



# **SMM 0342 - INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS**

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

# **DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS CRISTALINOS**

**ENSAIOS MECÂNICOS DE MATERIAIS  
ENVOLVEM DEFORMAÇÃO E FRATURA.**

**COMO OCORRE A DEFORMAÇÃO EM  
MATERIAIS?**

**A DEFORMAÇÃO SE INICIA EM NÍVEL  
MICROSCÓPICO ATÉ ATINGIR O NÍVEL  
MACROSCÓPICO.**

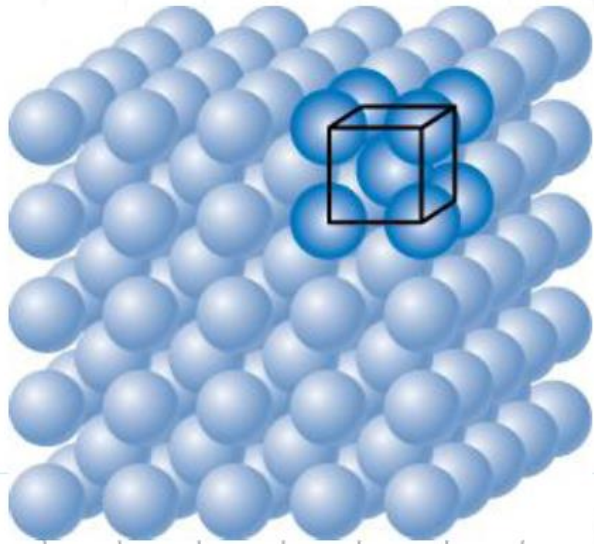
**COMO?**

**A PARTICIPAÇÃO DOS “DEFEITOS” É DE SUMA  
IMPORTÂNCIA.**

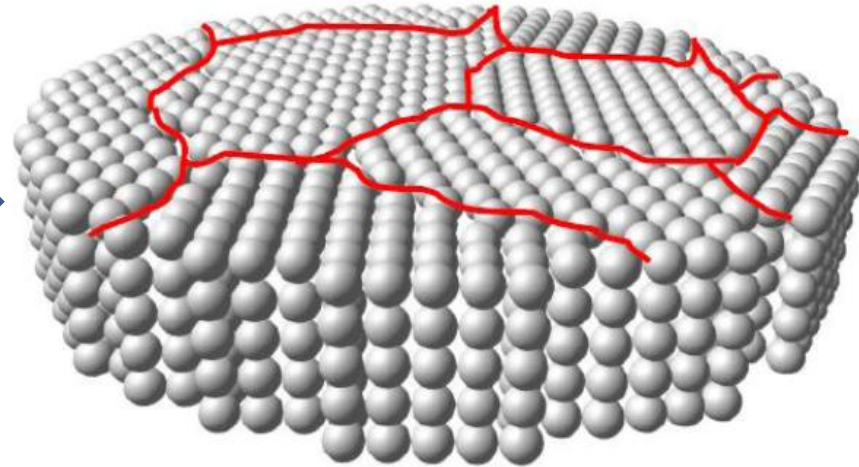
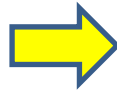
## **RECORDANDO:**

- Materiais podem ser **amorfos ou cristalinos**;
- **Estrutura cristalina** se forma por sobreposição de **planos atômicos (Ex.: solidificação de uma liga metálica)**;
- Dentro dessa **estrutura de planos atômicos** existe **uma unidade** que é a **célula unitária** da estrutura cristalina (**CCC, CFC, HC**);
- **Porções** de material com diferentes **orientações cristalográficas** se encontram formando **os contornos de grão de alto ângulo**;
- Formam-se **grãos** que apresentam um **diâmetro médio**.

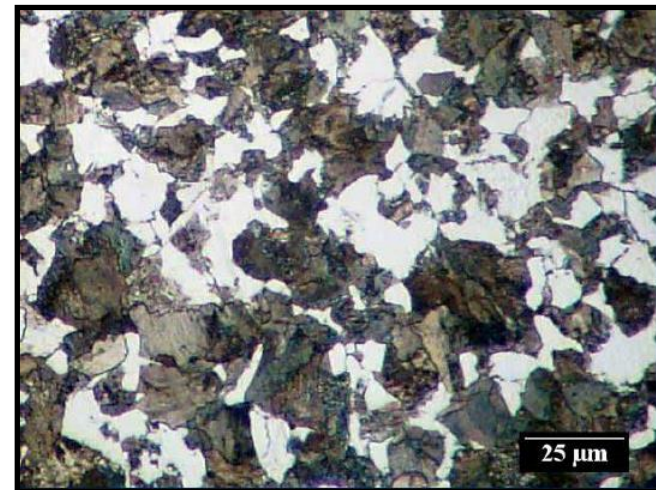
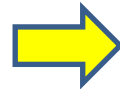
# FORMAÇÃO DOS GRÃOS- TG ESTÁ RELACIONADO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS



(Callister, cap.3)



(Apostila Prof.Dr. Rubens Caram)



