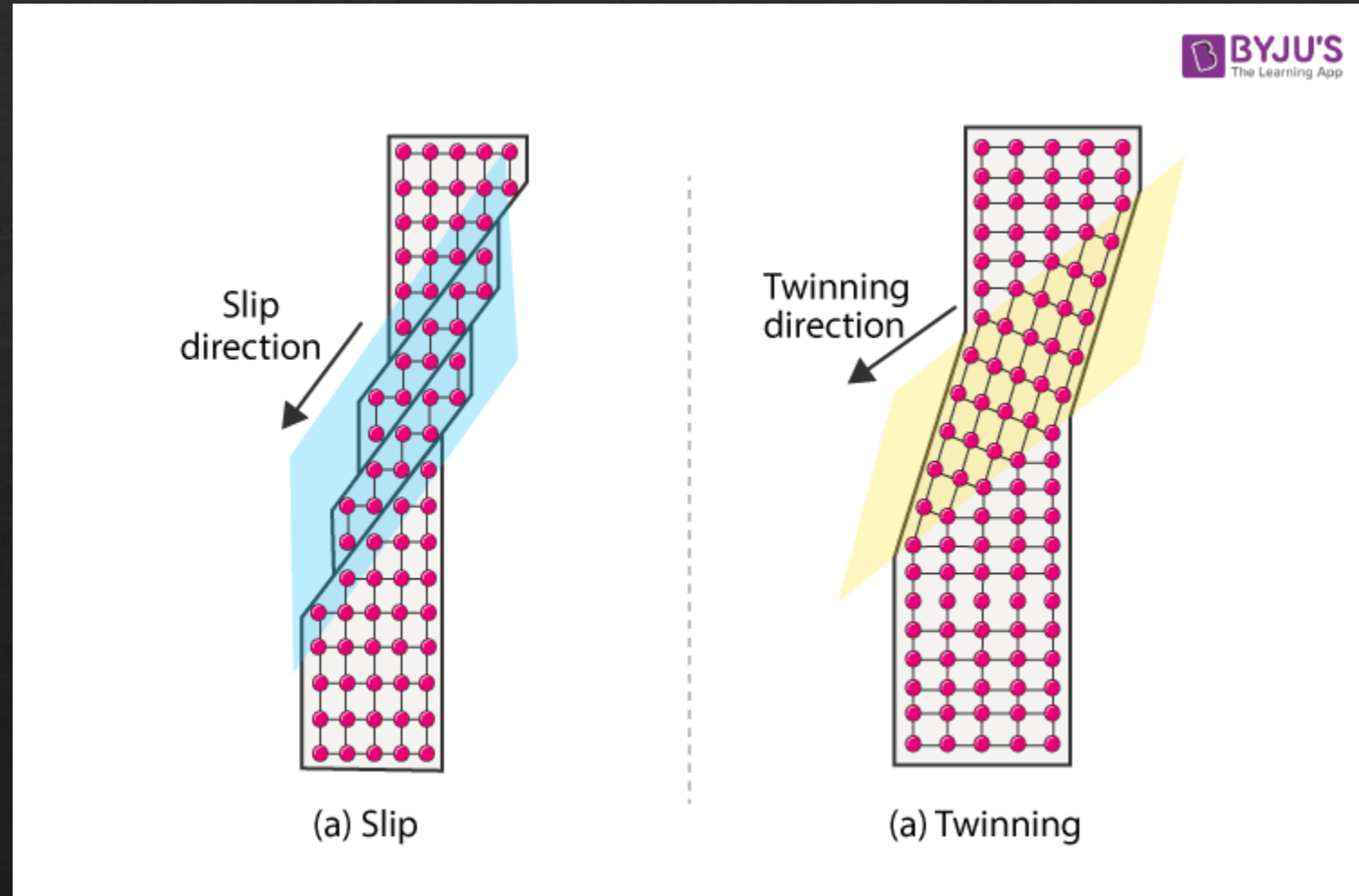
Maclagem – estrição



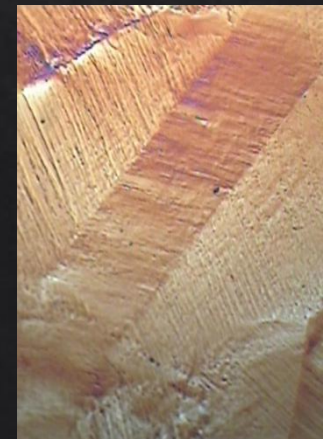
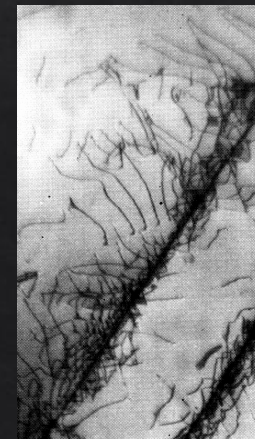
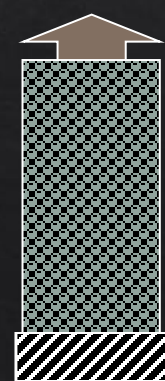
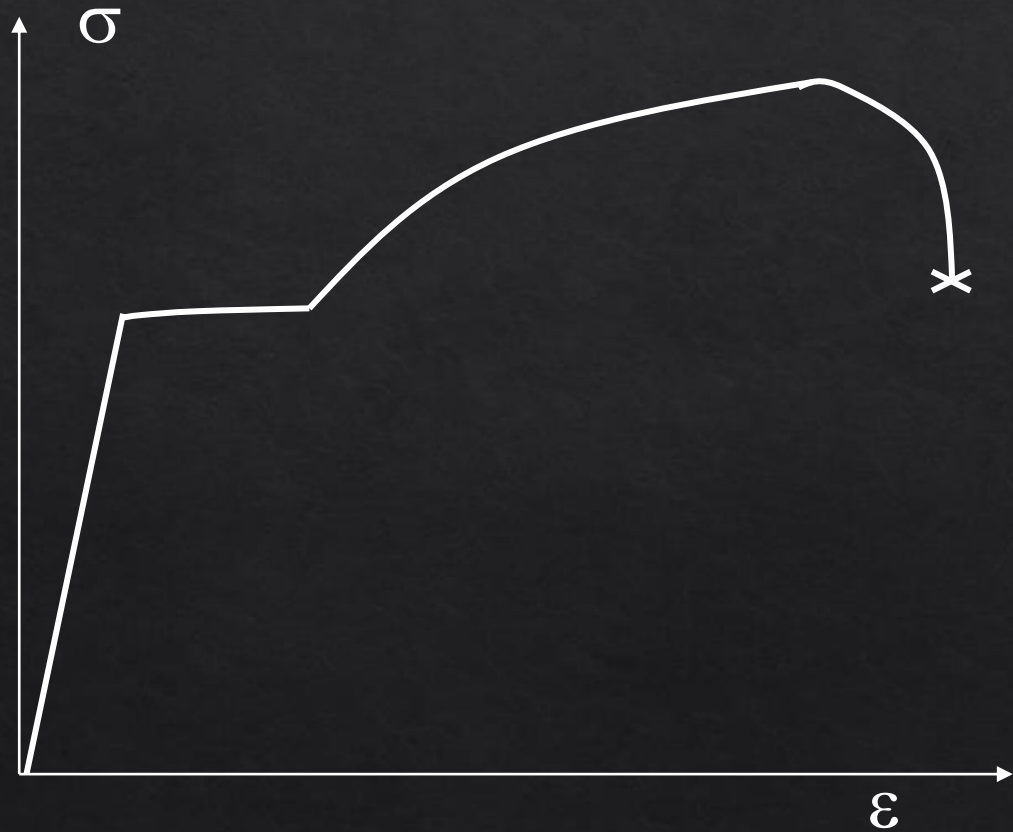
https://www.youtube.com/watch?v=RY9X_O8is-k

