

# PLASTICIDADE

---

Antonio Figueiredo & Renata Monte

# Objetivos da aula:

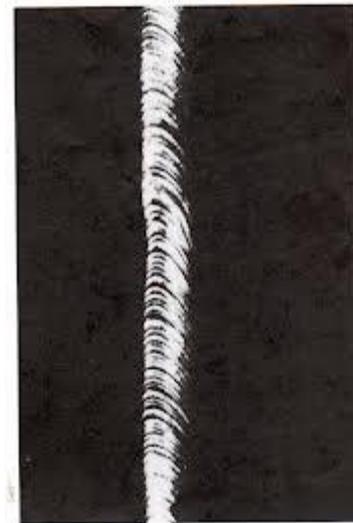
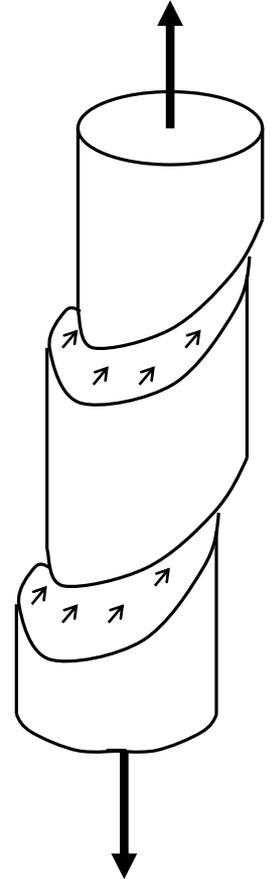
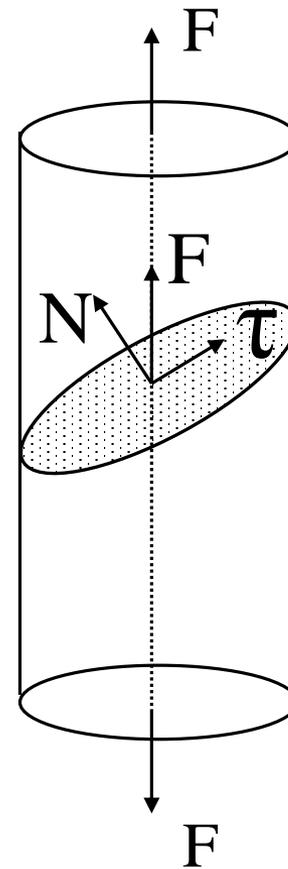
- Apresentar como ocorrem as deformações plásticas nos metais e polímeros a partir de sua microestrutura.
- Discutir a importância dos principais aspectos de microestrutura na deformação plástica dos metais e polímeros termoplásticos
- Discutir a importância da temperatura na deformação plástica dos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

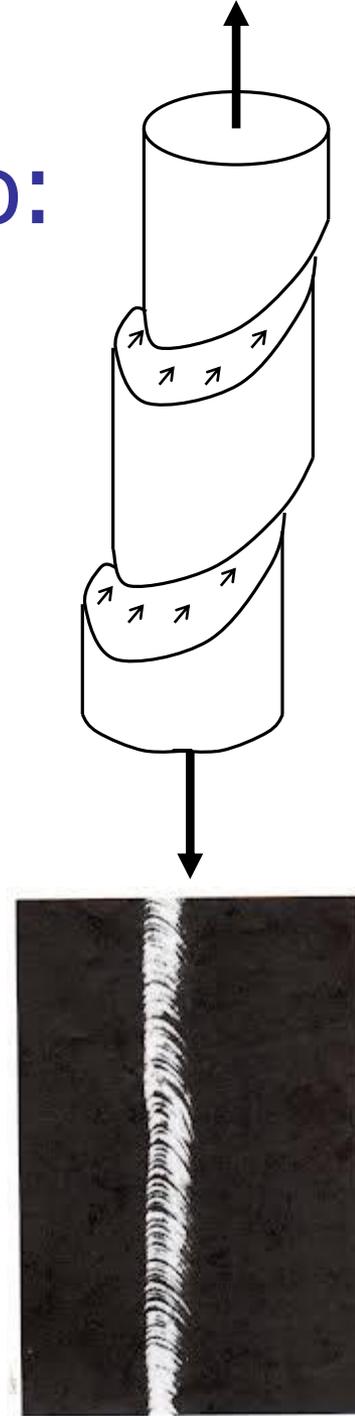
# Microplasticidade no cristal metálico

- Deformação plástica:
  - escorregamento devido a esforços cortantes: mais comum
  - geminação



# 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

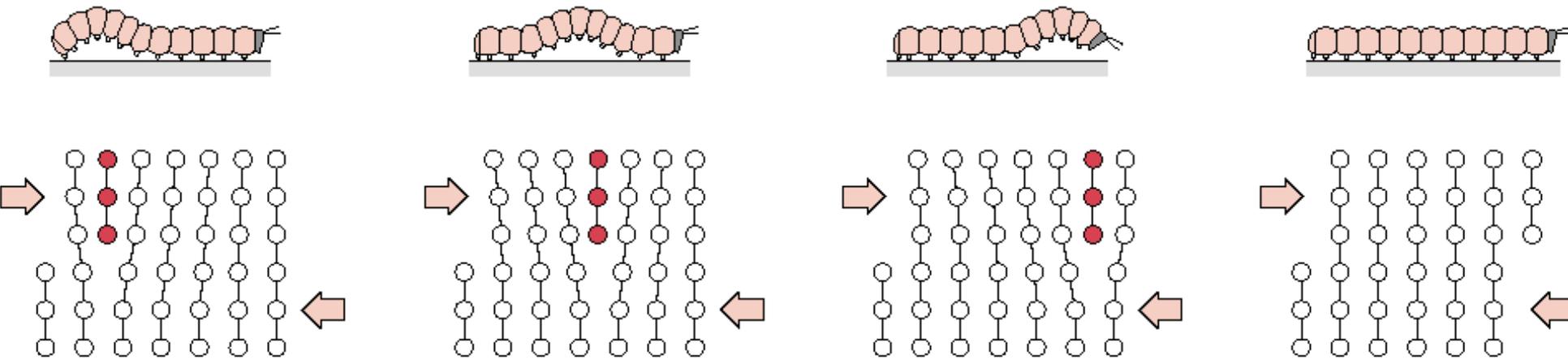


# Escorregamento de planos cristalinos

- 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

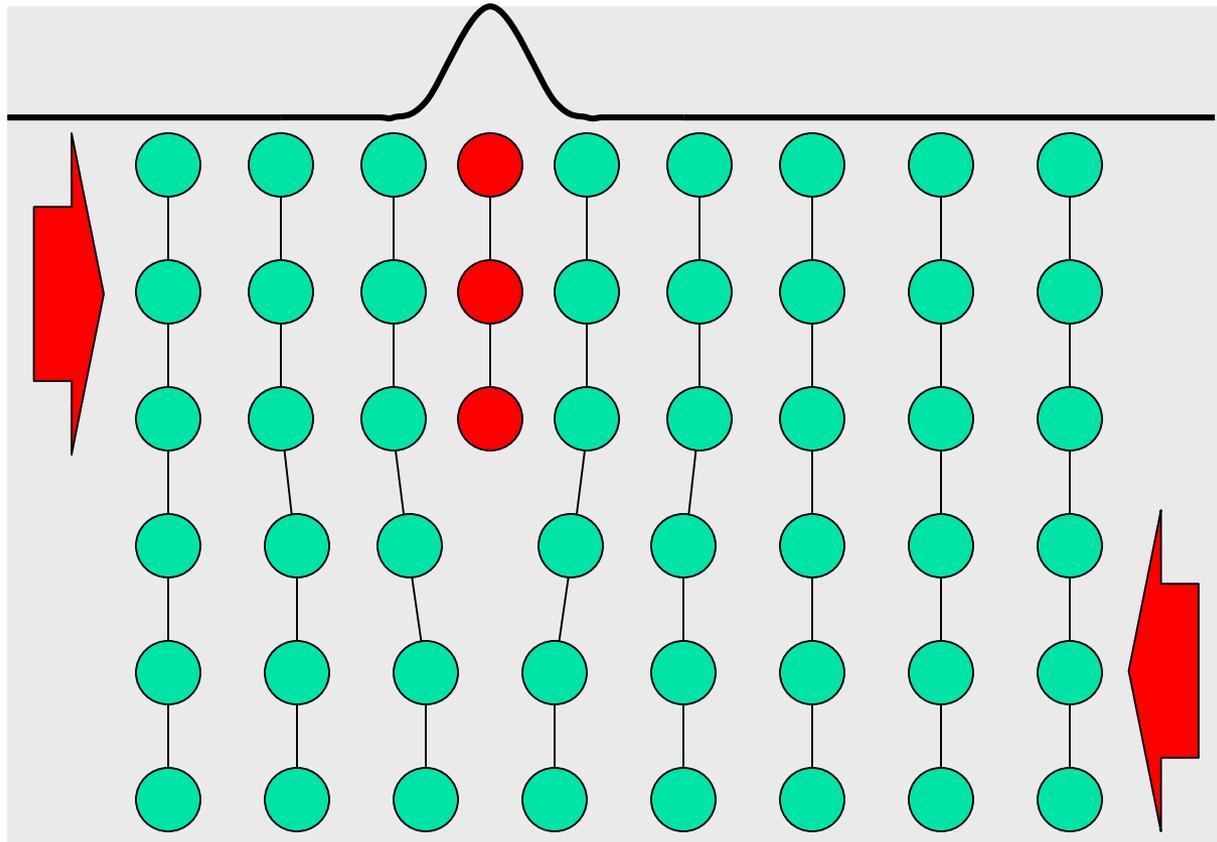


# Movimento da lagarta

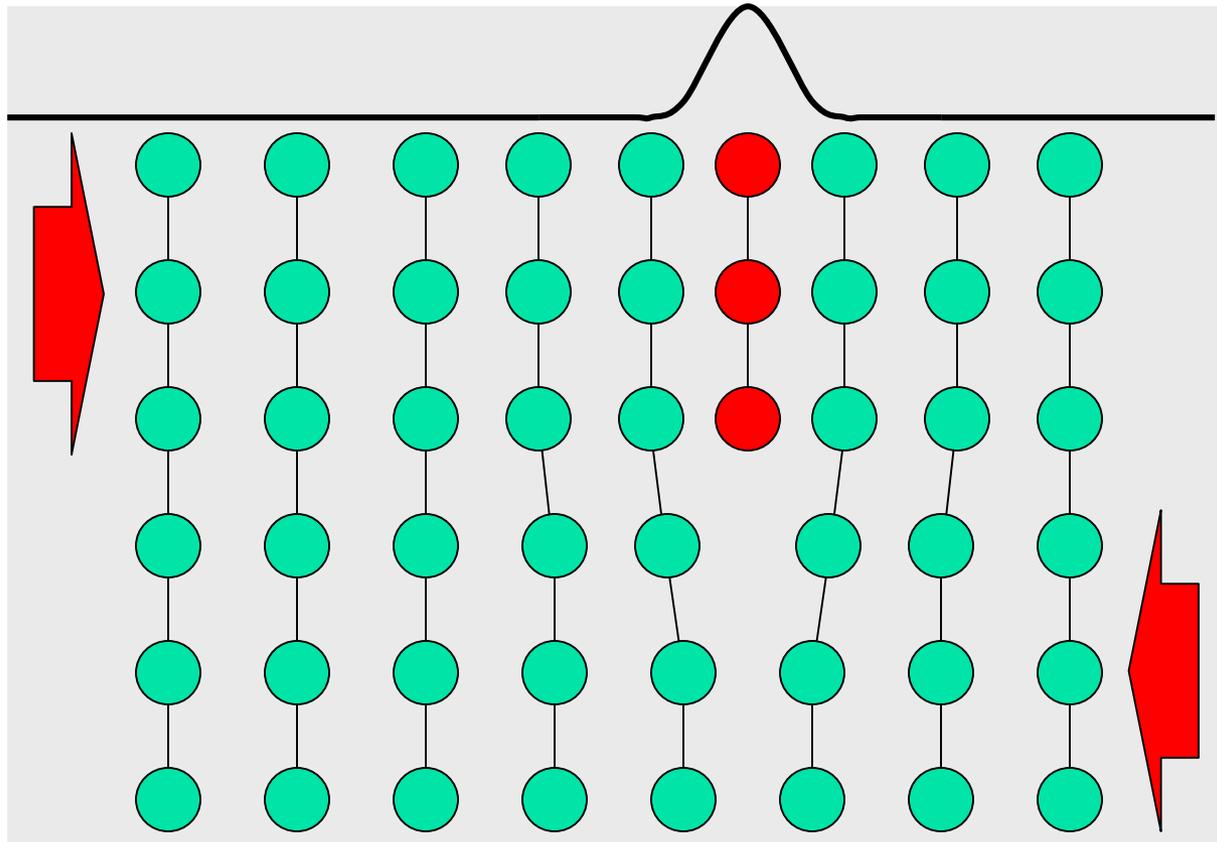


A lagarta quando se desloca concentra a tensão em um único ponto do corpo.