# TAMANHO DE GRÃO (TG)-ASTM E 112

$$N=2^{n-1}$$

**N:** n° grãos/pol<sup>2</sup>

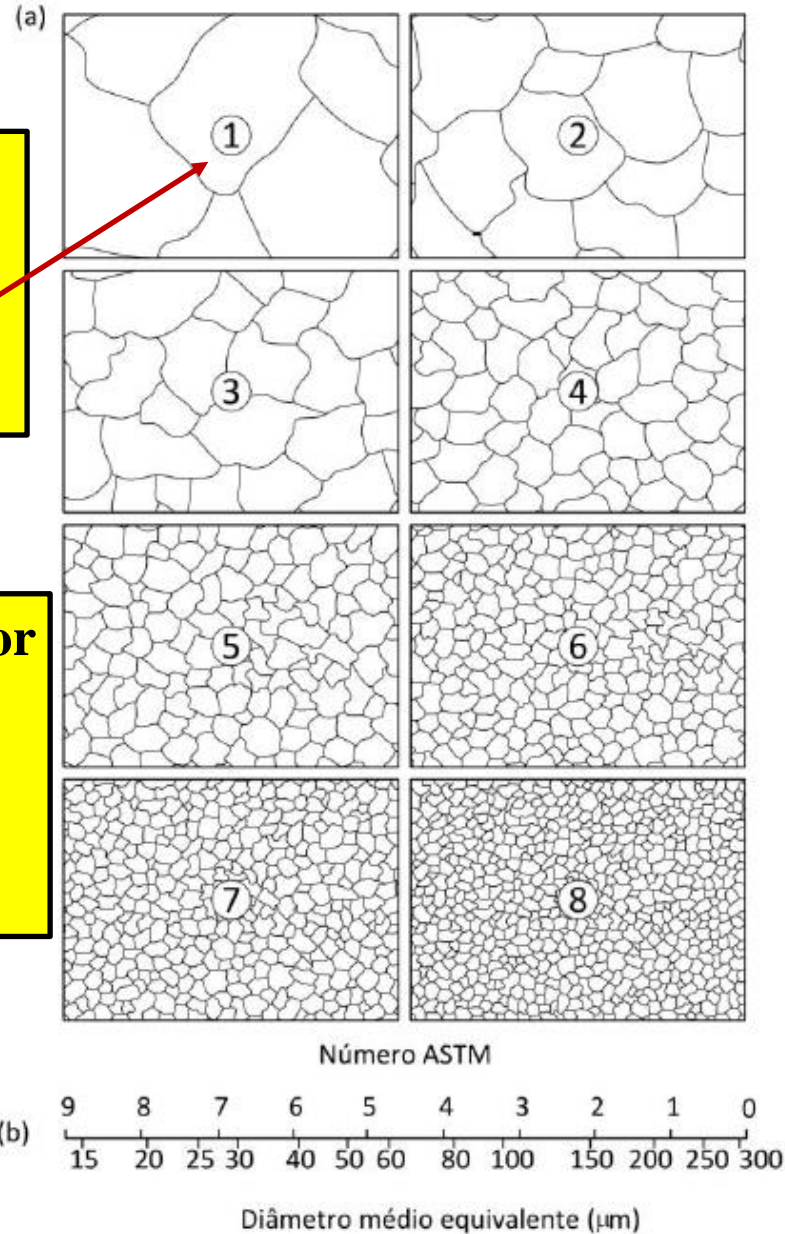
**n:** tamanho de grão ASTM

**Quanto maior o número ASTM menor é o diâmetro médio do grão.**

**EX:**

**ASTM 5 – diâmetro médio: 55μm;**


**ASTM 8 – diâmetro médio: 20μm.**





Designation: E112 – 96 (Reapproved 2004)<sup>ε2</sup>

## Standard Test Methods for Determining Average Grain Size<sup>1</sup>

 E112 – 96 (2004)<sup>ε2</sup>

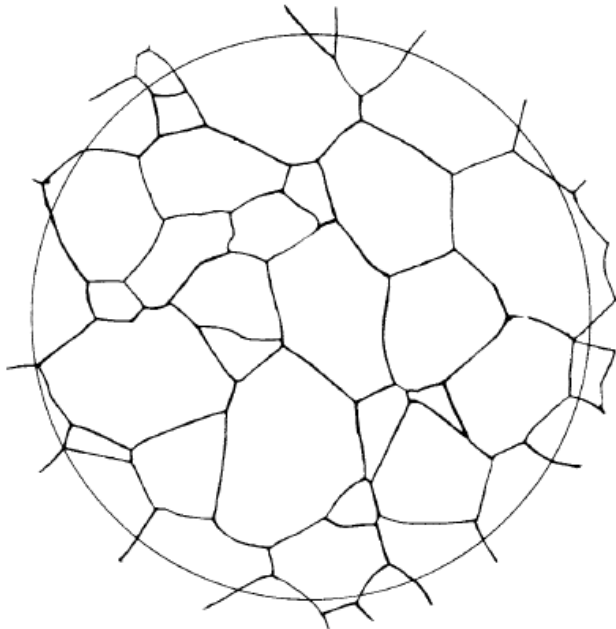


FIG. 1 Example of Untwinned Grains (Flat Etch) from Plate I.  
Grain Size No. 3 at 100X