Deformação plástica: escorregamento e maclagem

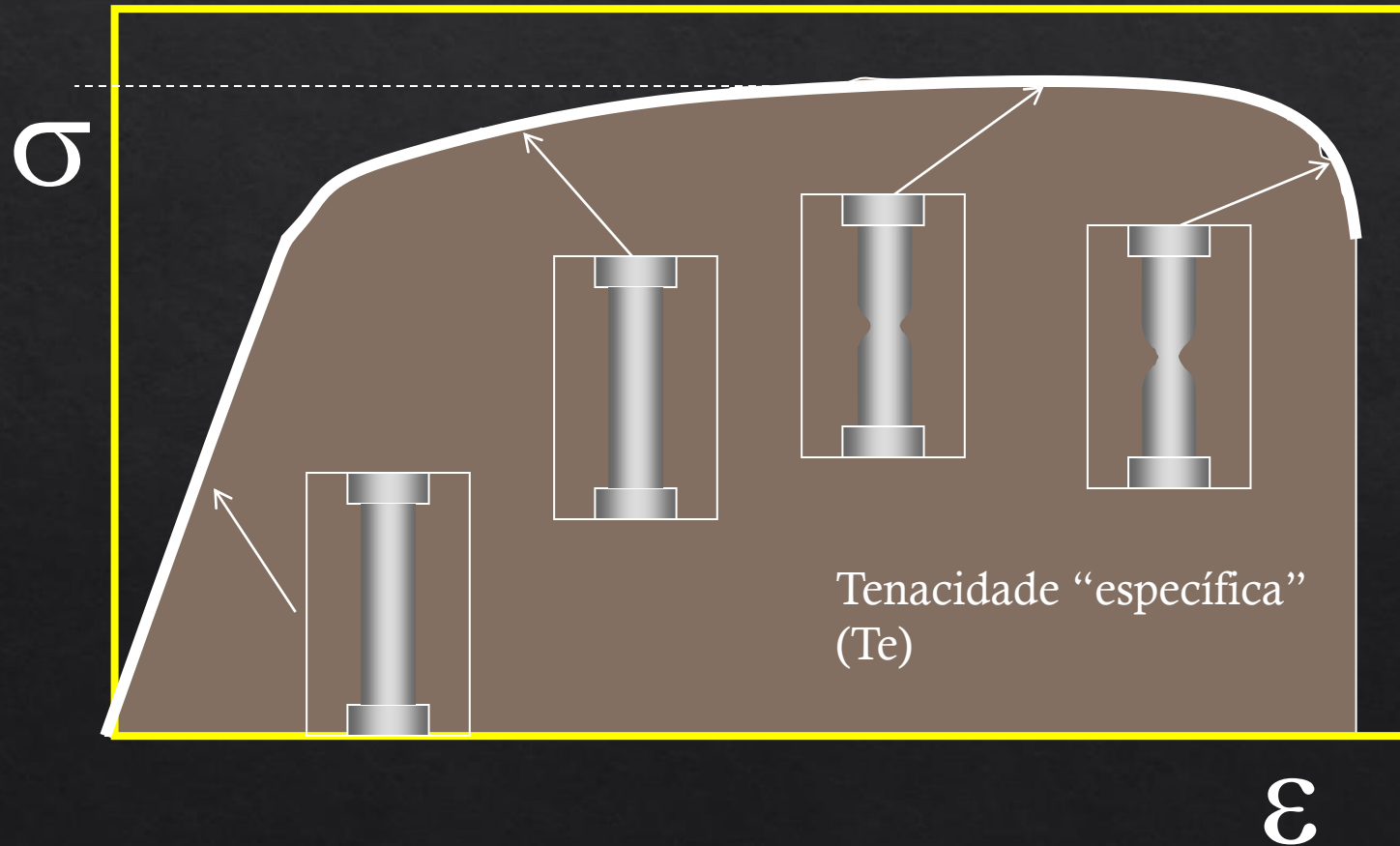
- ◆ Ambas as formas de deformação plástica são possíveis e podem ocorrer simultaneamente mas:
- ◆ Movimentação de discordância é característica da região pré-estricção.
- ◆ Maclagem é característica da região associada à estrição.



Comportamento mecânico dos metais



Dinâmica das deformações plásticas



$$Te = \sigma \epsilon$$

$$Te = \frac{F \Delta L}{A L}$$

$$Te = \frac{E}{V}$$

Material policristalino deformado plasticamente

◊ Deformações plásticas dificultam outras novas \Rightarrow material mais resistente e frágil