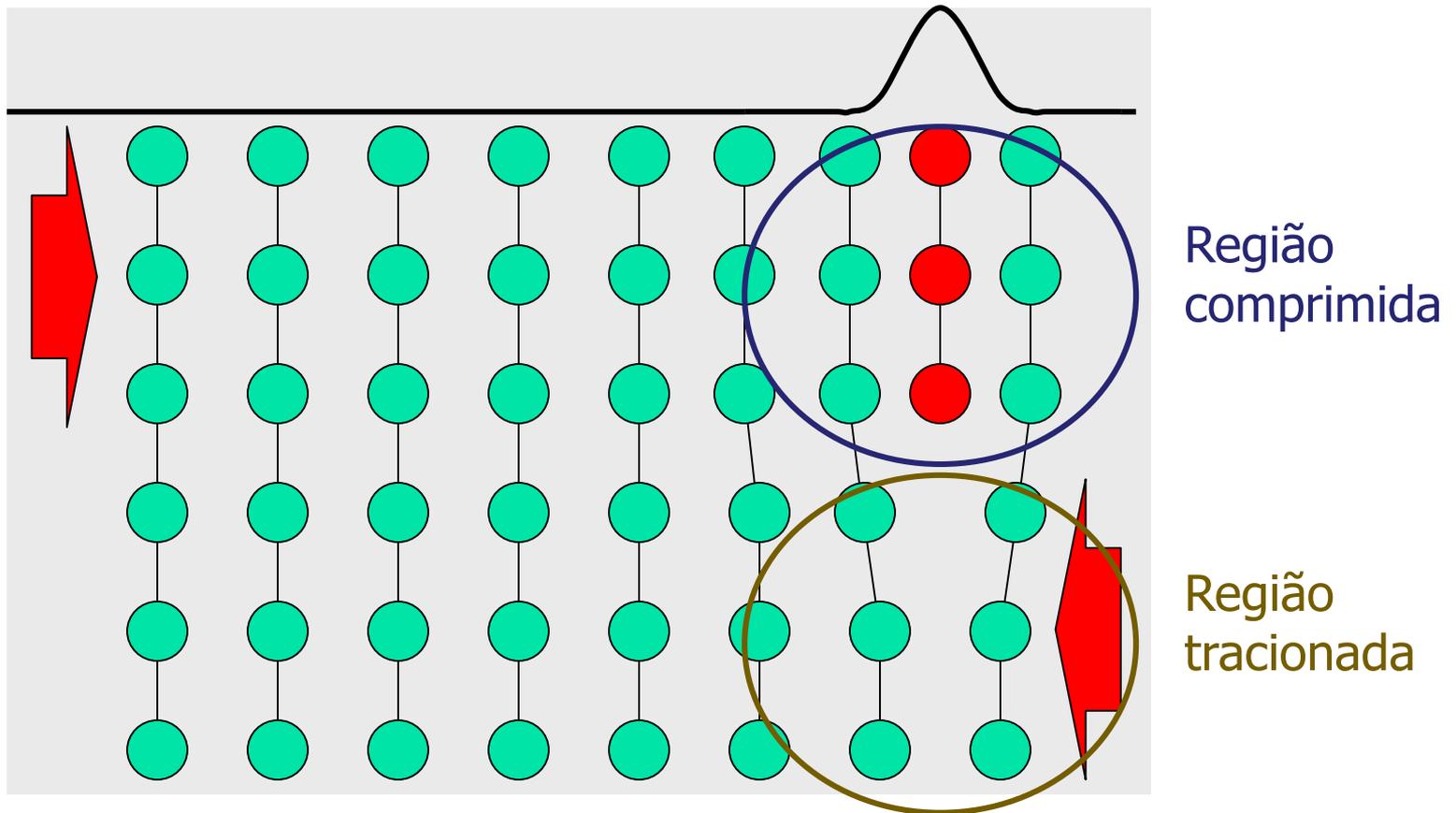
# Movimento de discordância → deformação plástica



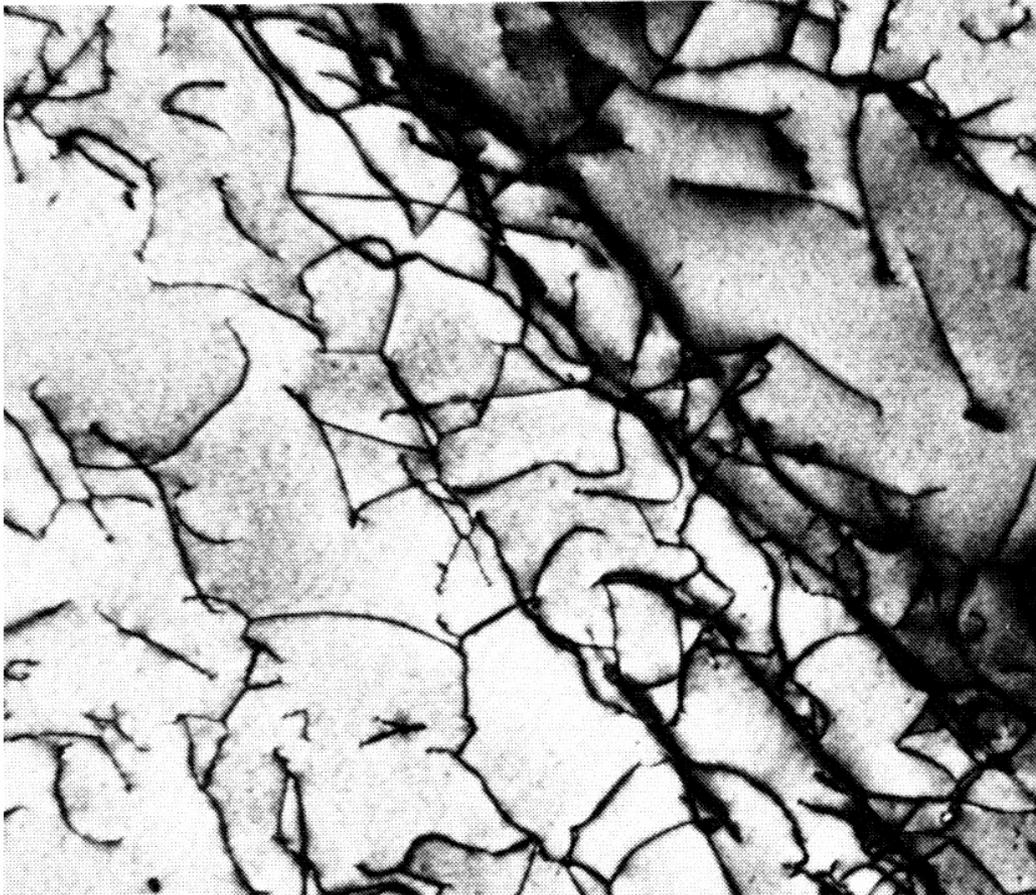
# Movimento de discordância → deformação plástica



# 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



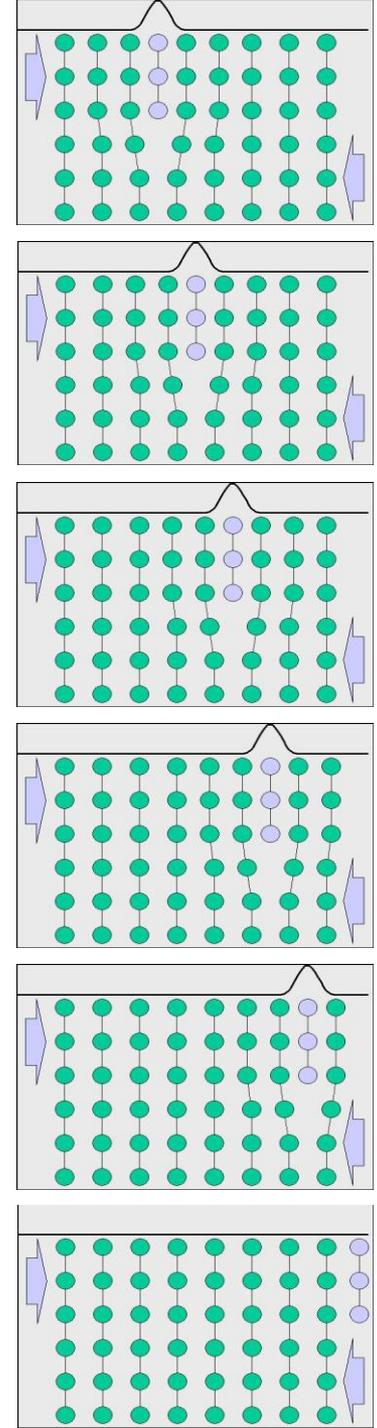


# PARÂMETROS DA MICROESTRUTURA QUE INFLUENCIAM A DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS

# Deformação plástica dos metais

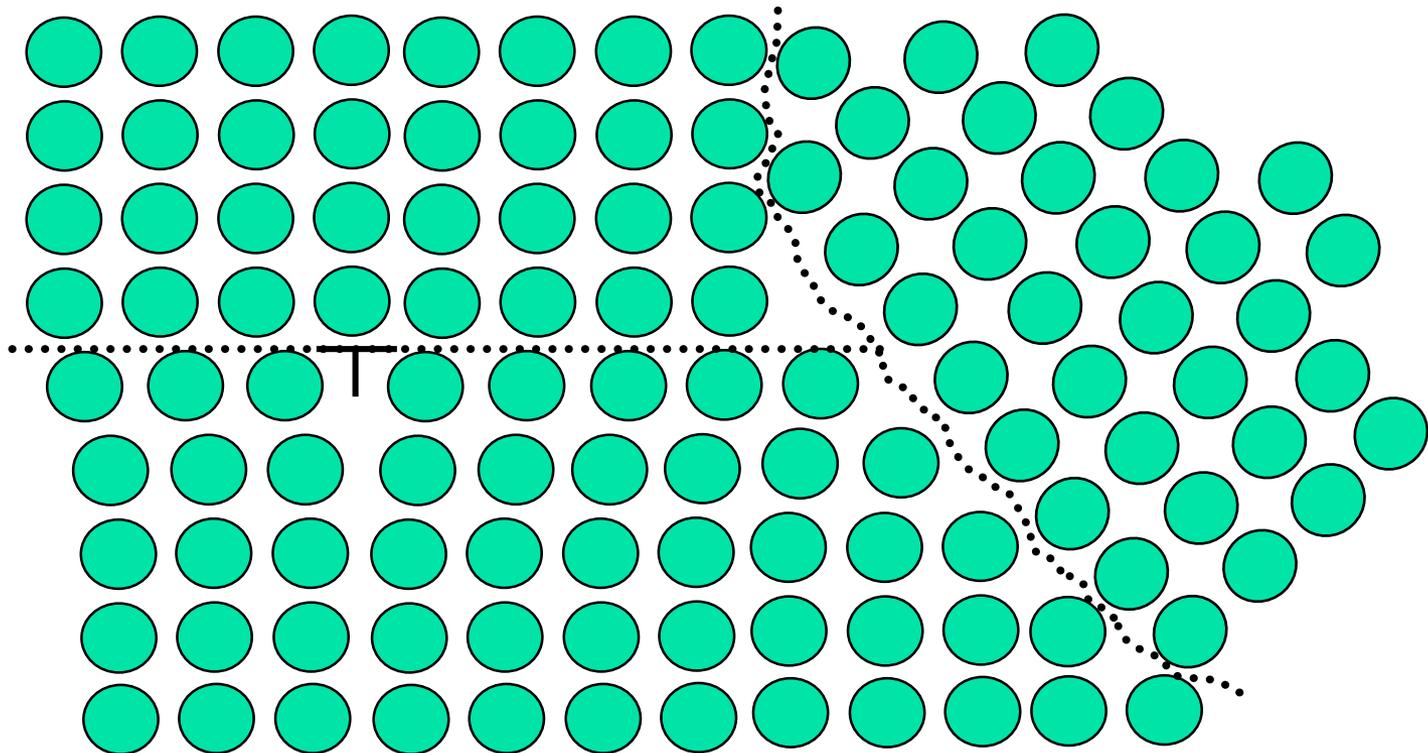
**Maneiras de diminuir a deformação plástica (bloqueio de movimento de discordâncias):**