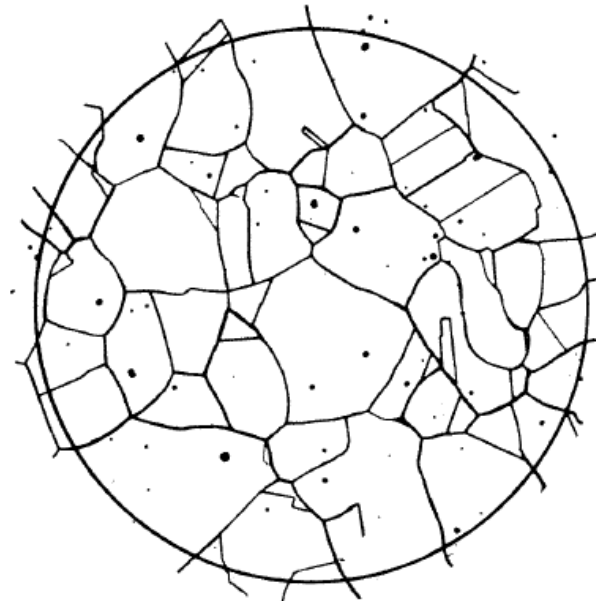
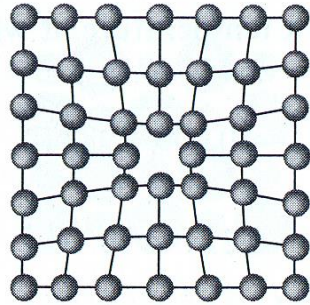


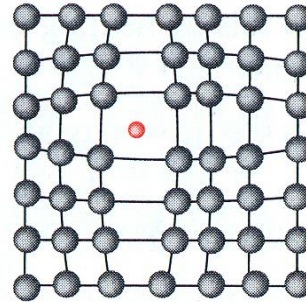
FIG. 2 Example of Twin Grains (Flat Etch) from Plate II. Grain  
Size No. 3 at 100X

# IMPERFEIÇÕES EM SÓLIDOS CRISTALINOS

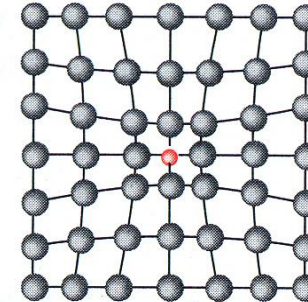
## DEFEITOS PUNTUAIS



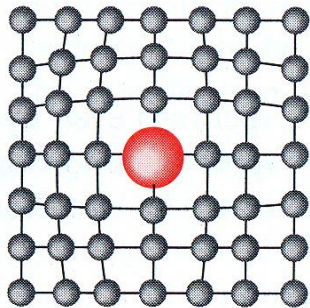
(a)



(b)

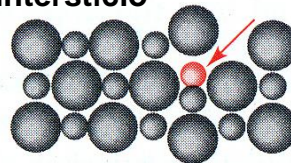


(c)



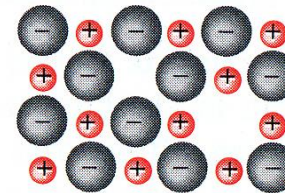
(d)

Movimento de um  
cátion numa posição  
normal para um  
interstício



(e)

Lacuna de cátion e  
lacuna de ânion



(f)

## AUSÊNCIA OU PRESENÇA DE ÁTOMOS

(a) Vacância, (b) Átomo intersticial, (c) Pequeno átomo substitucional, (d) Grande átomo substitucional, (e) Defeito Frenkel, (f) Defeito Schottky. Todos estes defeitos acarretam uma deformação na rede cristalina