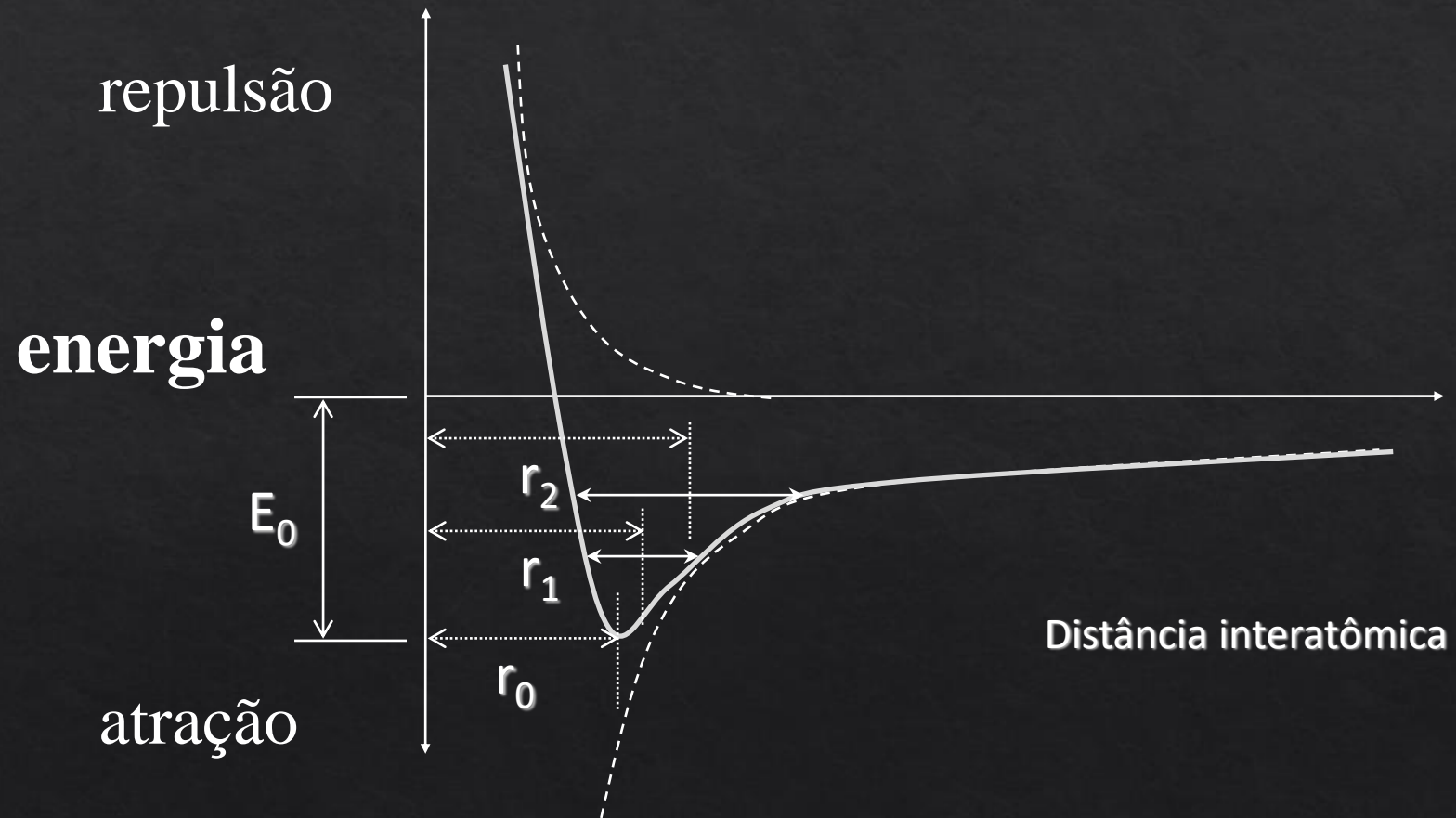
- É função de:
 - Tempo e velocidade de aplicação da carga (próximas aulas)
 - Temperatura
 - Tratamentos (encruamento, inserção de elemento de liga).



Efeito da temperatura

<https://madeiraestrutural.wordpress.com/2009/07/13/a-madeira-um-material-resistente-ao-fogo/>

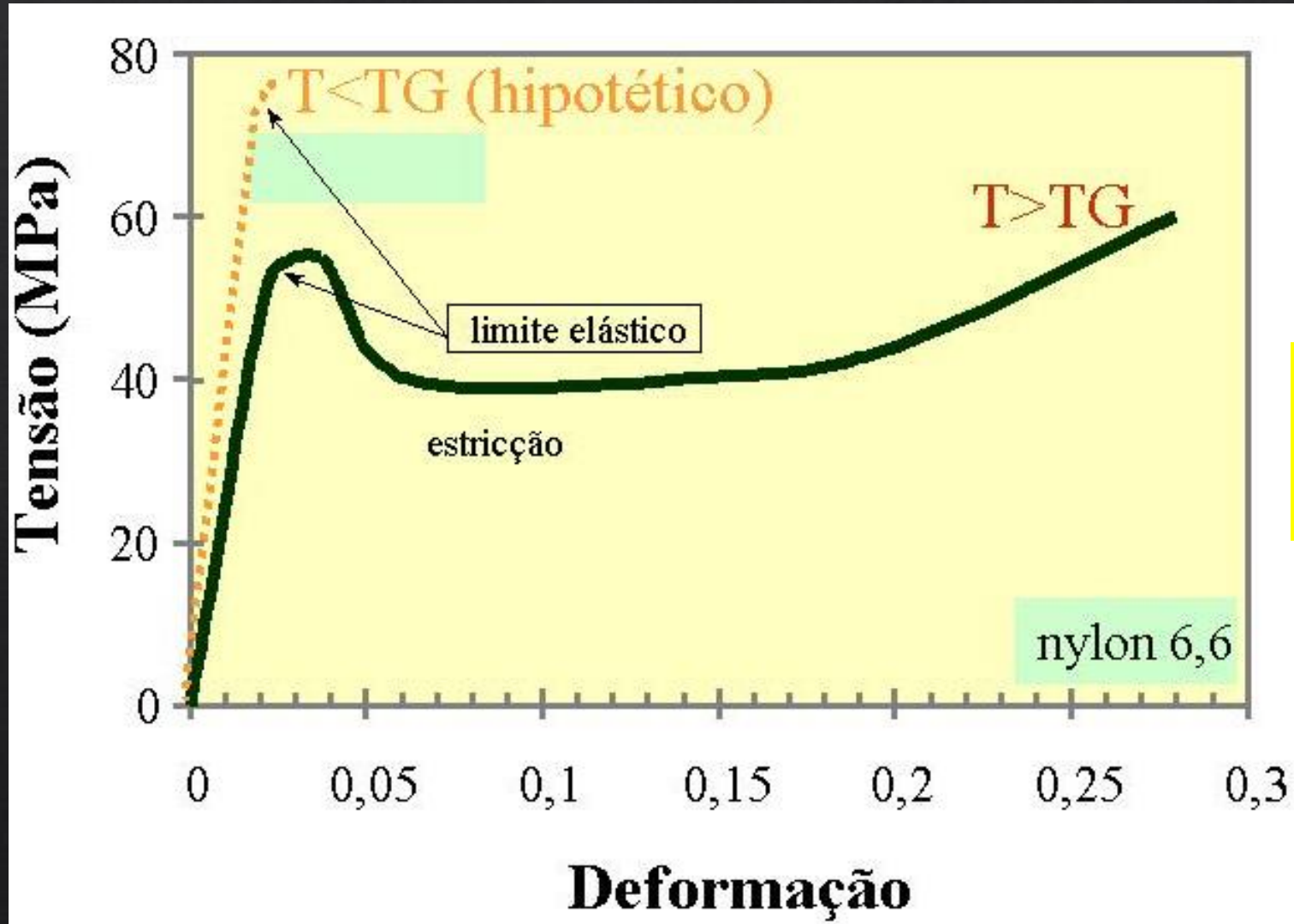
Por que a temperatura afeta a deformação plástica?