- **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)**



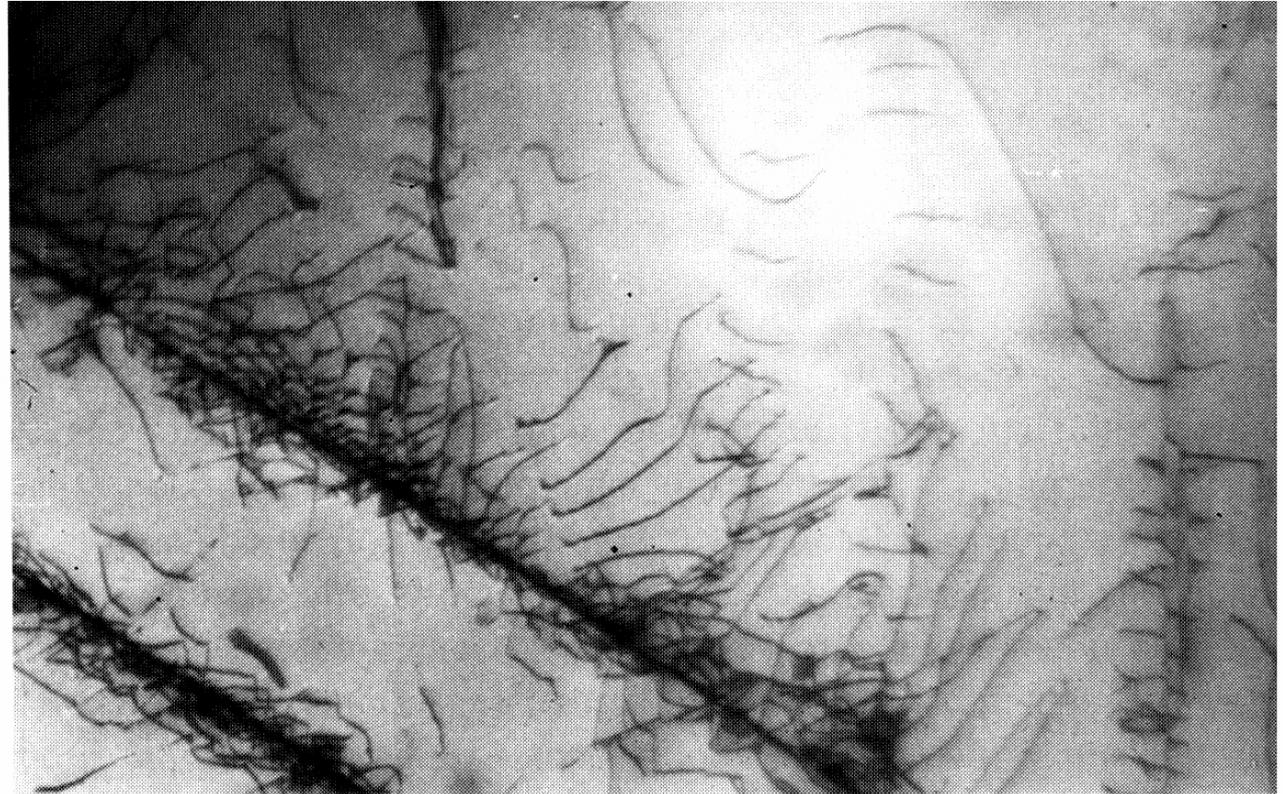
# Deformação plástica dos metais

- Contornos agem como barreiras à progressão dos deslocamentos



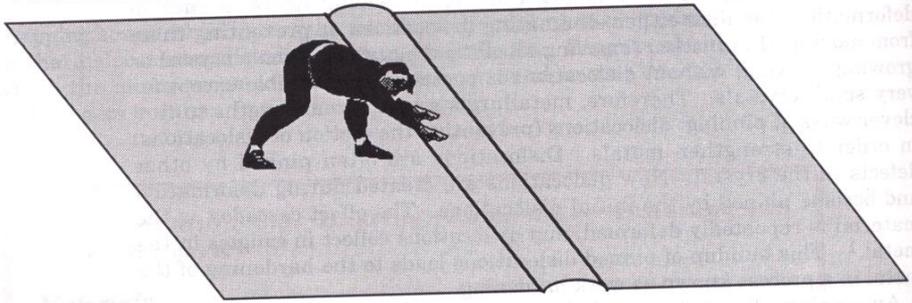
# Observação de discordâncias em MET

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



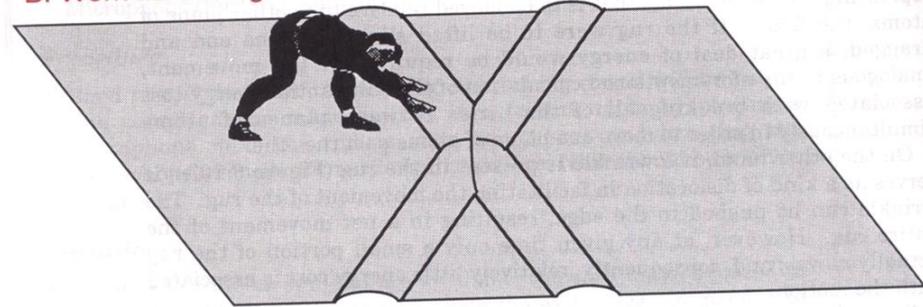
# Interação do movimento de discordâncias: analogia com o movimento do tapete

A. Dislocation



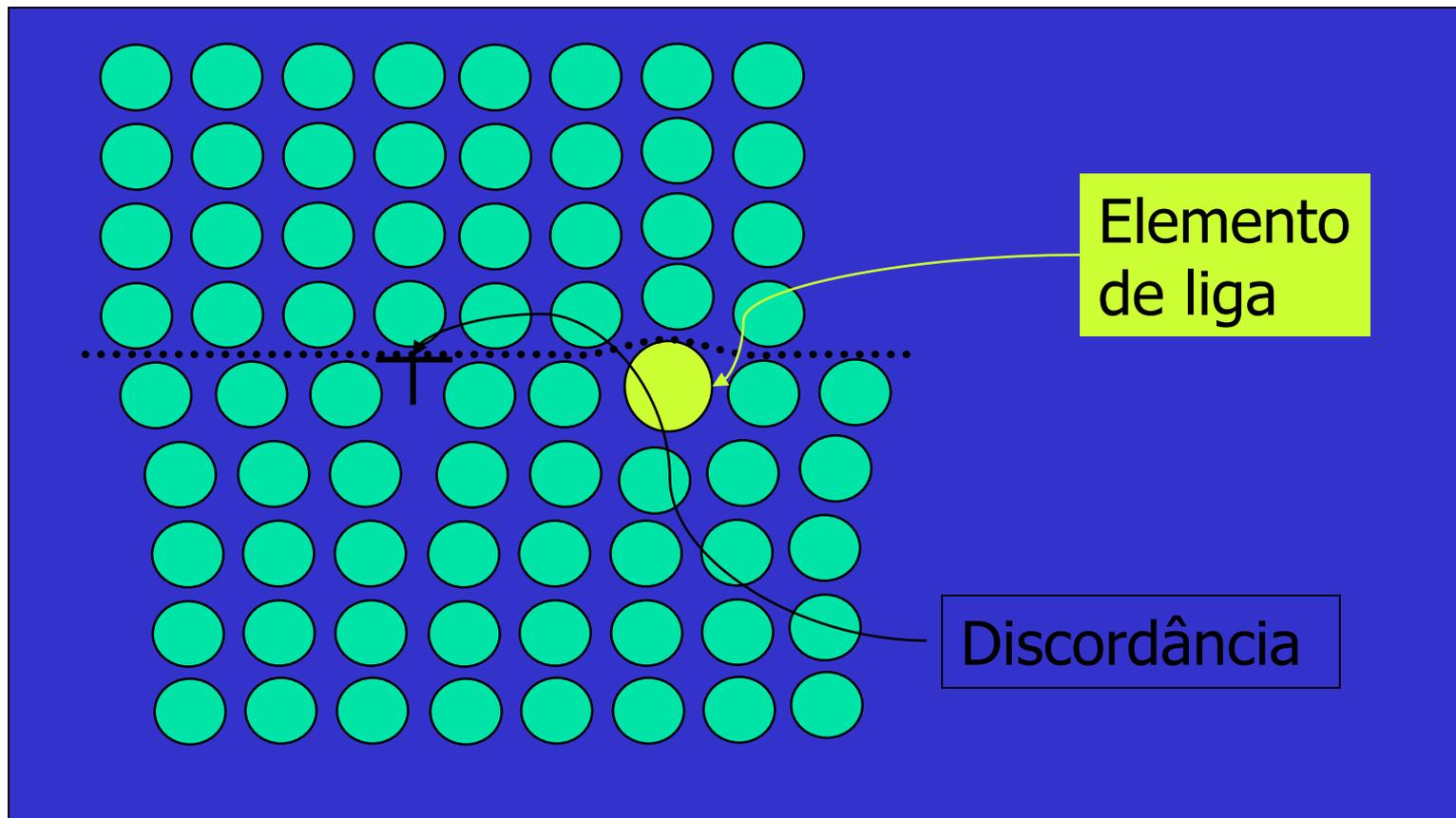
**Patamar de escoamento com liberdade de movimento da dobra**

B. Work hardening

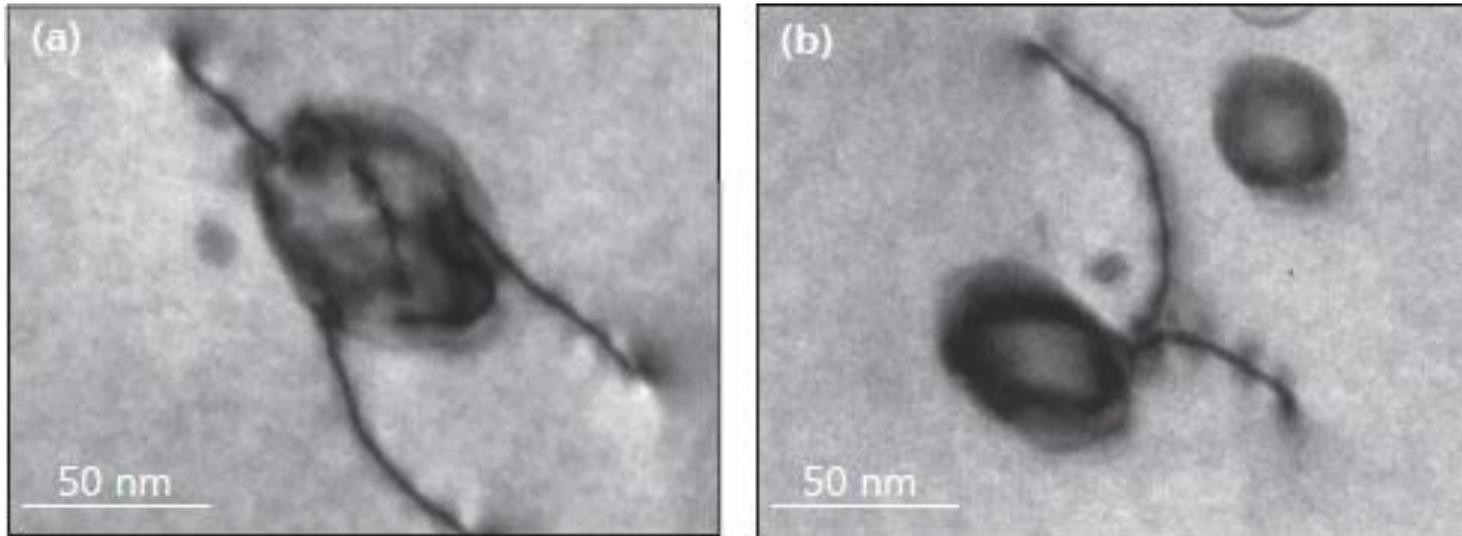


**Encruamento obtido com a interação progressiva das discordâncias : a tensão deve aumentar para gerar deslocamento**

# Influência de compostos dificultadores de escorregamentos



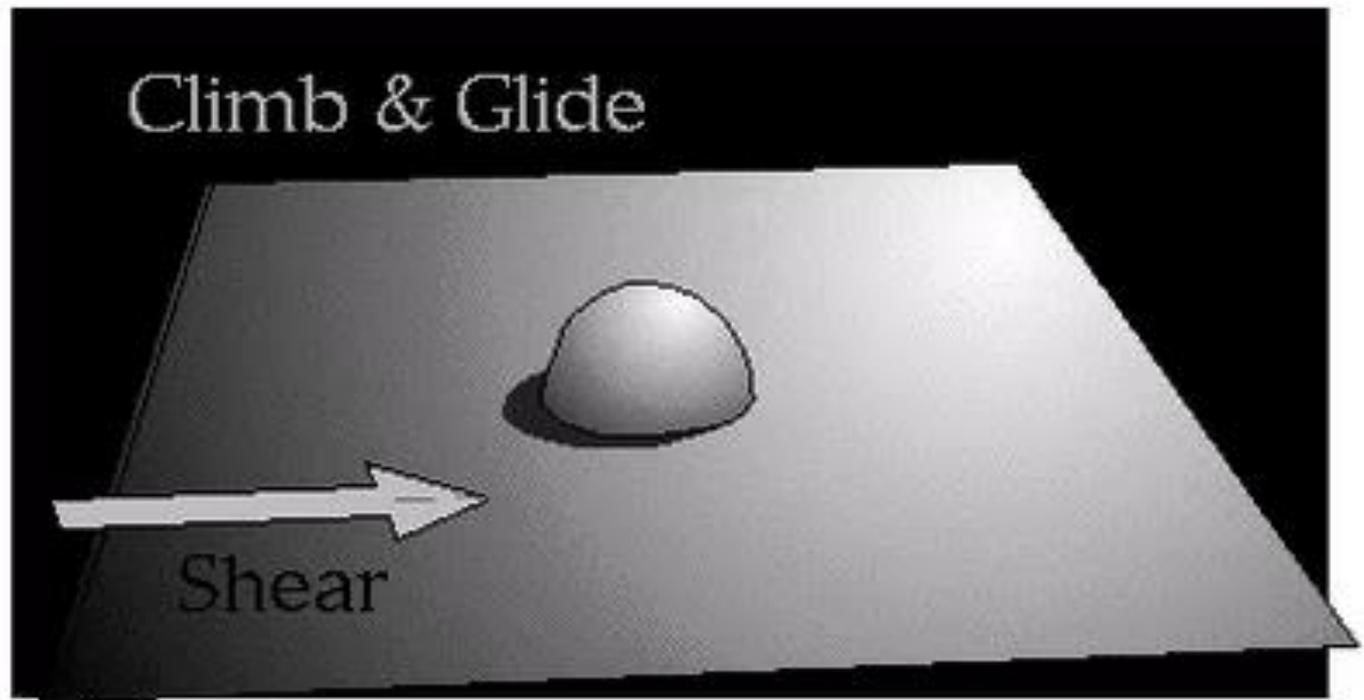
# “Subida da discordância”