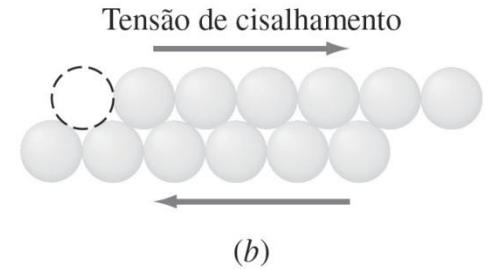
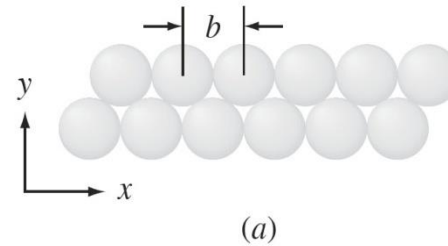
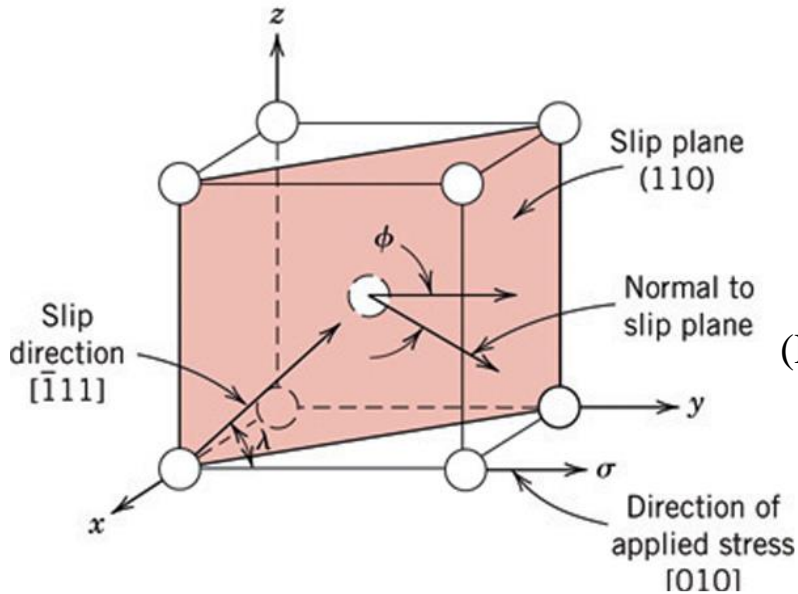


**O defeito mais importante para os mecanismos de deformação de materiais é um defeito de linha chamado de linha de discordância (L.D.) ou deslocação (Físicos) devido ao termo em inglês:**

*dislocations.*

# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS – TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO

**PENSAMENTO NATURAL: DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM MONOCRISTAIS PERFEITOS OCORRE POR DESLIZAMENTO DE PLANOS ATÔMICOS E NOS PLANOS MAIS COMPACTOS.**



(FONTE: CALLISTER)

## **TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO**

**ATÉ A DÉCADA DE 1930 –DISCREPÂNCIA ENTRE VALOR TEÓRICO E EXPERIMENTAL PARA O LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE CRISTAIS PERFEITOS. EX: MAGNÉSIO - TEÓRICO : 6894MPa – EXPERIMENTAL: 0,6894MPa.**

**EXPLICAÇÃO VEIO COM A TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS. O CRÉDITO POR ESTA TEORIA É DADO A TRÊS CIENTISTAS QUE PUBLICARAM QUASE AO MESMO TEMPO E “INDEPENDENTEMENTE”:  
EGON OROWAN, G. I. TAYLOR E MICHAÉL POLANIY.**

## TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO

MUITAS IDÉIAS SOBRE A TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS APARECERAM JÁ NA TESE DE DOUTORADO DE OROWAN EM 1929.

OROWAN NÃO INVENTOU O CONCEITO DE DISCORDÂNCIAS E DÁ CRÉDITO À POLANYI POR TER RECONHECIDO A CONTRIBUIÇÃO DELAS PARA A PLASTICIDADE JÁ HÁ ALGUM TEMPO.

POLANYI RECONHECE OUTROS CIENTISTAS QUE TAMBÉM PENSARAM NESTE CONCEITO: PRANDTL E DEHLINGER.

11. L. Prandtl: *Zeits. angew. Math. u. Mechanik*, 1928, vol. 8, p. 85.
12. U. Dehlinger: *Ann. d. Physik*, 1929, vol. 2, p. 749.
13. G. Masing and M. Polanyi: *Ergebn. exakt. Naturw.*, 1923, vol. 2, p. 177.

## **TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO**

**TAYLOR RECONHECEU QUE A GEOMETRIA DAS DISCORDÂNCIAS BEM COMO SEU CAMPO DE TENSÕES HAVIAM SIDO EXTENSAMENTE ESTUDADOS POR VÁRIOS MATEMÁTICOS . EM SUA TEORIA DO ENCRUAMENTO UTILIZOU SOLUÇÕES MATEMÁTICAS PARA TENSÕES EM DISCORDÂNCIA EM CUNHA, ENCONTRADAS NO LIVRO DE LOVE. ENTÃO INCIDENTALMENTE INTRODUZIU A PALAVRA “DISLOCATION” ENQUANTO POLANYI INTRODUZIU A PALAVRA ALEMÃ: “VERSETZUNGEN”.**

## **TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO**

SEGUNDO OROWAN, O FATO QUE O LEVOU INEVITAVELMENTE A UTILIZAR O CONCEITO DE DISCORDÂNCIAS FOI A QUESDA DE UM MONOCRISTAL DE ZINCO QUE DEMONSTROU UMA DEFORMAÇÃO IRREGULAR, AO ANALISAR DE DIVERSAS MANEIRAS ESTE CRISTAL, O CONCEITO DE “DISLOCATIONS” VEIO À TONA (1934).

A COMPROVAÇÃO DA TEORIA SÓ OCORREU EM 1950 COM O EVENTO DOS MICROSCÓPIOS ELETRÔNICOS. AS LINHAS DE DISCORDÂNCIA TAMBÉM EXPLICAM A DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DE CERÂMICAS CRISTALINAS.