Influência da temperatura



Influência da temperatura no comportamento dos polímeros



Polímero
Termoplástico

Temperatura de transição vítrea: parâmetro fundamental para ductilidade

Material	T _v (°C)
Polietileno de baixa densidade	-110
Polietileno de alta densidade	-90
Polipropileno	-18
Náilon 6,6	57
PVC	87
Poliestireno	100

Termoplásticos x temperatura

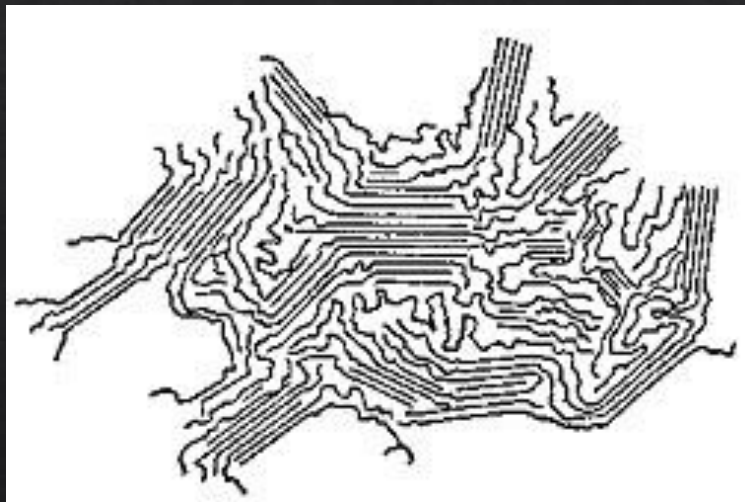
◇ Temperatura de transição vítrea (T_g)

Abaixo da T_g :