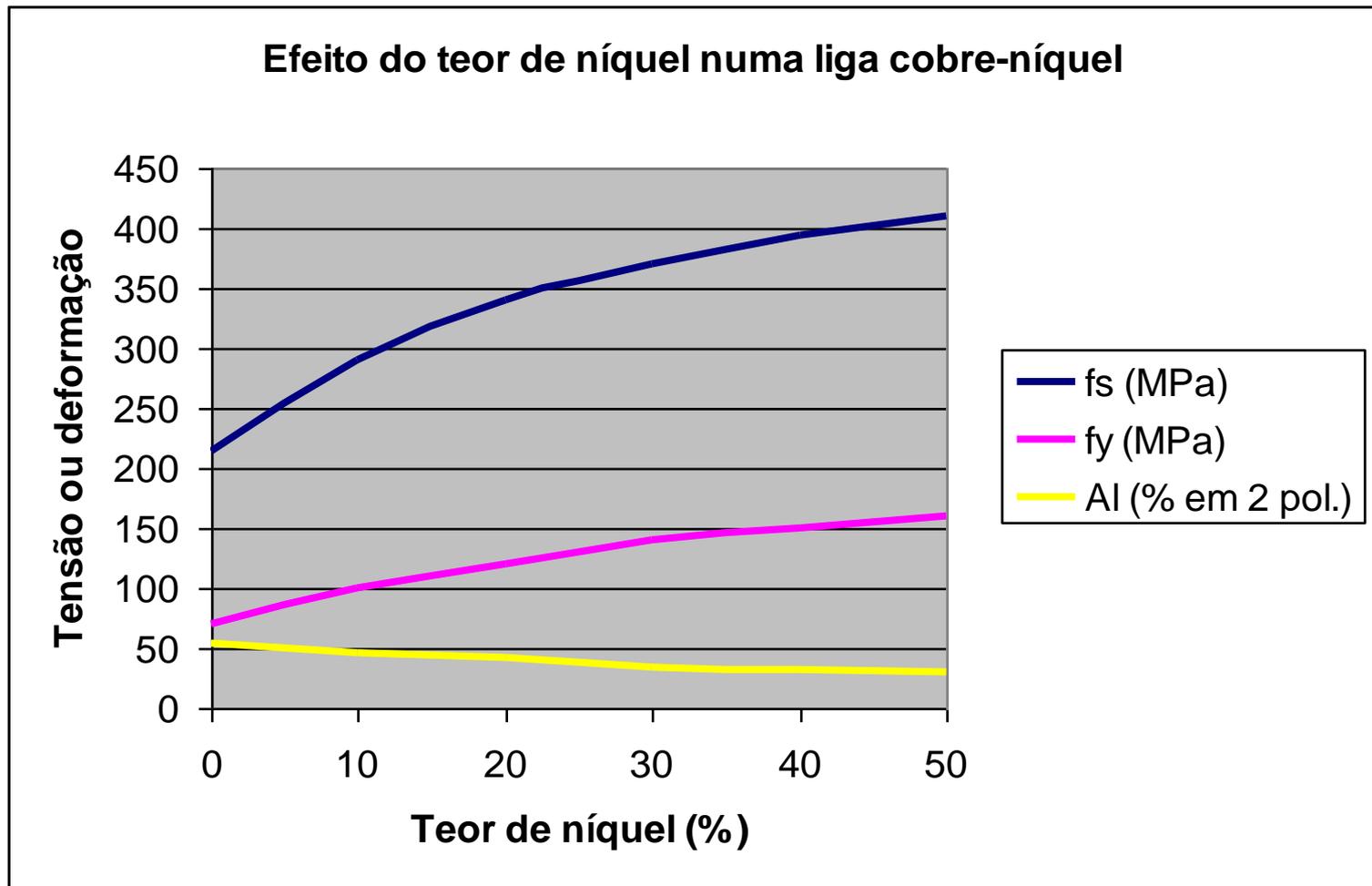
(a) Escalada de discordâncias sobre uma partícula de óxido;  
(b) retenção da parte traseira de uma discordância na interface matriz / partícula

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

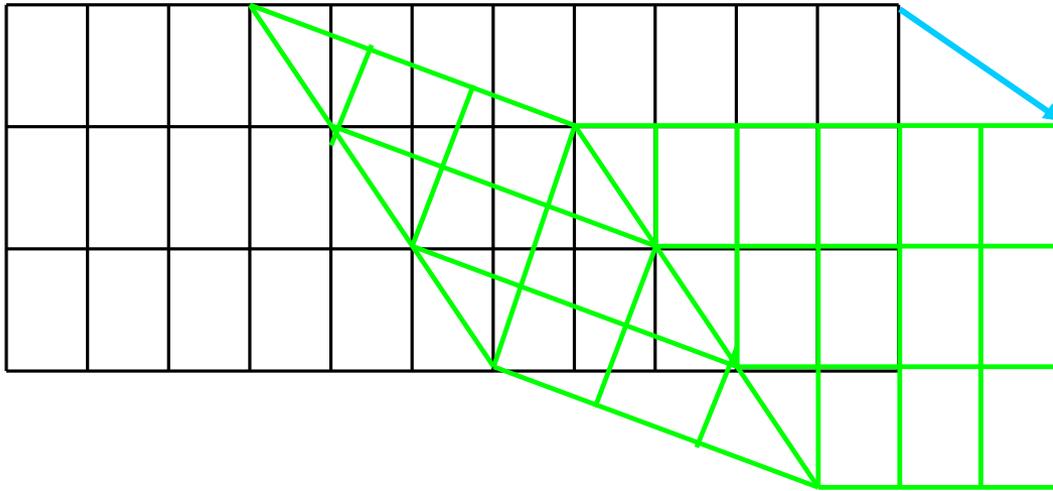
# Subida de elemento de liga



# Influência de compostos dificultadores de escorregamentos

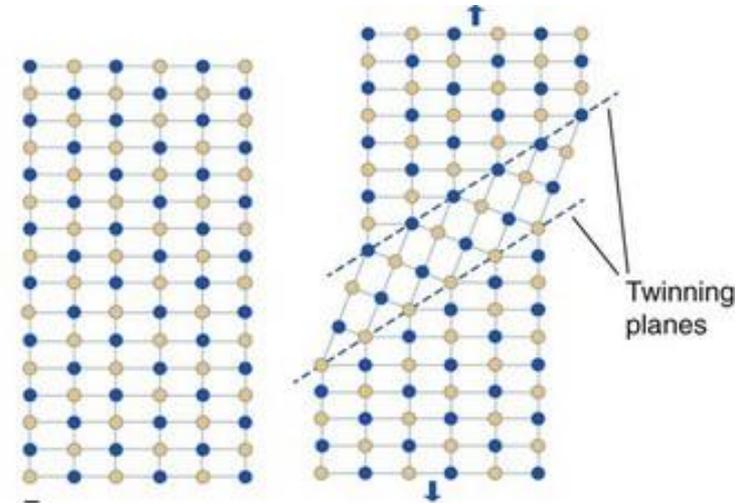


# Geminação ou maclagem



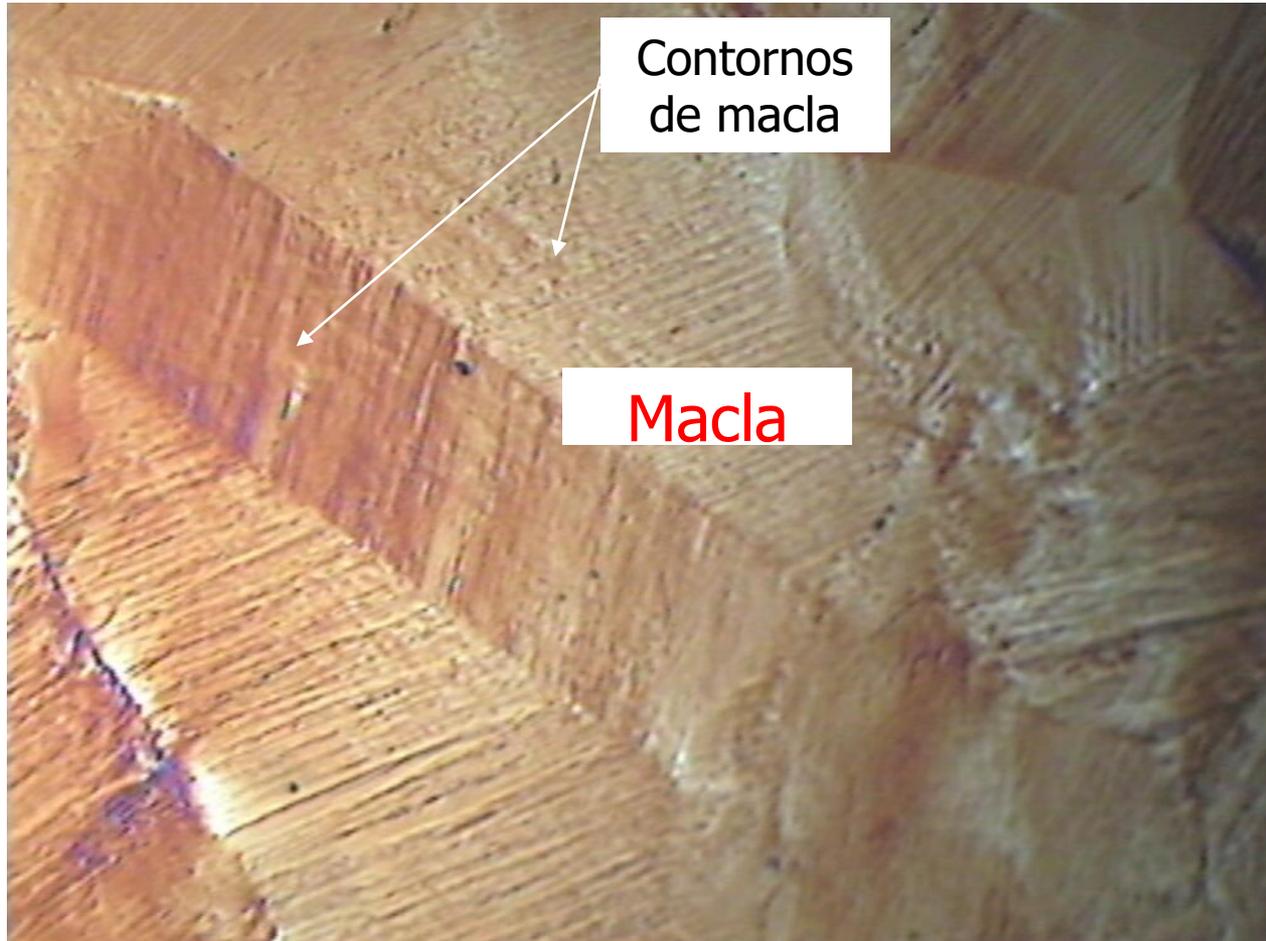
Outra possibilidade de produção de deformação em metais cristalinos sem escorregamento de discordâncias.

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



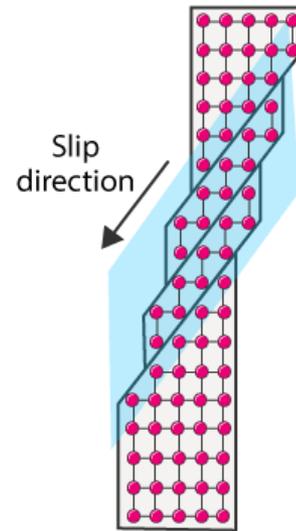
Jéssica  
Bragatti



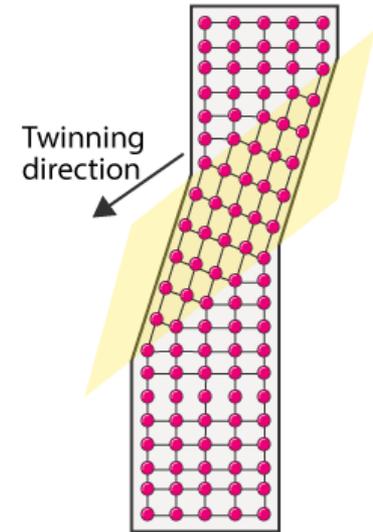
[https://www.youtube.com/watch?v=RY9X\\_08is-k](https://www.youtube.com/watch?v=RY9X_08is-k)