*Egon Orowan*

EGON OROWAN

*August 2, 1901–August 3, 1989*

*Biographical Memoir*

COPYRIGHT 1996  
NATIONAL ACADEMIES PRESS  
WASHINGTON D.C.

in February 1929 and of his first publication. One Saturday afternoon he had only one zinc crystal available. He dropped it on the floor, found it bent, straightened it, left it to anneal for some time, and tried a practice run. To his surprise, it extended with sharp jerks instead of flowing smoothly. From this observation, often repeated, he drew a surprising amount of information and was “led, almost unavoidably, to the concept of dislocation.” It must also have led to his

## **TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO**

**OROWAN CONVERSOU COM POLANYI, QUE SUGERIU QUE ELE PUBLICASSE O ARTIGO SOZINHO PORÉM, DEPOIS DE CONVERSAREM, FICOU DECIDIDO QUE AMBOS ESCREVERIAM ARTIGOS PARA QUE FOSSEM PUBLICADOS JUNTOS.**

**TAYLOR SUBMETEU SEU ARTIGO ANTES PARA A ROYAL SOCIETY (INGLATERRA) PORÉM, OS ARTIGOS DE OROWAN E O DE POLANYI FORAM PUBLICADOS PRIMEIRO, NA SEITZ PHYSIK (ALEMANHA).**



1. E. Orowan: *Z. Physik*, 1934, vol. 89, p. 605.
2. E. Orowan: *Z. Physik*, 1934, vol. 89, p. 614.
3. E. Orowan: *Z. Physik*, 1934, vol. 89, p. 634.
4. E. Orowan: *Z. Physik*, 1935, vol. 97, p. 573.
5. E. Orowan: *Z. Physik*, 1935/6, vol. 98, p. 382.
6. M. Polanyi: *Z. Physik*, 1934, vol. 89, p. 660.
7. G. I. Taylor: *Proc. Roy. Soc.* 1934, vol. A145, p. 362.

# **The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. Part I. Theoretical**

G. I. Taylor

*Proc. R. Soc. Lond. A* 1934 **145**, doi: 10.1098/rspa.1934.0106,  
published 2 July 1934

## **TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO**

**EM 1946 OCORREU UMA CONFERENCIA SOBRE DISCORDÂNCIAS EM MANCHESTER E DORIS WILSDORF RELATA QUE OS ALEMÃES FICARAM DESLUMBRADOS COM A DISCORDÂNCIA EM HÉLICE, CUJA IDEIA FOI DESENVOLVIDA POR J.M. BURGUER (1939) E ELES NÃO CONHECIAM [KUHLMAN-WILSDORF, 1985-METALLURGICAL TRANSACTIONS].**

**OROWAN E POLANYI TIVERAM QUE FUGIR DA ALEMANHA (2ª GUERRA), PRIMEIRO PARA INGLATERRA, DEPOIS EUA (OROWAN ERA ESLOVACO E PROVAVELMENTE ASCENDÊNCIA JUDIA). POLANYI ERA DE UMA FAMÍLIA BURGUESA JUDIA DE BUDAPESTE.**