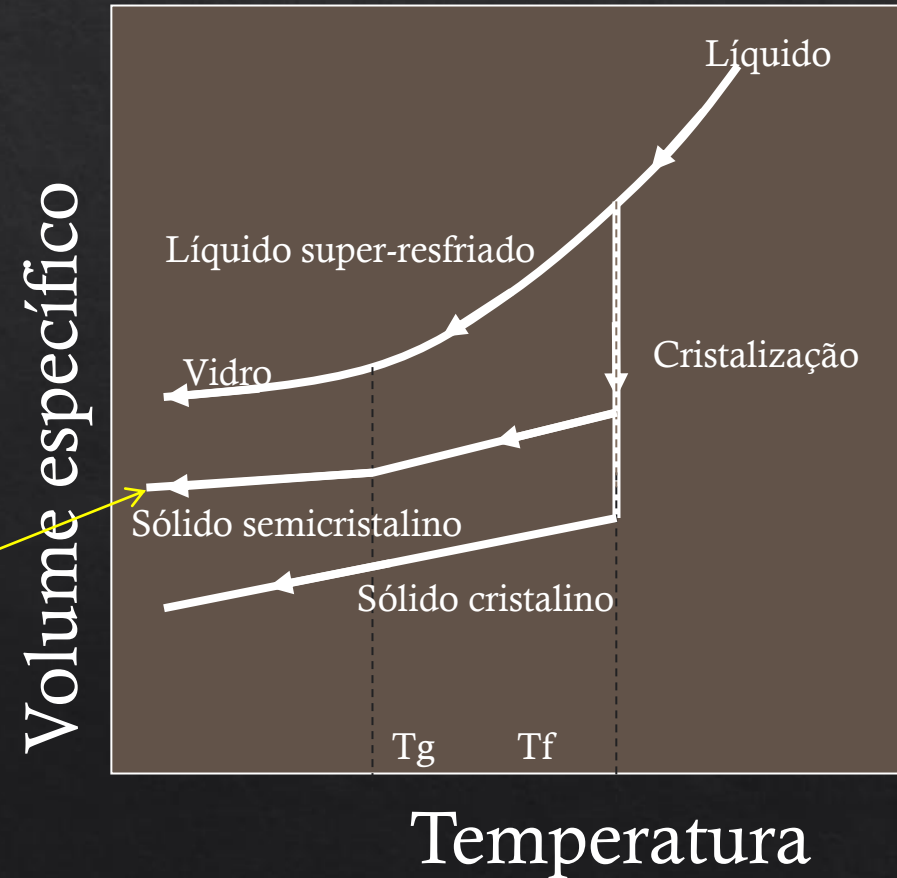
tornam-se frágeis

< deformação térmica

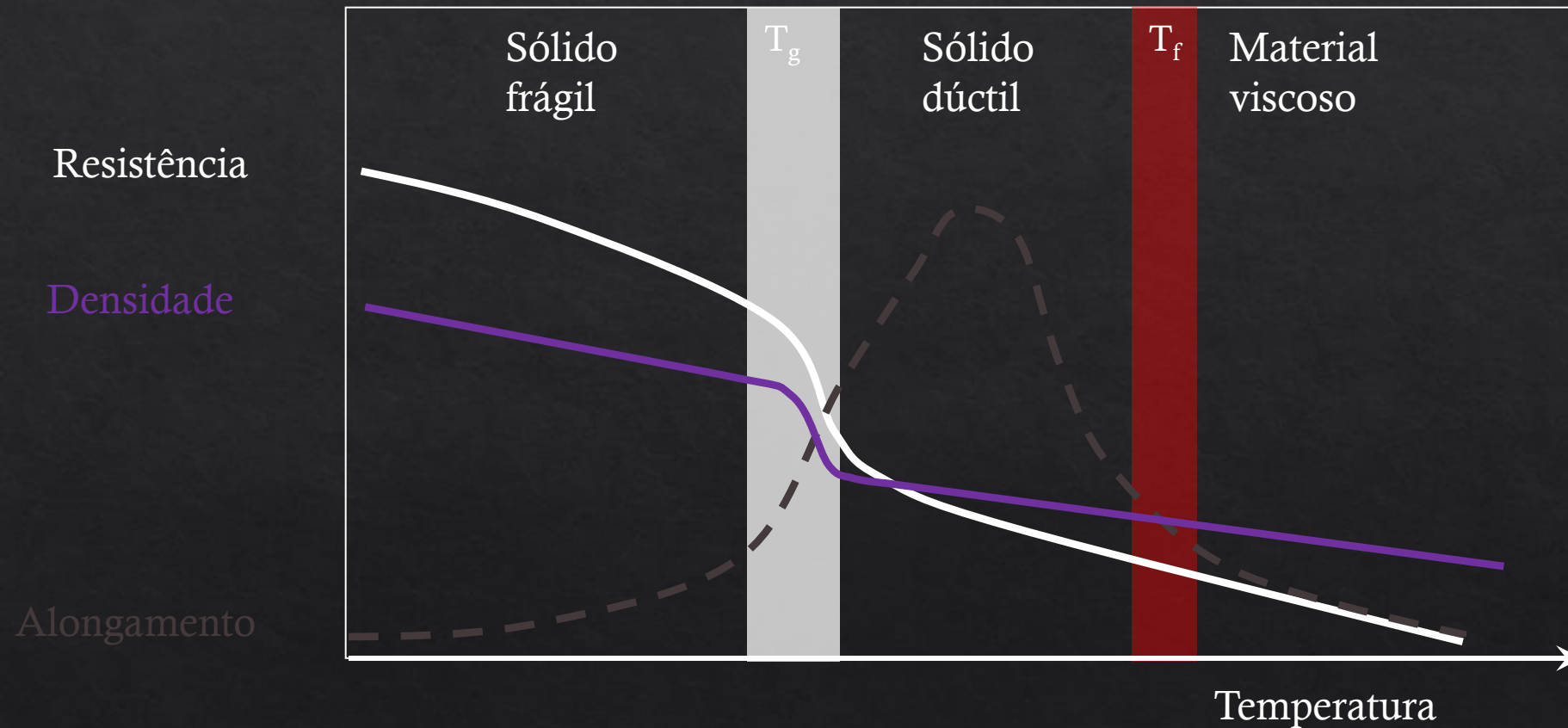
< deformação elasto-plástica



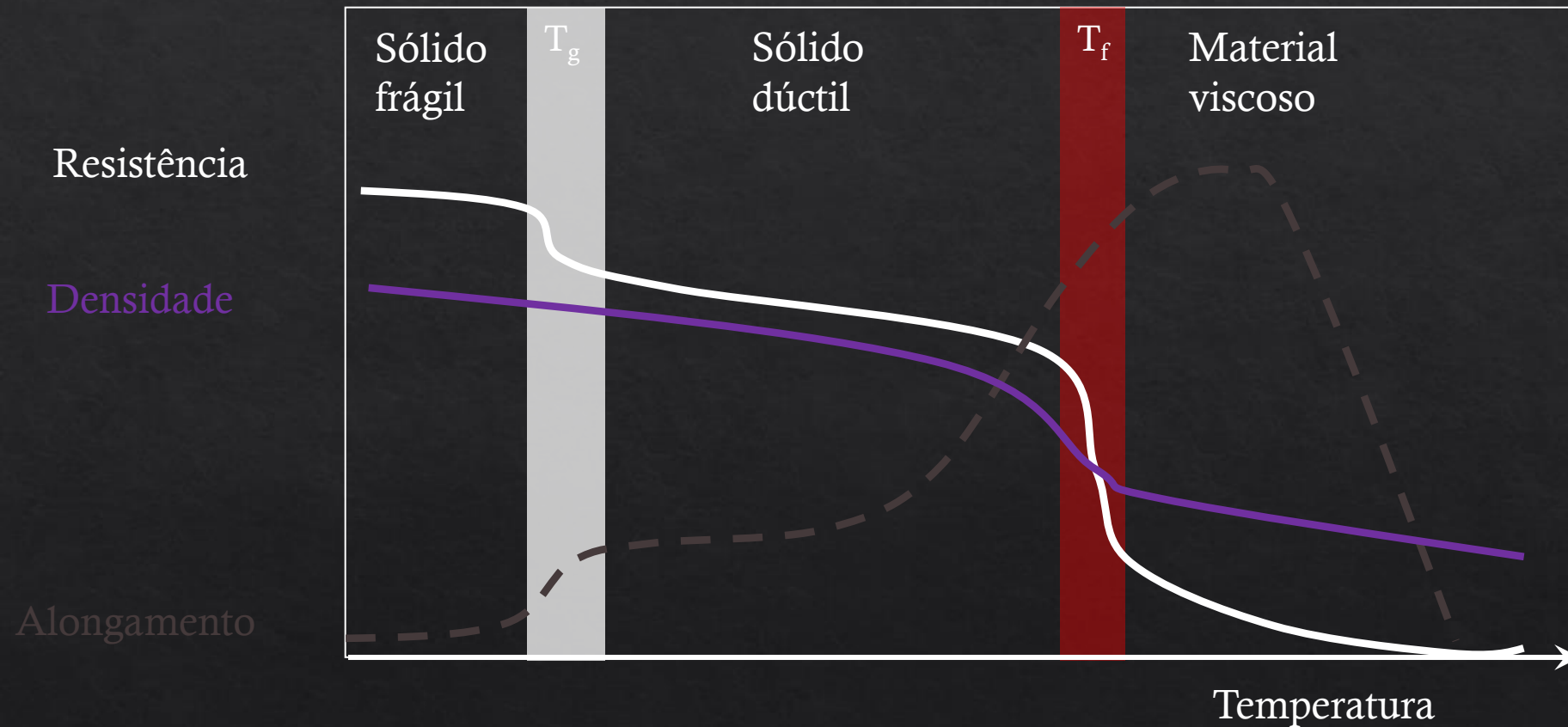
http://ospolimeros.blogspot.com/2010_06_01_archive.html



Efeito da temperature nos polímeros amorfos



Efeito da temperature nos polímeros **semicristalinos**



Processamento: “encruamento”



<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=6>

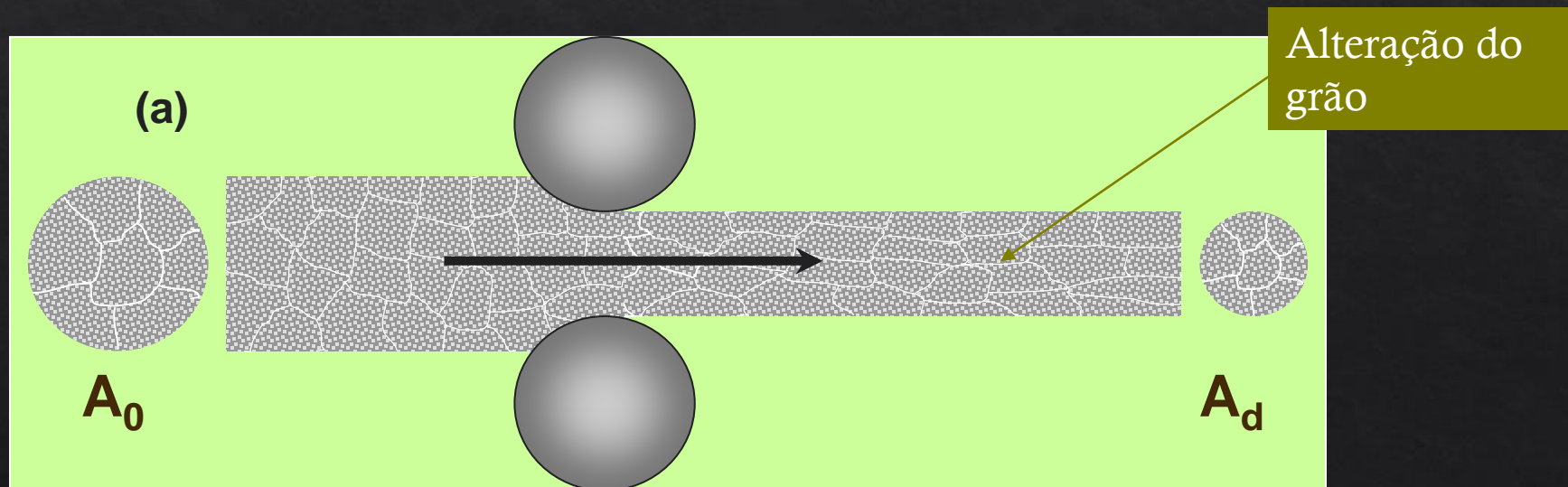
Porcentual de trabalho a frio (%TF)