# 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.

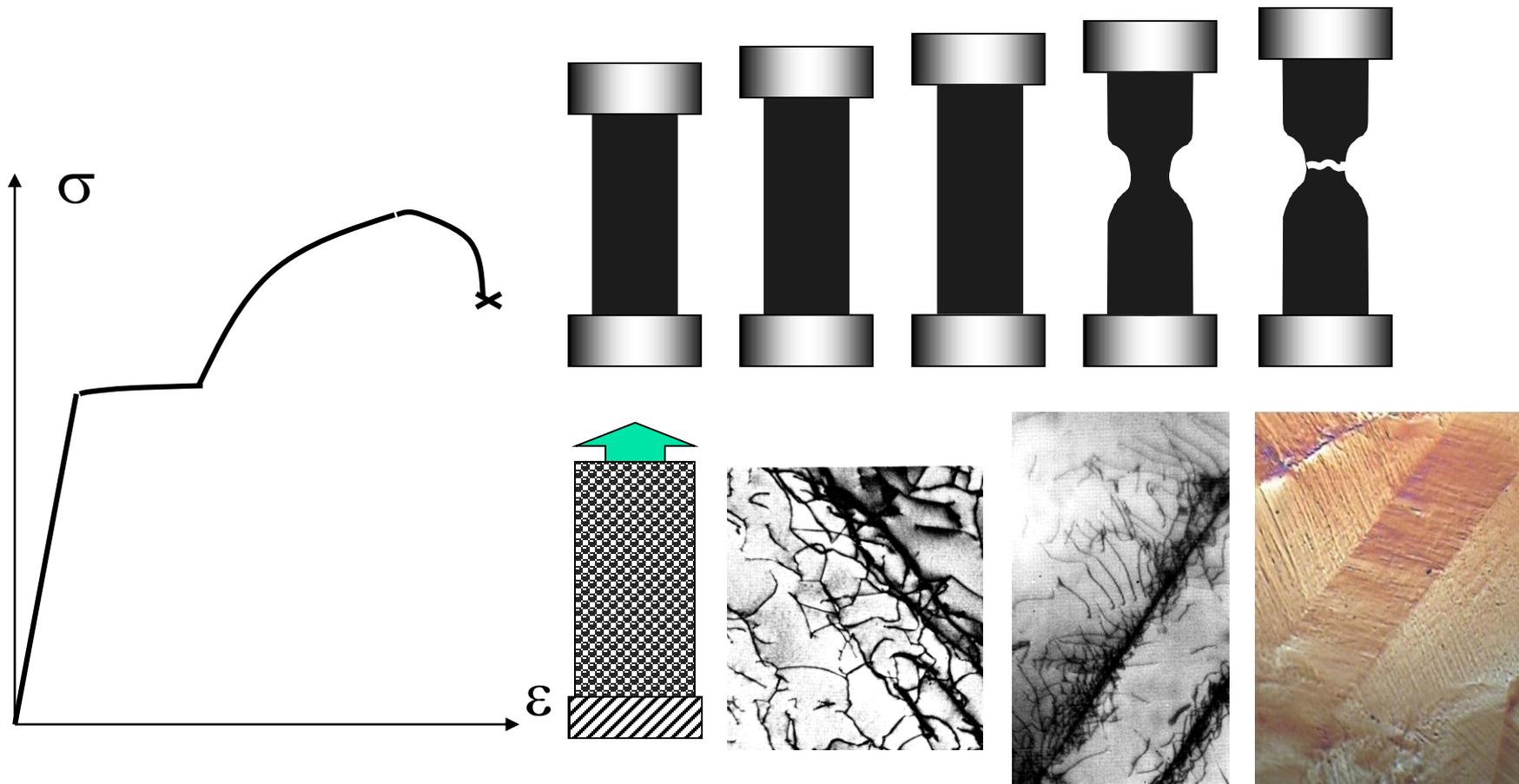


(a) Slip

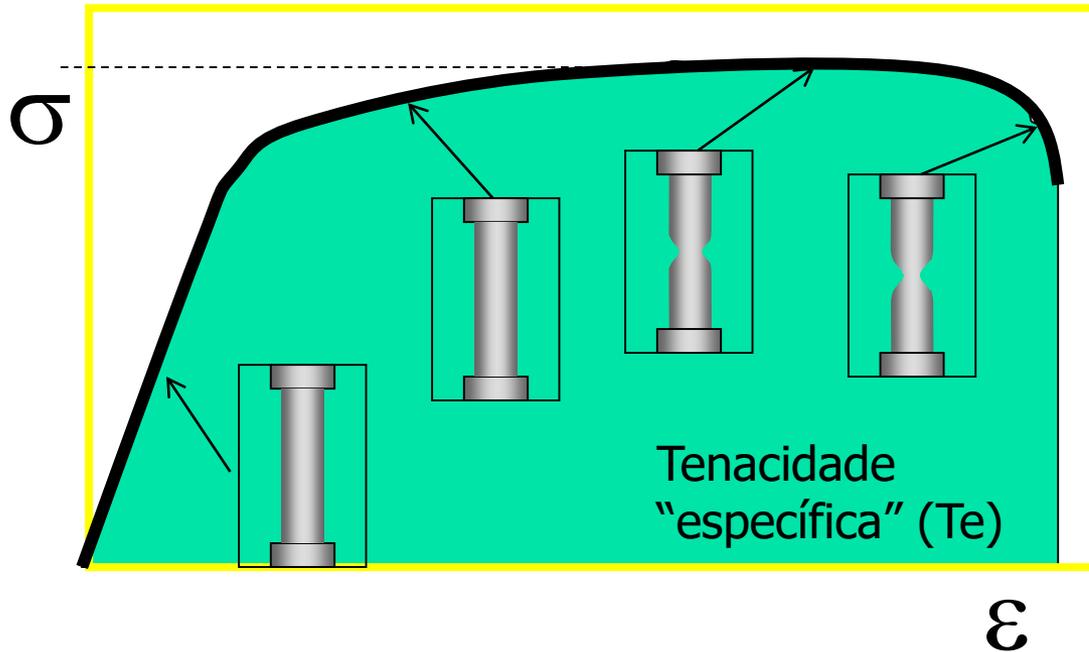


(a) Twinning

# Comportamento mecânico dos metais



# Dinâmica das deformações plásticas



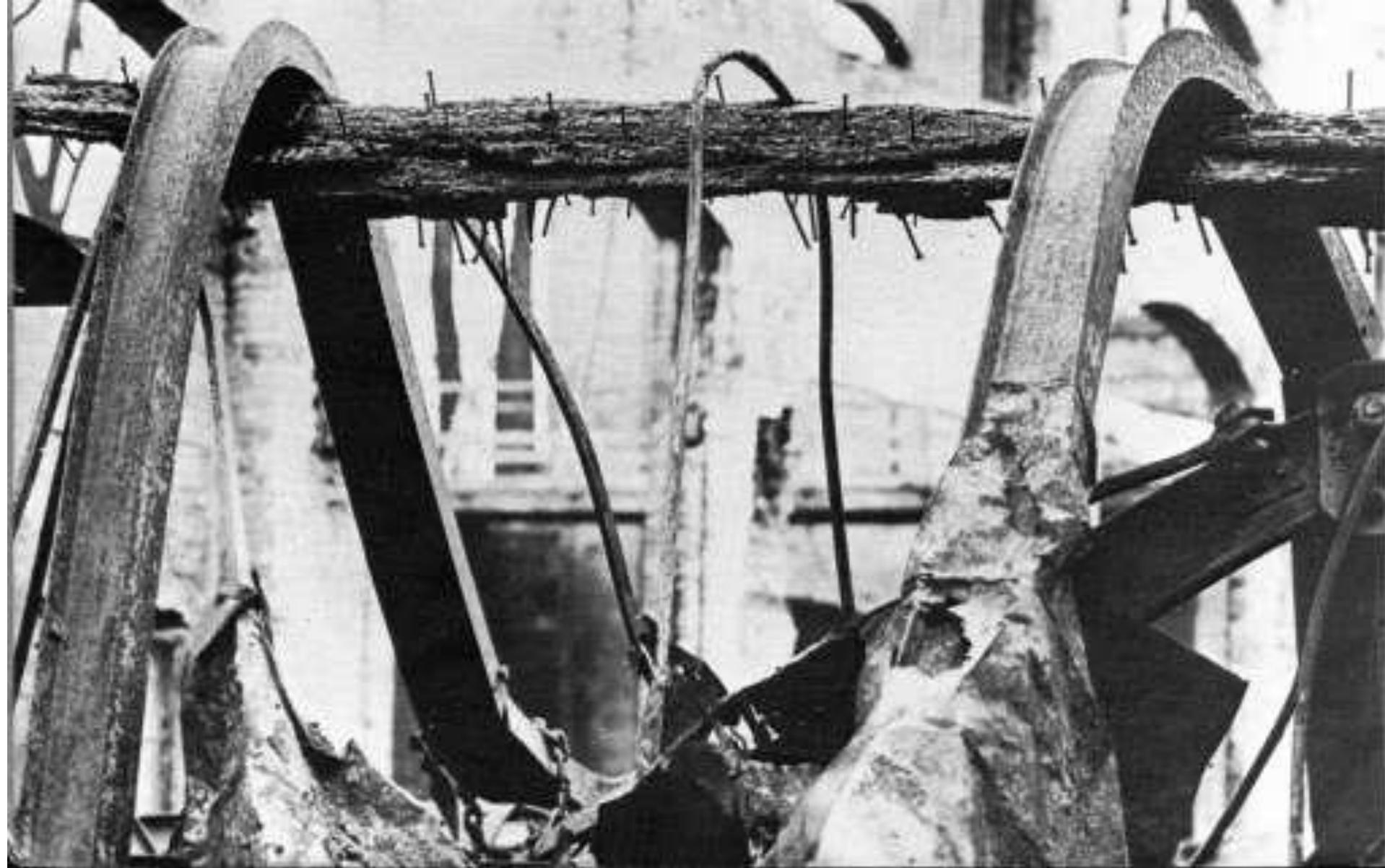
$$T_e = \sigma \epsilon$$

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

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

# Material policristalino deformado plasticamente

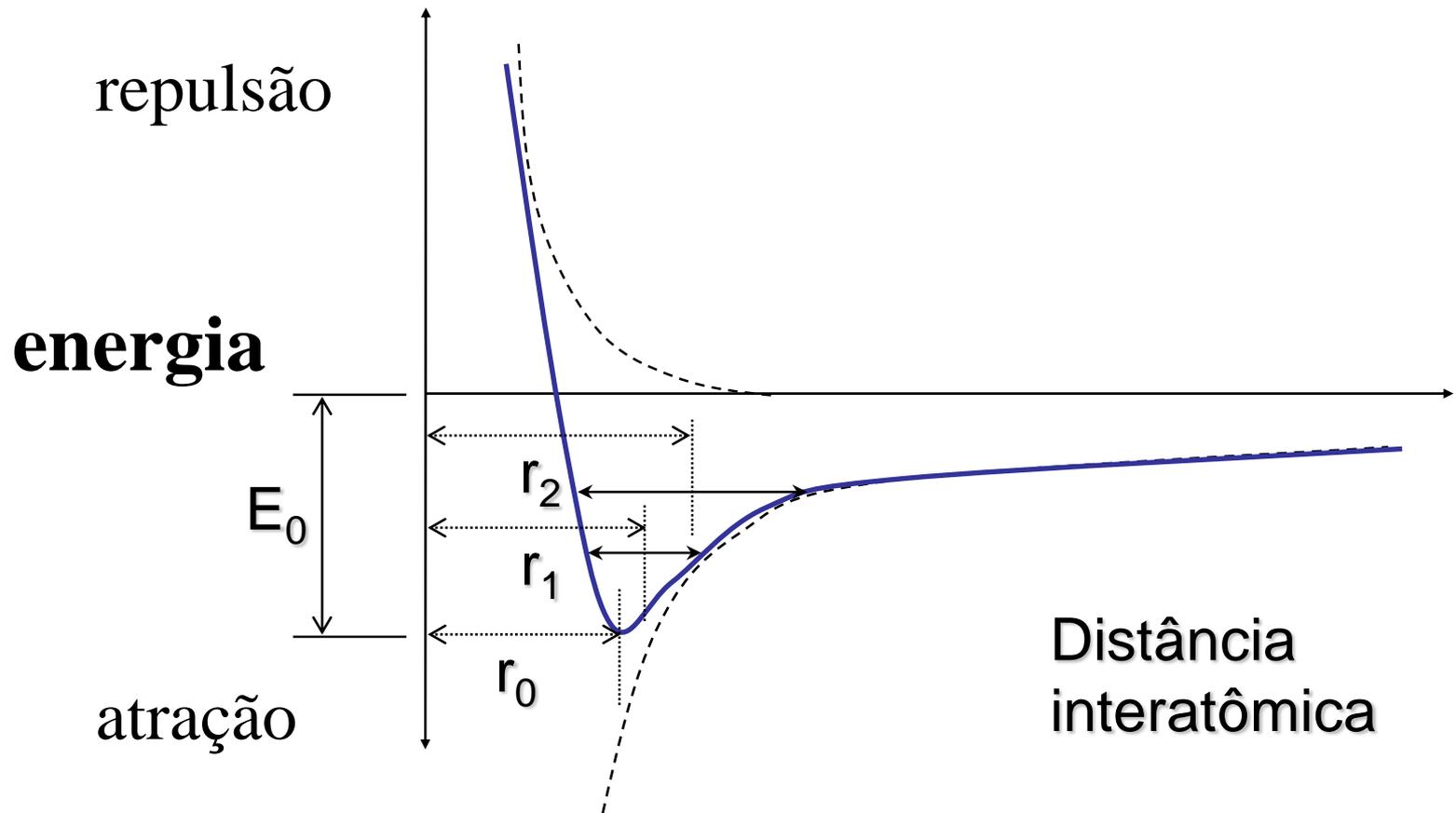
- Deformações plásticas dificultam outras novas  
⇒ material mais resistente e frágil
- É função de:
  - Tempo e velocidade de aplicação da carga (próximas aulas)
  - Temperatura
  - Tratamentos (encruamento, inserção de elemento de liga).