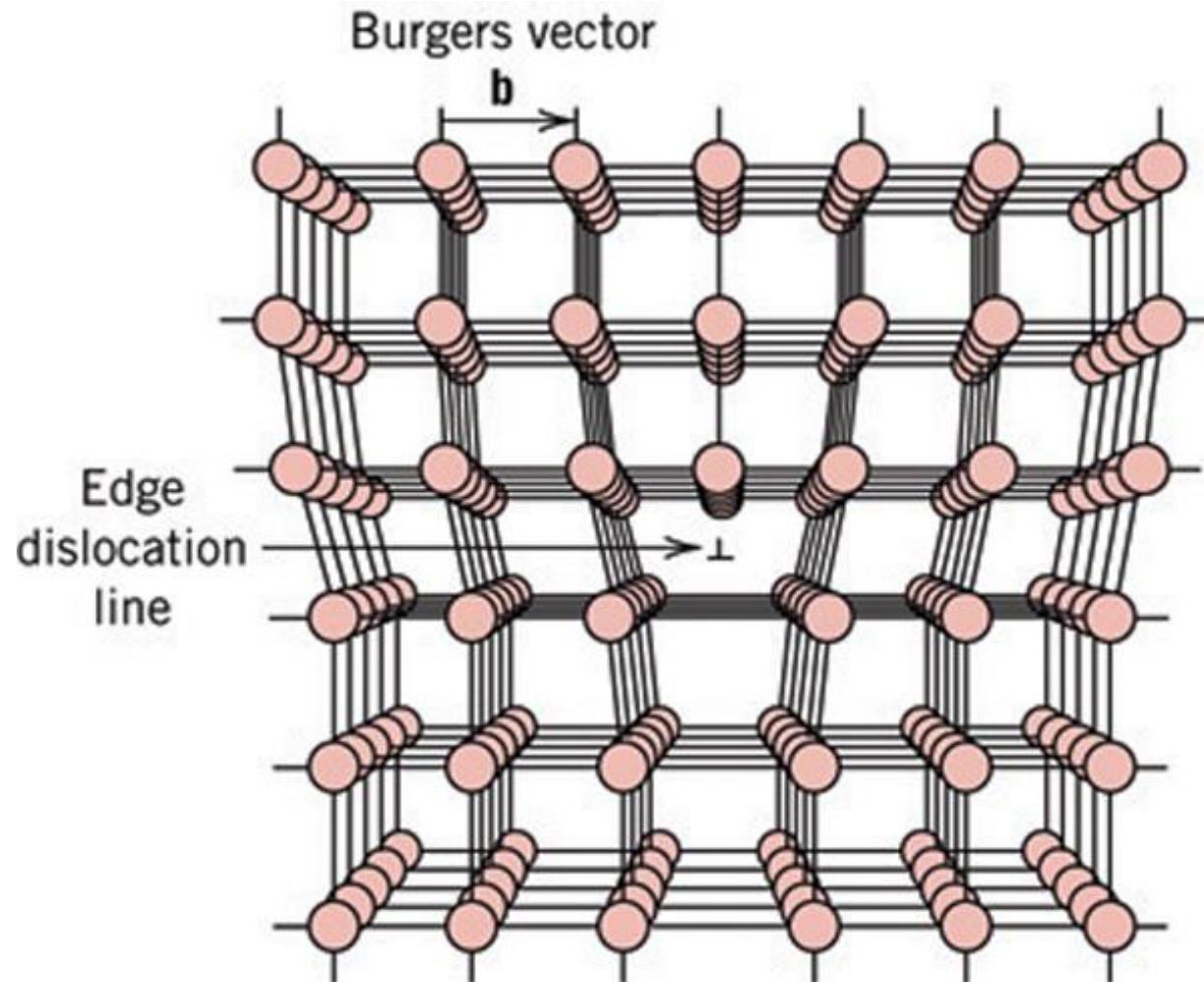
## **TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS HISTÓRICO**

**DORIS VEIO P/ EUA DEPOIS DA GUERRA, FICOU NA UNIVERSITY OF VIRGINIA.**

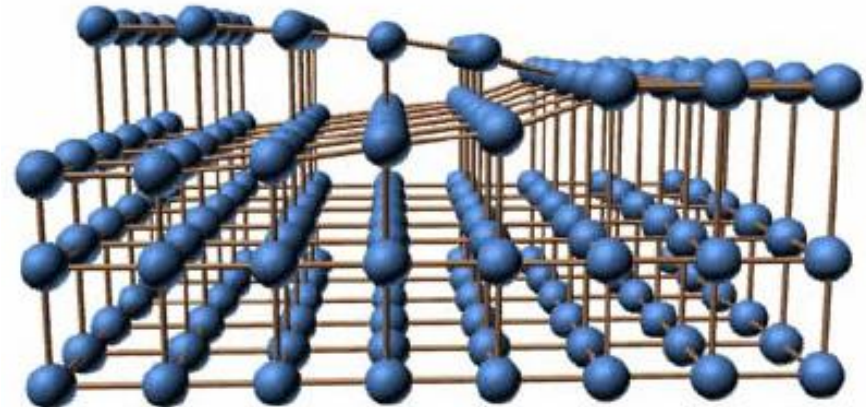
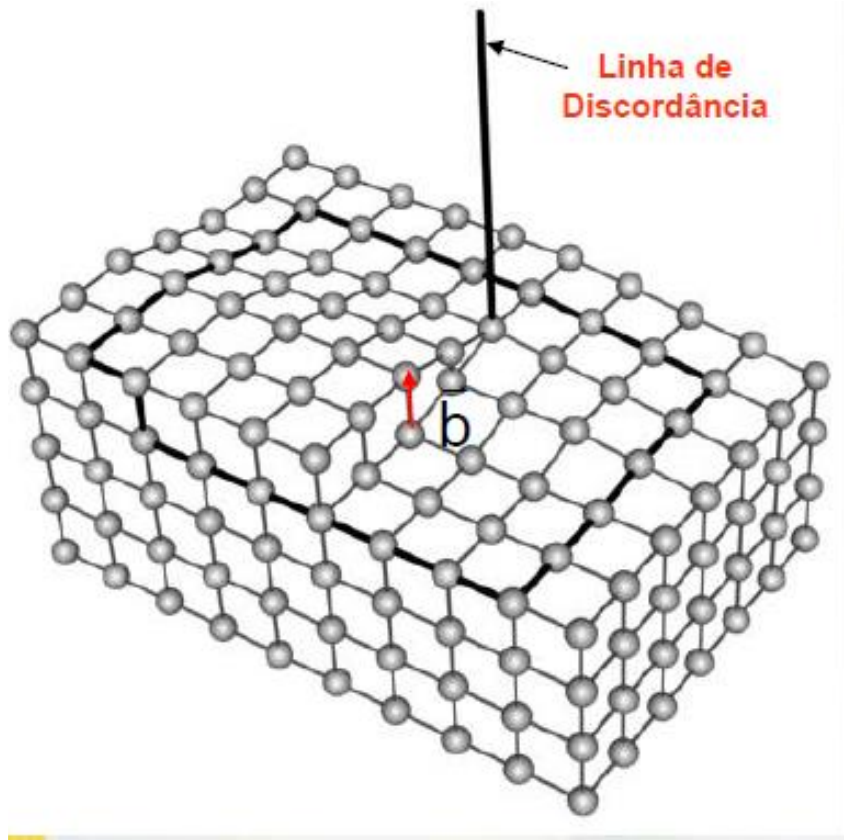
**O OROWAN VEIO P/ MIT, CONTINUOU CONTRIBUINDO COM A TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS E JUNTAMENTE COM IRWIN EM 1957 MODIFICOU A EQUAÇÃO DE GRIFFITH E SE TORNOU UM DOS PAIS DA MECÂNICA DA FRATURA.**