$$\%TF = 100 \times (A_0 - A_d) / A_0$$

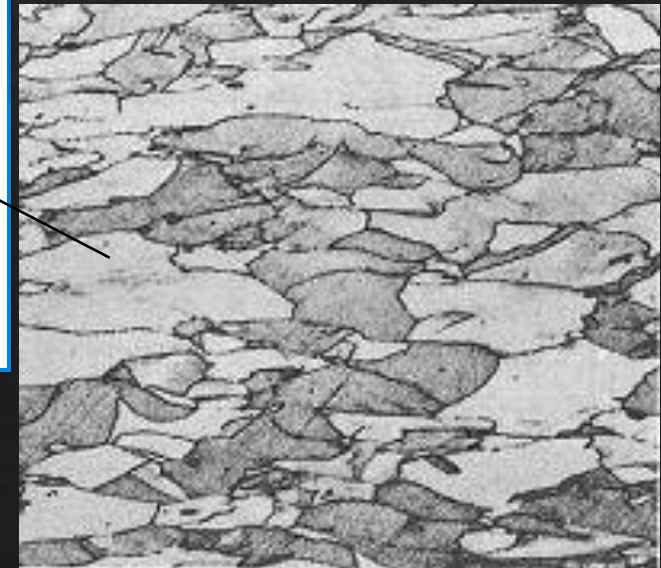
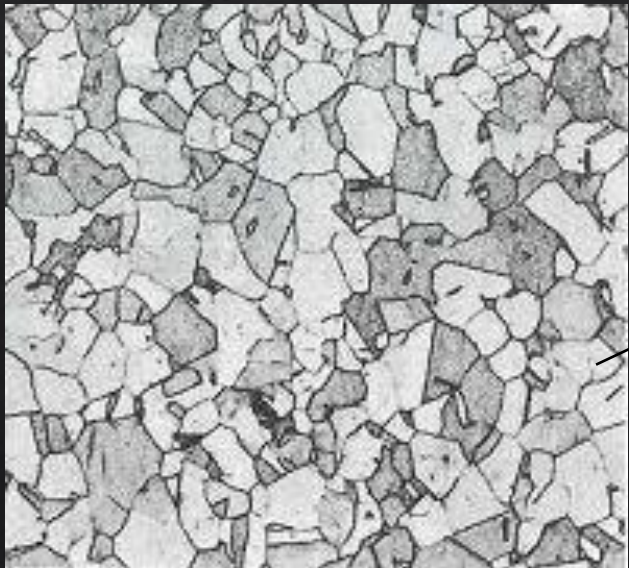
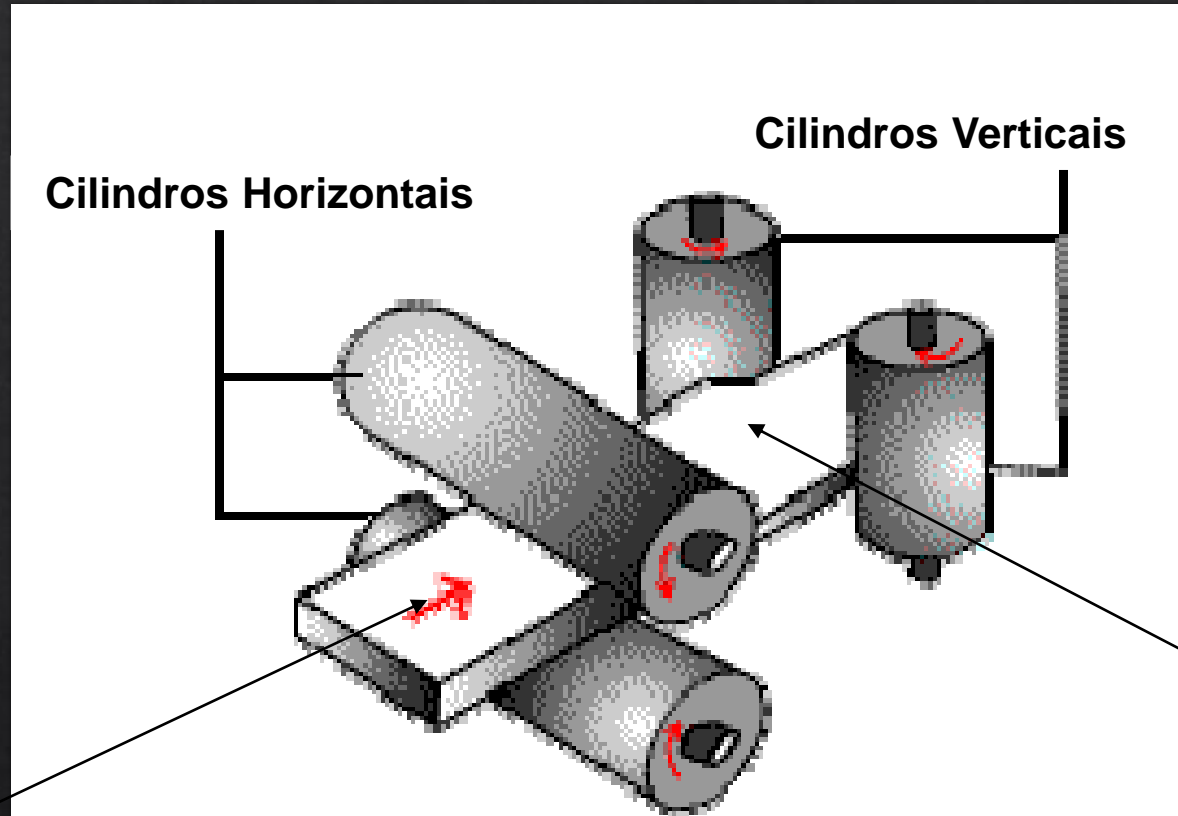
Onde,