# 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?

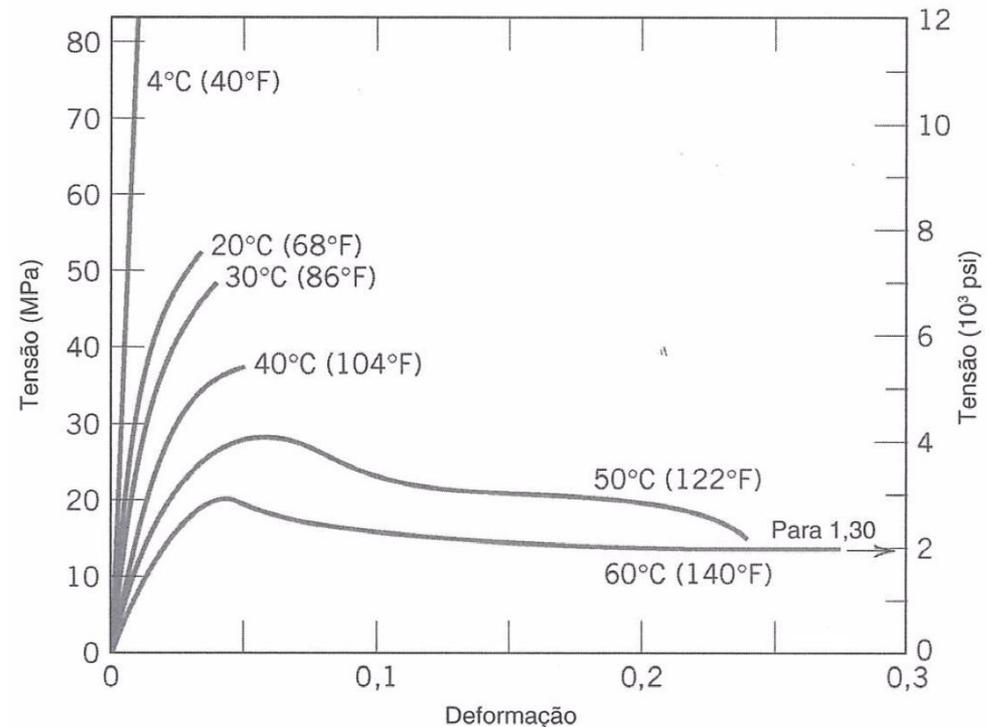


# Influência da temperatura



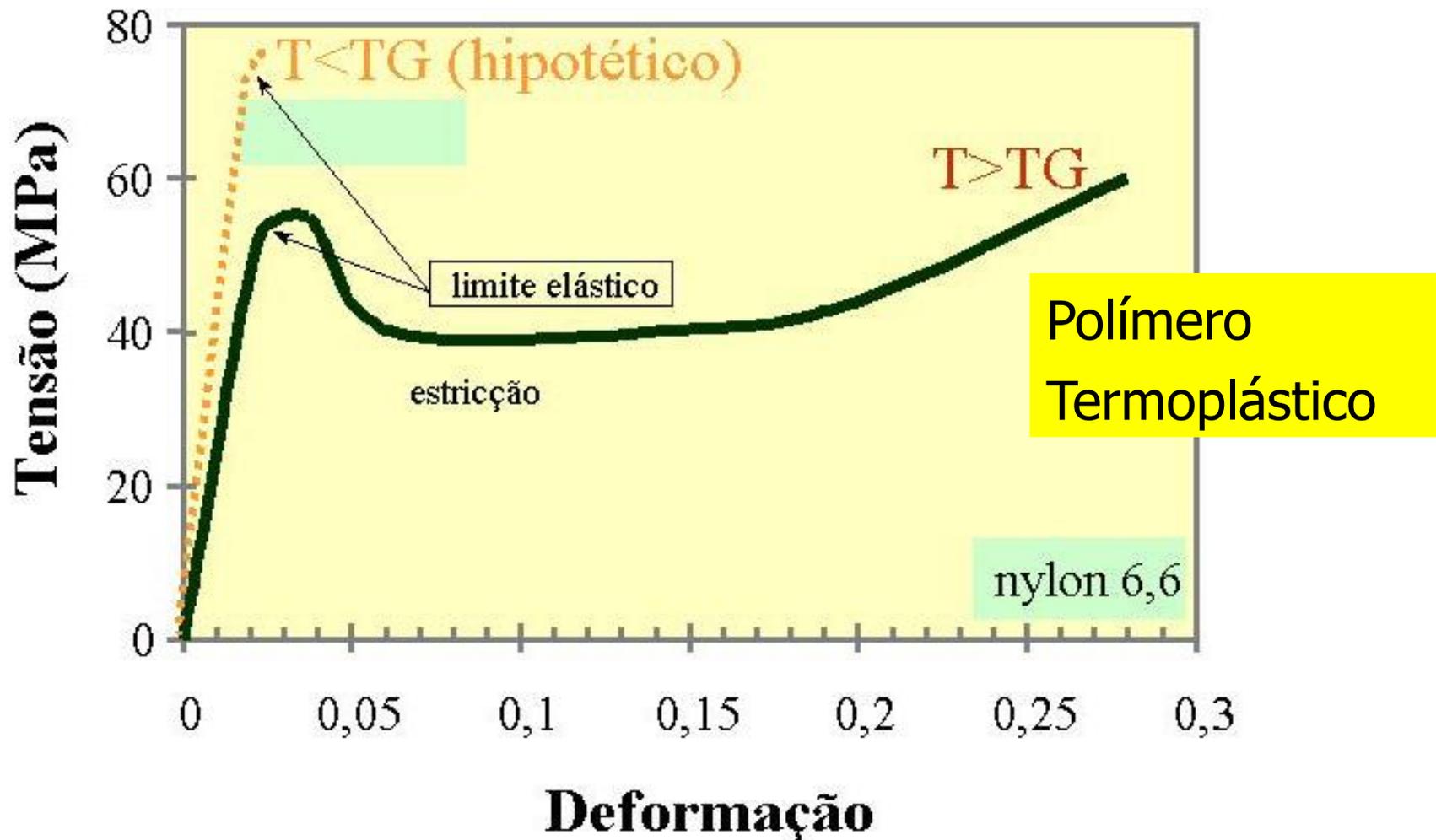
# Efeito da temperatura na plasticidade dos polímeros **termoplásticos**

- Exemplo: polímeros e a  $T_g$ .
- Comportamento dúctil para  $T^\circ\text{C} > 50^\circ\text{C}$



Influência da T no comportamento mecânico do polimetil metacrilato (Carswell, Nason, 1944, apud Callister, 2006)

# Influência da temperatura no comportamento dos polímeros



# Temperatura de transição vítrea: parâmetro fundamental para ductilidade

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

# Termoplásticos x temperatura

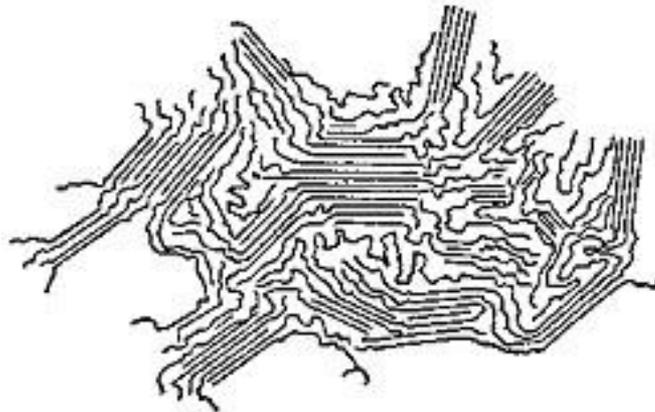
## ■ Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )

### **Abaixo da $T_g$ :**

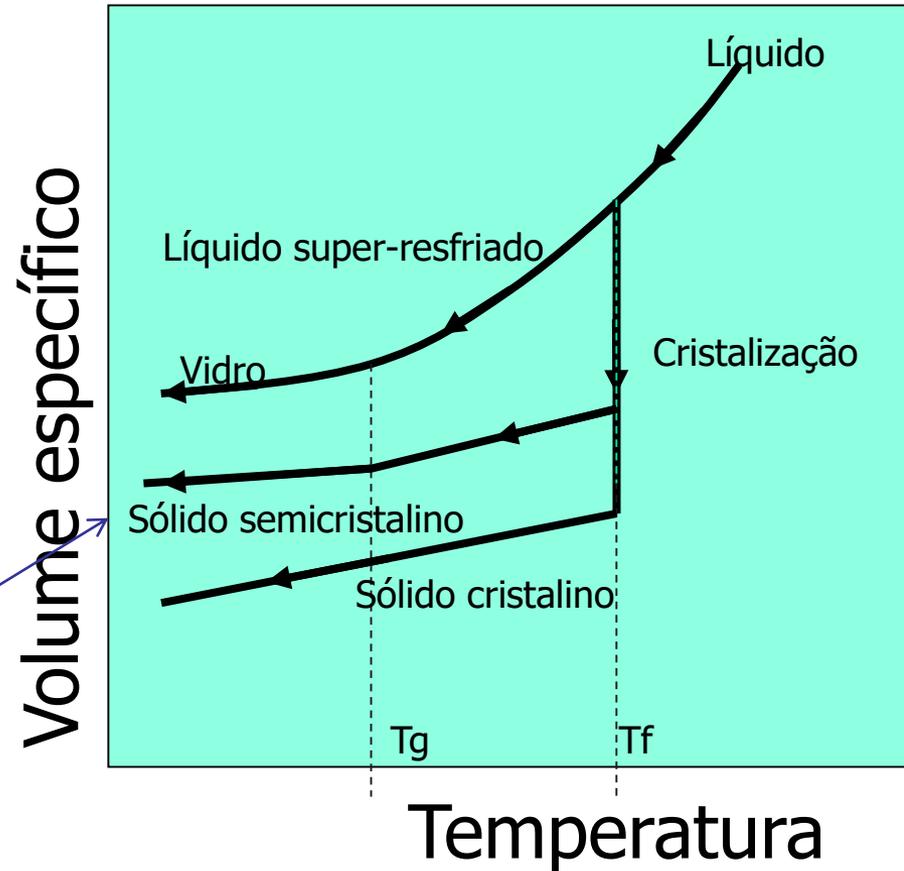
tornam-se frágeis

< deformação térmica

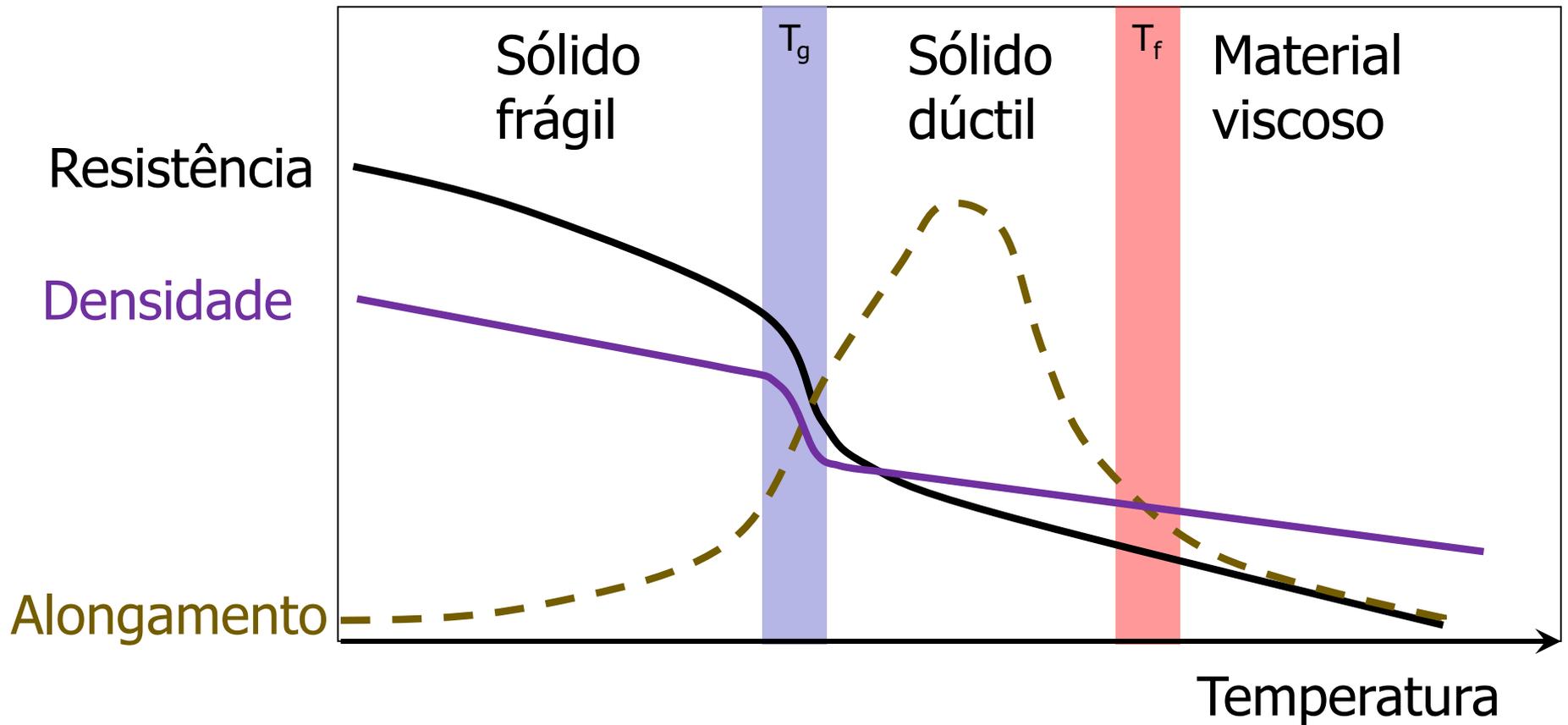
< deformação elasto-plástica



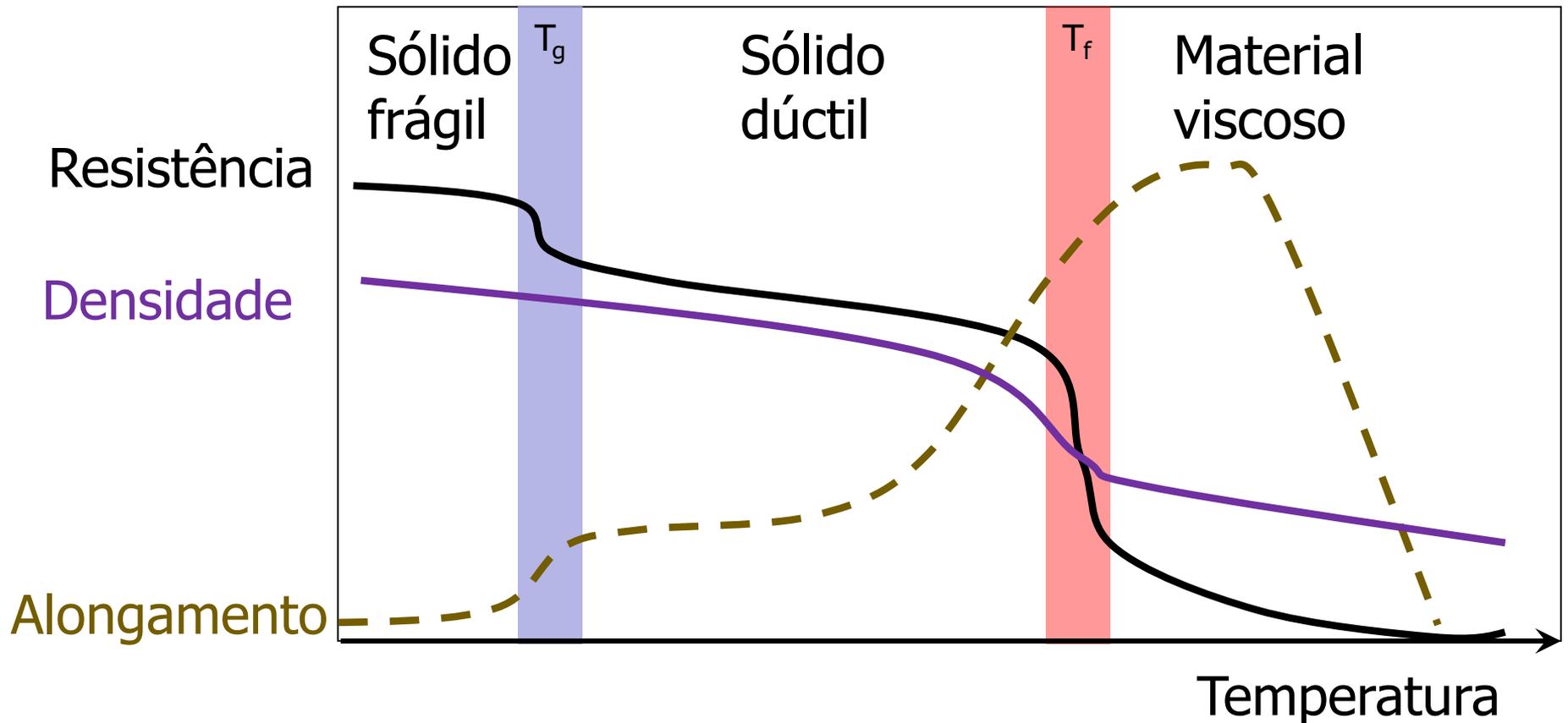
[http://ospolimeros.blogspot.com/2010\\_06\\_01\\_archive.html](http://ospolimeros.blogspot.com/2010_06_01_archive.html)



# Efeito da temperature nos polímeros **amorfos**



# Efeito da temperature nos polímeros **semicristalinos**



# Outros parâmetros importantes:

- Grau de polimerização.
- Tipo de cadeia para termoplásticos (linear ou ramificada)
- Inserção de ligações cruzadas.
- Nos plásticos: presença de cargas e aditivos.

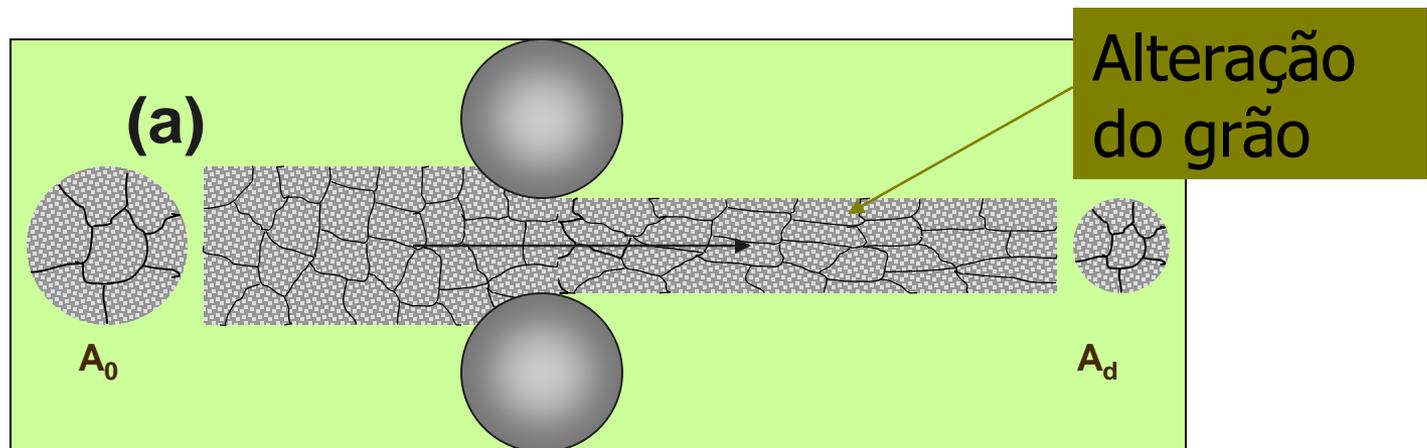


# PROCESSAMENTO: ENCRUAMENTO

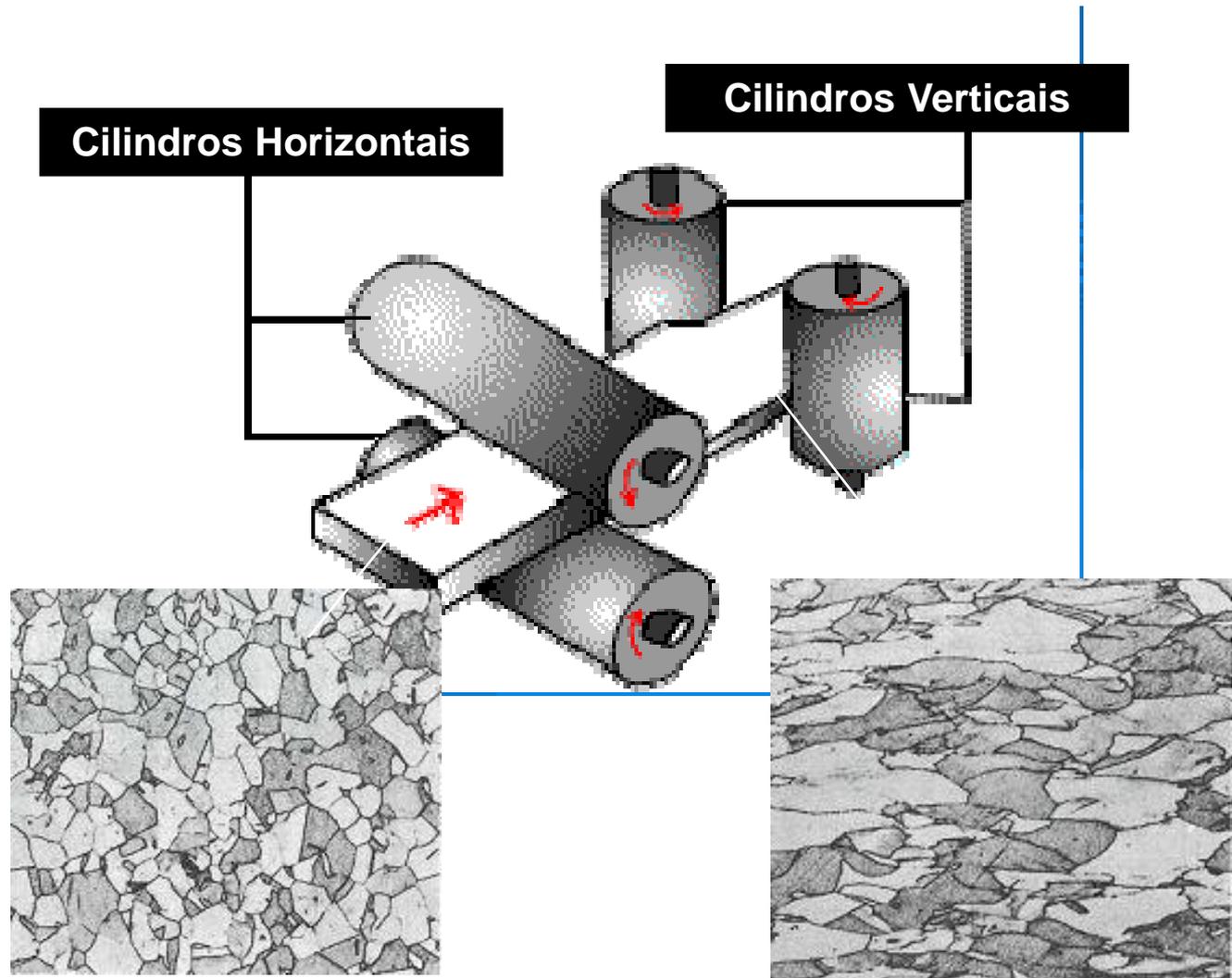
<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=6>

# Porcentual de trabalho a frio (%TF)

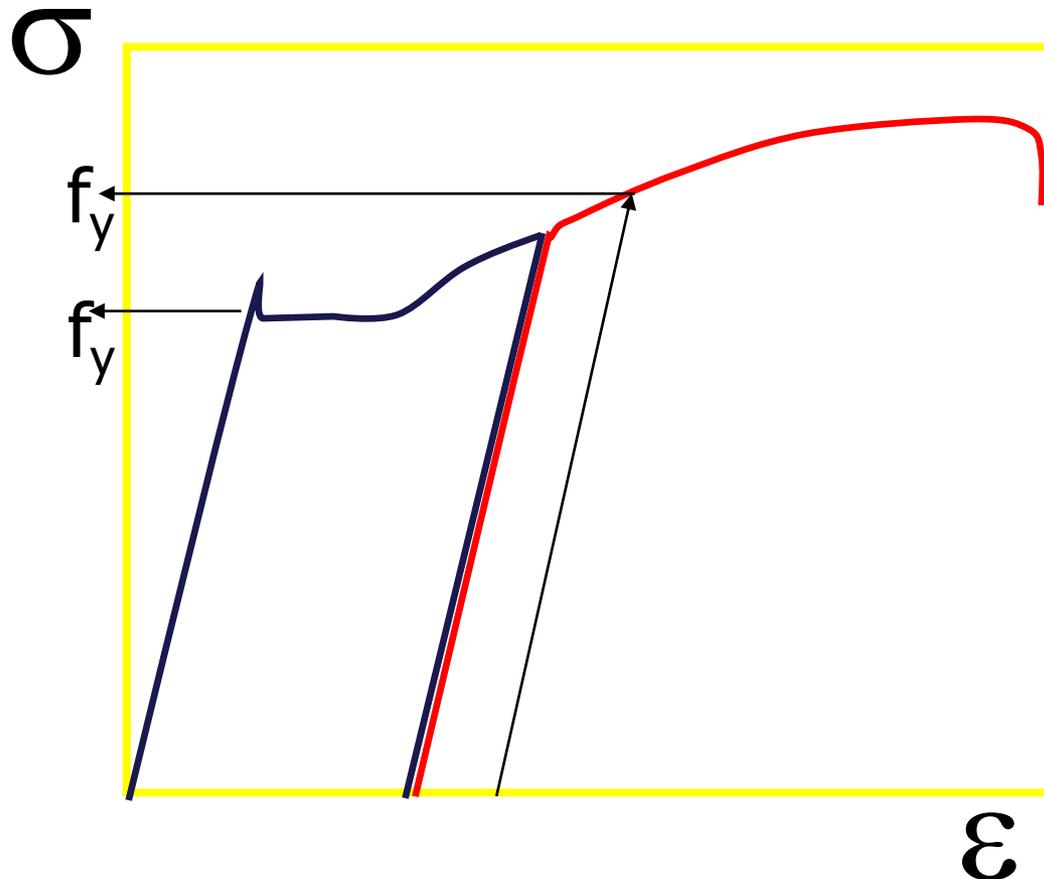
- $\%TF = 100 \times (A_0 - A_d) / A_0$
- Onde,
- $A_0$  = área original da seção reta antes da trefilação e
- $A_d$  = área reduzida da seção reta após a trefilação