**O POLANYI, DEPOIS DA GUERRA, LARGOU A FÍSICA DOS METAIS E VOLTOU SEUS ESTUDOS PARA A ÁREA DE CIÊNCIAS SOCIAIS E EDUCAÇÃO.**

# DISCORDÂNCIA EM CUNHA

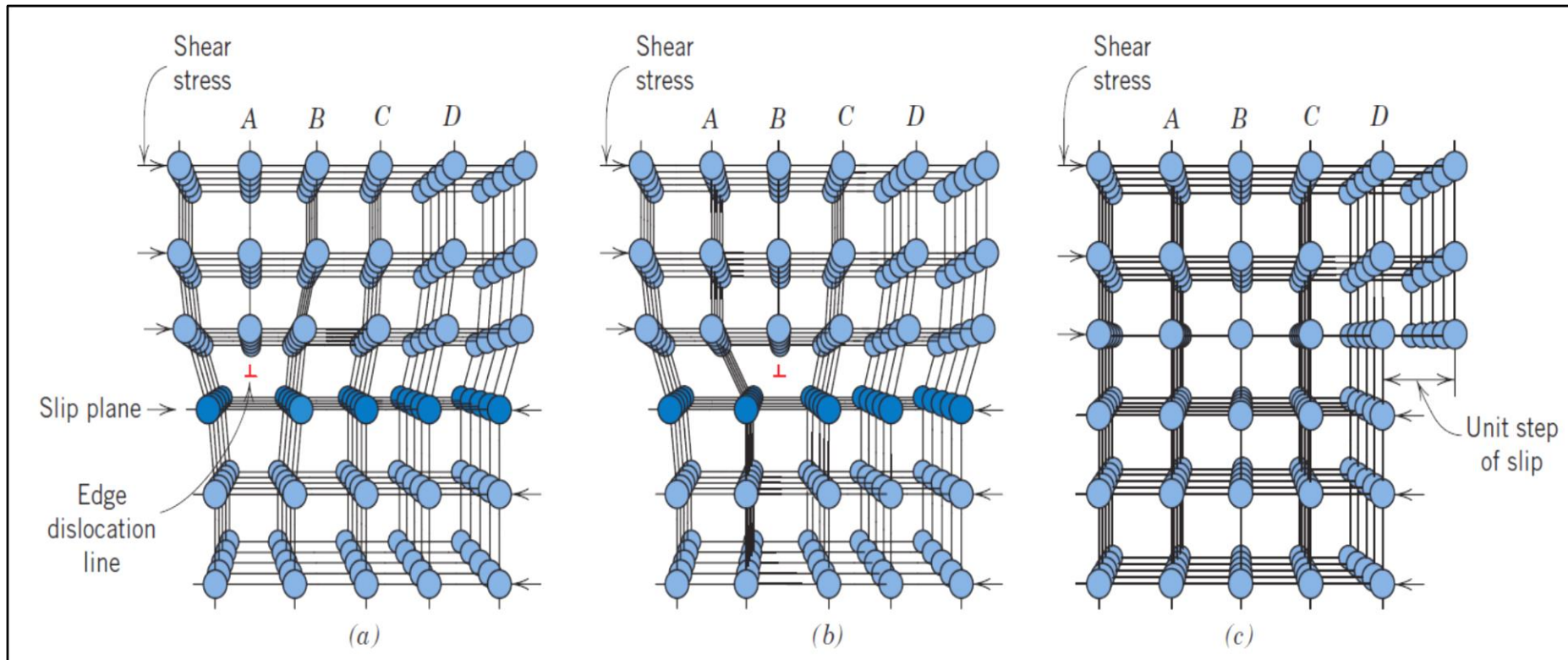


# DISCORDÂNCIA EM HÉLICE





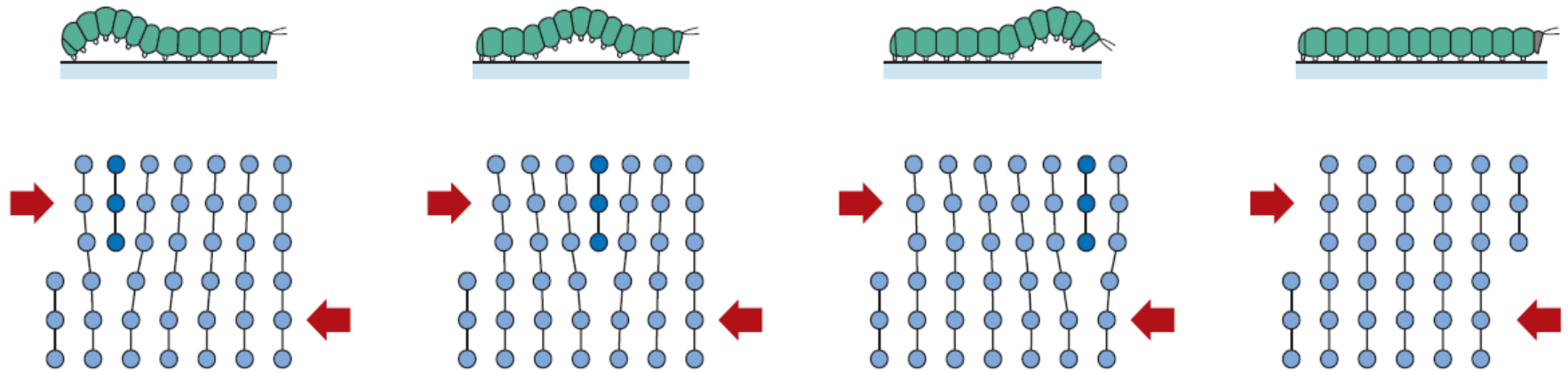
# MOVIMENTAÇÃO DAS DISCORDÂNCIA



**É APLICADA UMA TENSÃO DE CISALHAMENTO, FORÇANDO A PARTE SUPERIOR DOS PLANOS A, B, C E D. SE A TENSÃO FOR SUFICIENTE, AS LIGAÇÕES DA PARTE INFERIOR DO PLANO B SÃO ROMPIDAS