A_0 = área original da seção reta antes da trefilação e

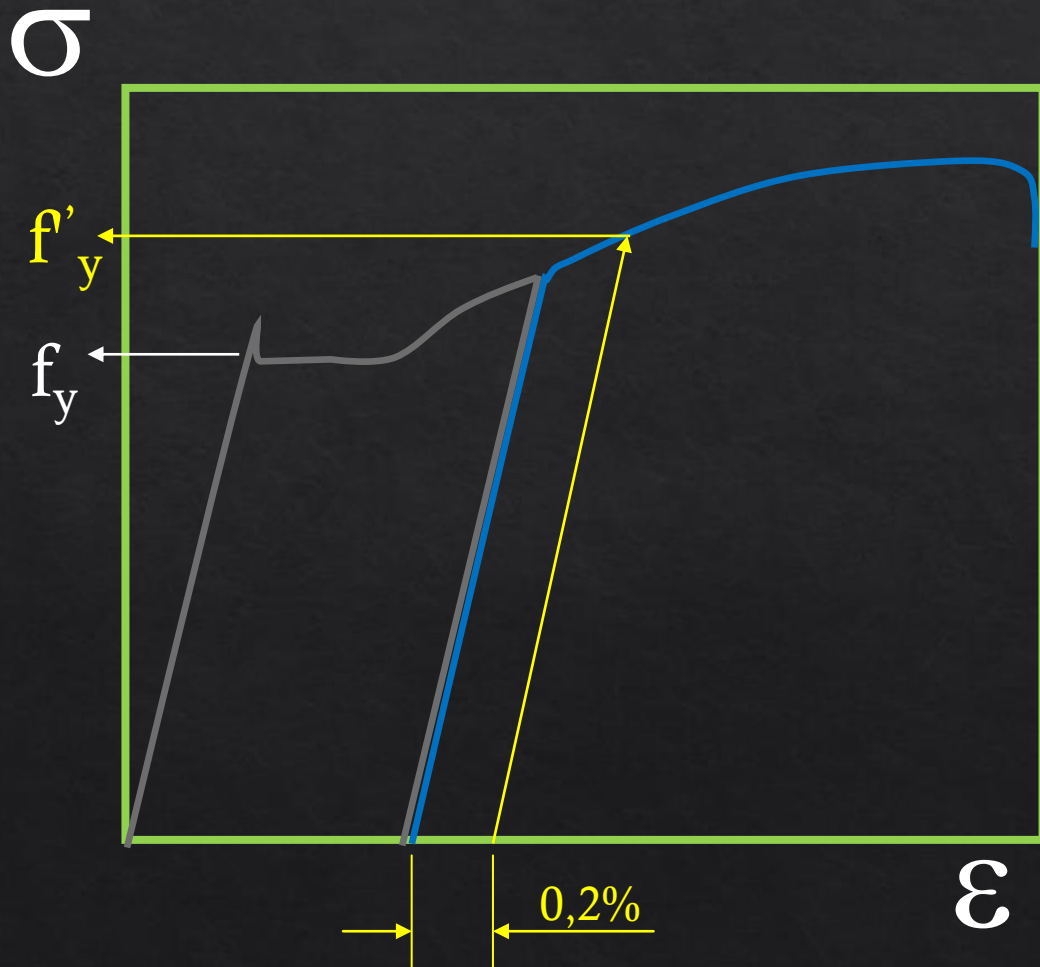
A_d = área reduzida da seção reta após a trefilação



Encruamento



Ganho de f_y com encruamento



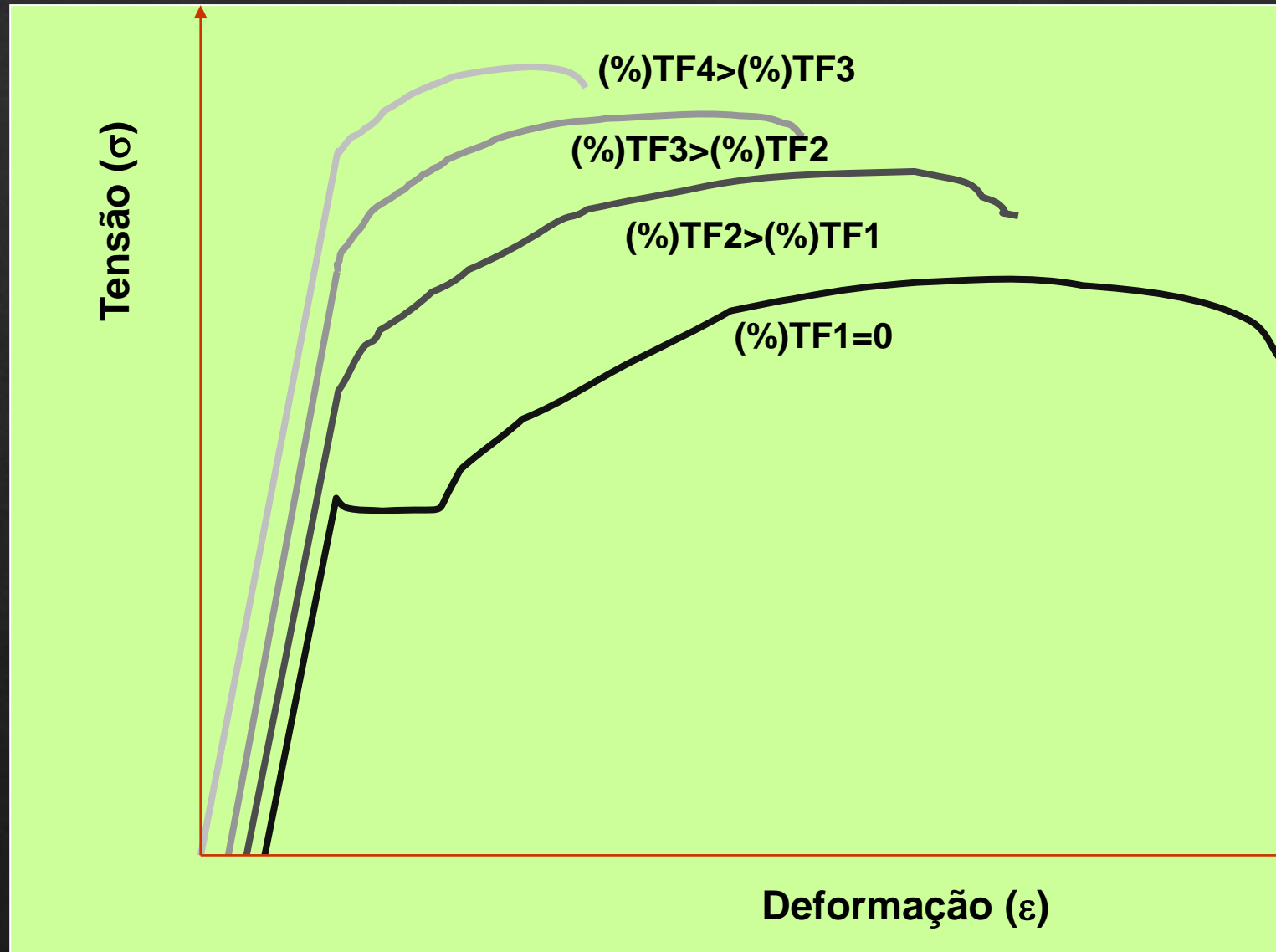
- Elevação do limite elástico → aumento da capacidade de trabalho.