# Encruamento



# Ganho de $f_y$ com encruamento

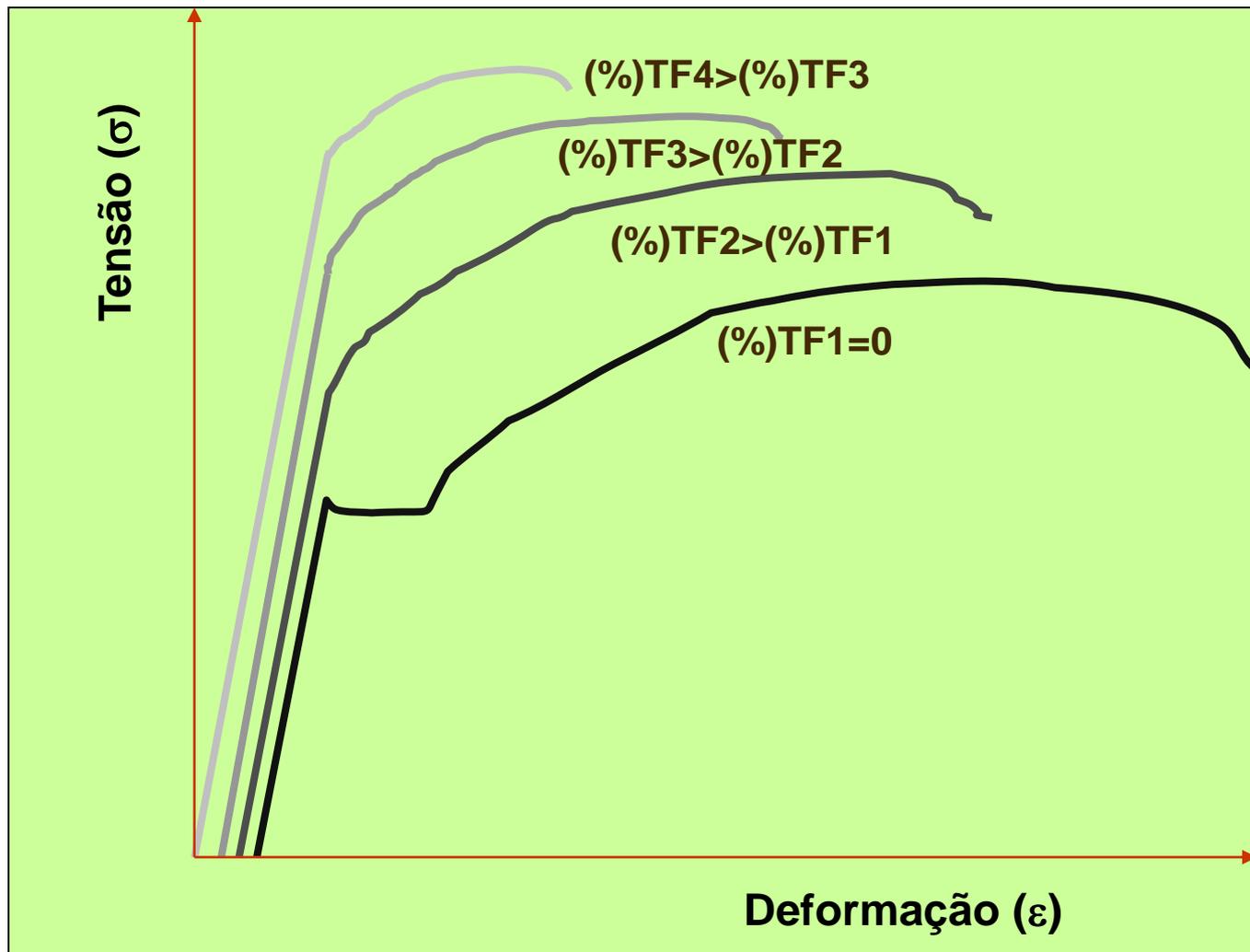


- Elevação do limite elástico  $\rightarrow$  aumento da capacidade de trabalho.

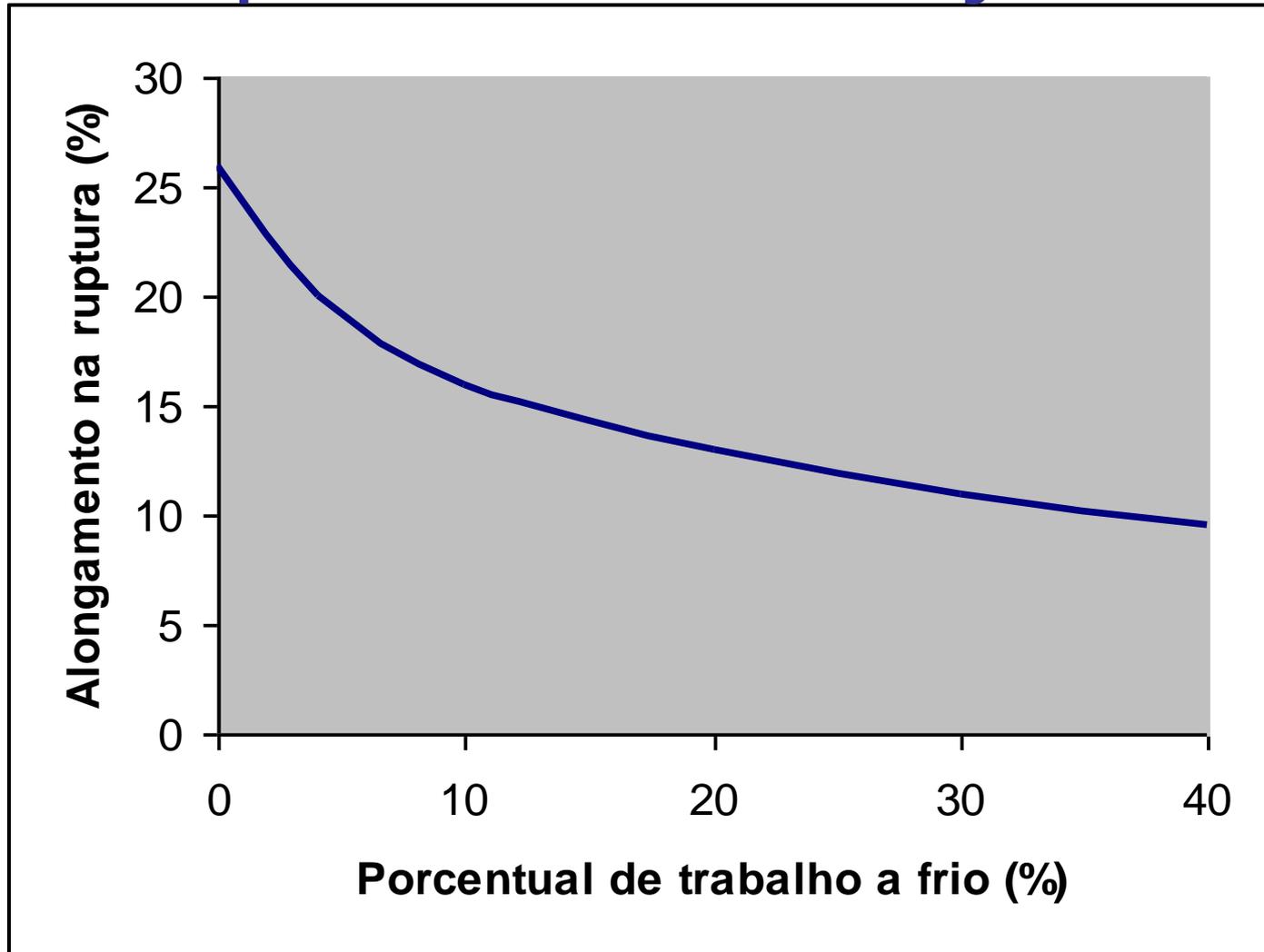
- Amplia o potencial de um aço de micro-estrutura não refinada

- Ligeiro aumento na resistência mecânica.

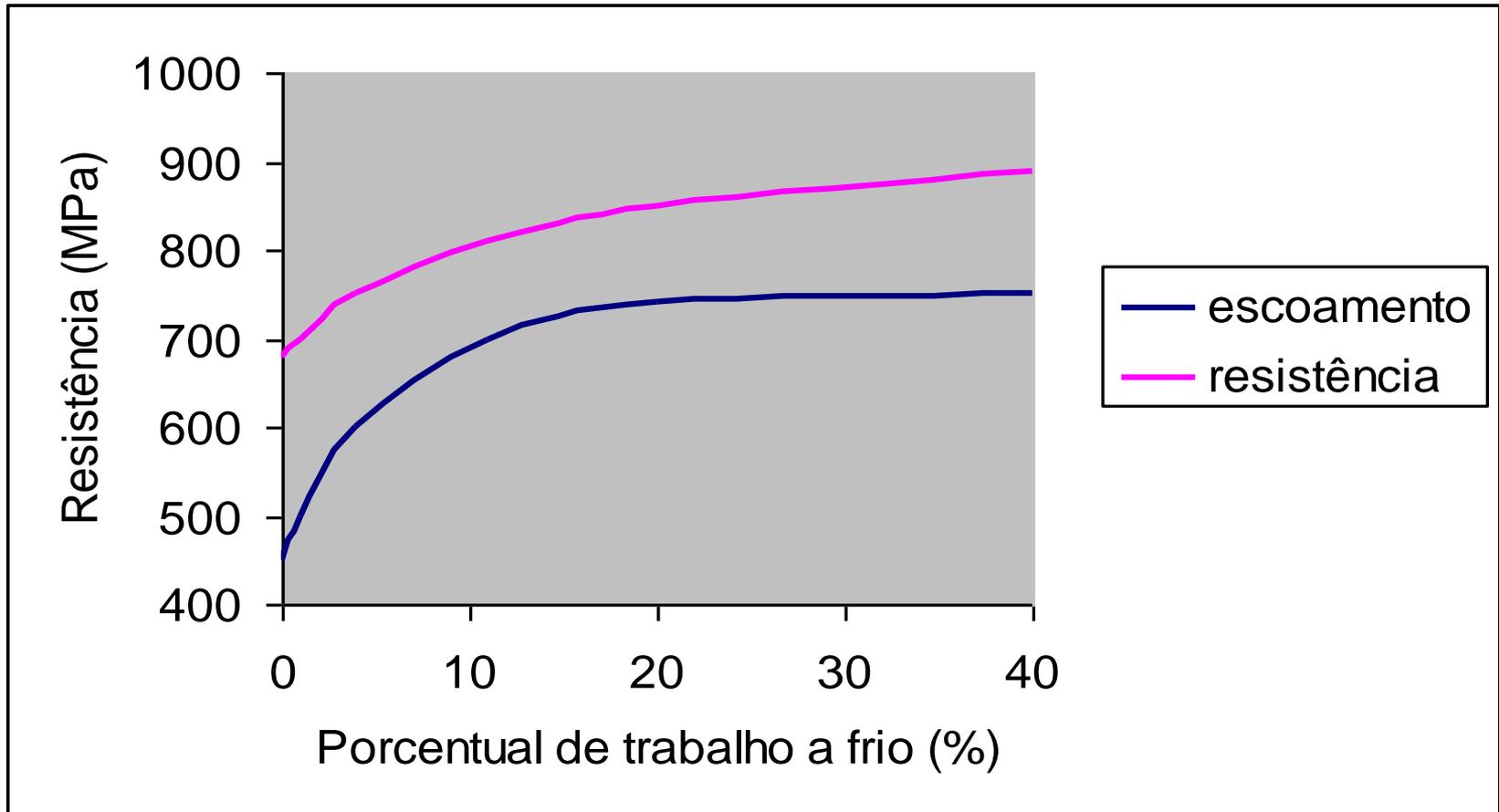
# Efeito do encruamento no comportamento do aço



# Efeito do encruamento no comportamento do aço



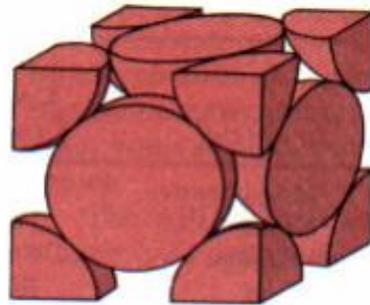
# Efeito do encruamento no comportamento do aço



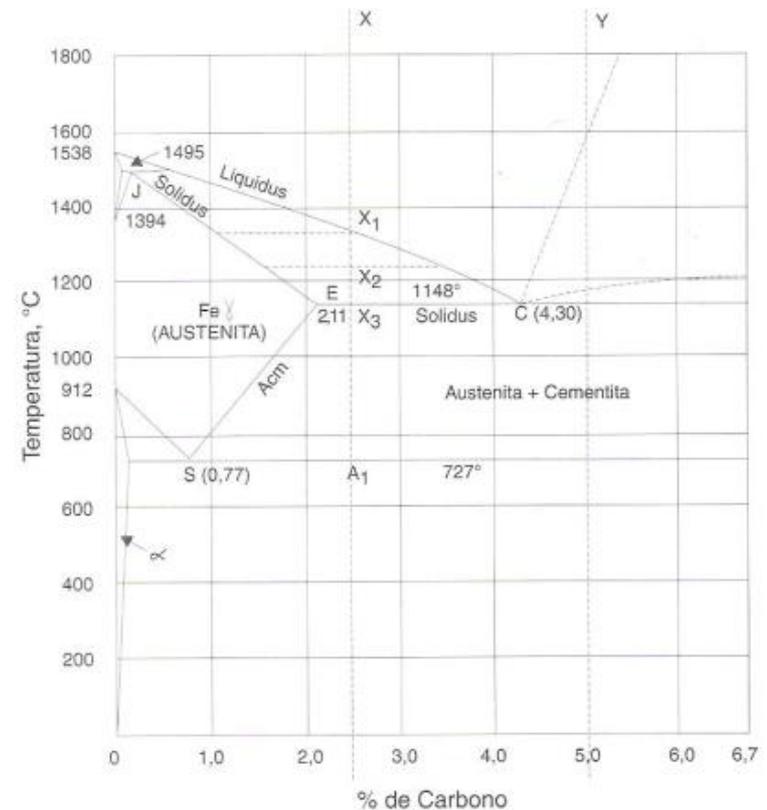
# Têmpera do aço: a ação da temperatura na alotropia do aço



Até 912°C  
Menor teor de C  
na microestrutura  
(menos espaço)



De 912°C a  
1394°C  
Maior teor de C na  
microestrutura  
(mais espaço)



# 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.