- Amplia o potencial de um aço de micro-estrutura não refinada

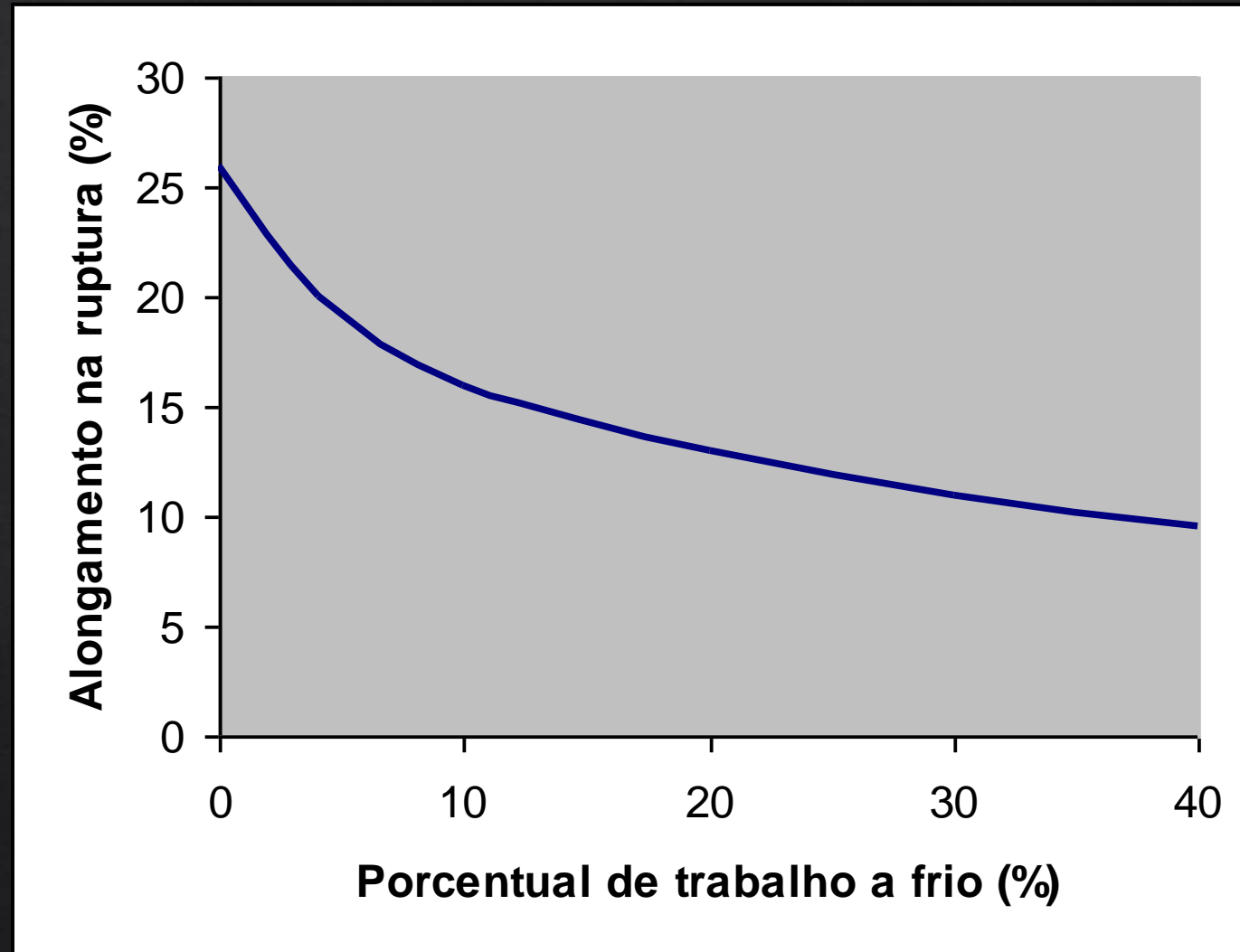
- Ligeiro aumento na resistência mecânica.

$f''_y =$ tensão convencional de escoamento

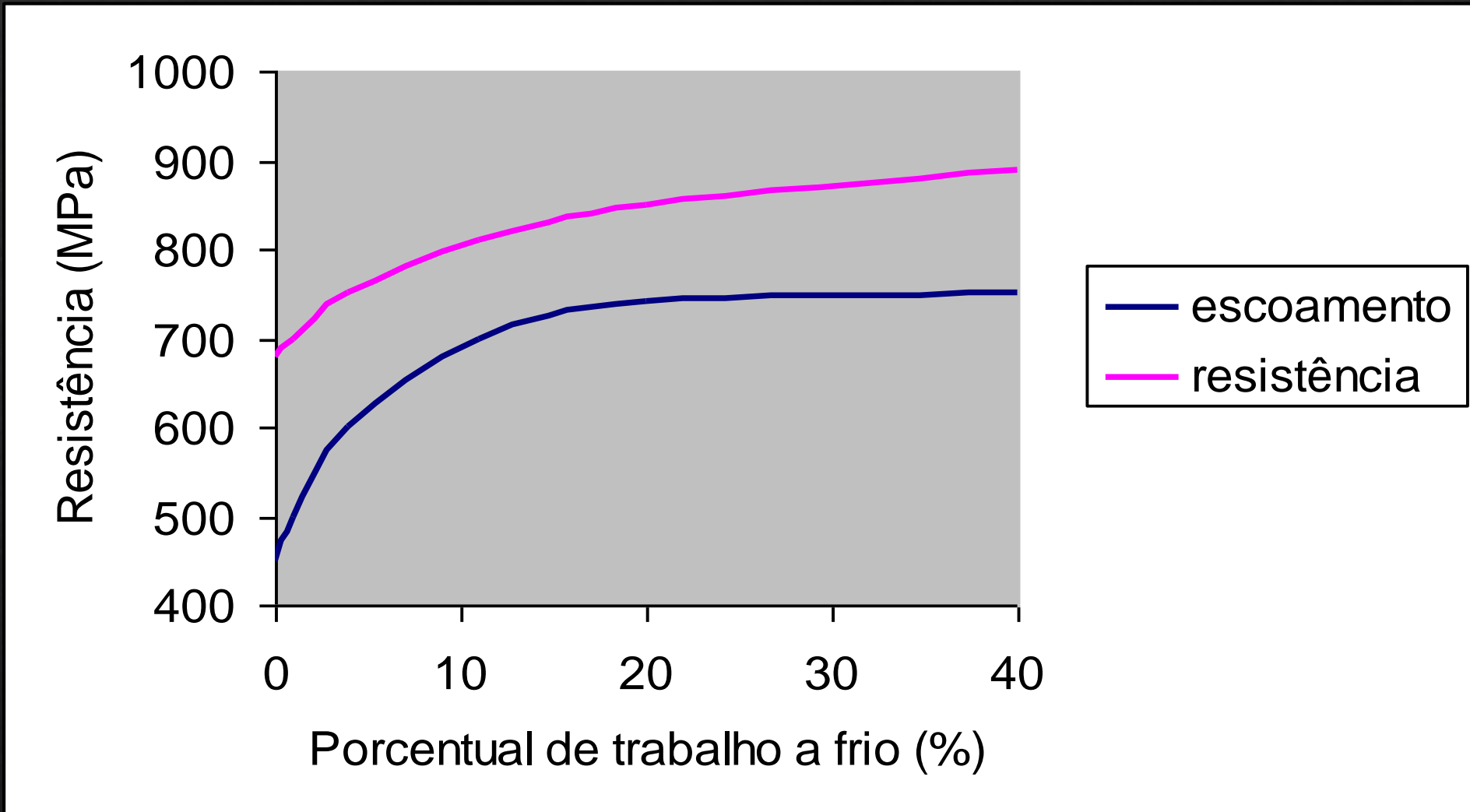
Efeito do encruamento no comportamento do aço



Efeito do encruamento no comportamento do aço



Efeito do encruamento no comportamento do aço



Comentários finais

- ◆ As discussões realizadas nesta aula correspondem a aplicação de esforços de curta duração.
- ◆ Há ainda que se preocupar com a deformação ao longo do tempo que é elastoplástica: fluência e relaxação.

Obrigado!