E O PLANO A SE LIGA À ESTA PARTE. ISSO OCORRE SUCESSIVAMENTE ATÉ QUE O SEMI-PLANO AFLORA NA SUPERFÍCIE COM A LARGURA DE UMA DISTÂNCIA ATÔMICA.**



# MOVIMENTAÇÃO DAS DISCORDÂNCIA



MOVIMENTAÇÃO DE LINHAS DE DISCORDÂNCIAS É ANÁLOGO AO DE UMA LAGARTA.

AS LINHAS DE DISCORDÂNCIAS APARECEM JÁ APÓS A SOLIDIFICAÇÃO.

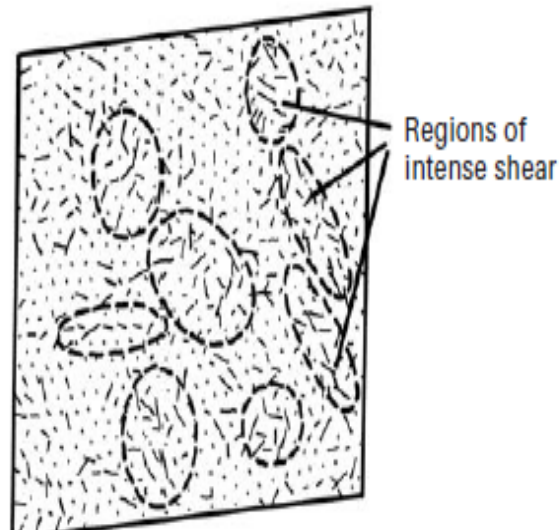
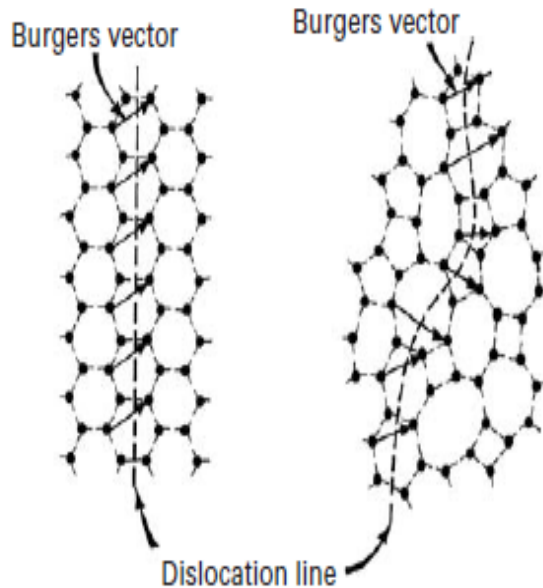
**DENSIDADE DE DISCORDÂNCIAS:**. METAIS DEFORMADOS A FRIO:  $10^{10} \text{ mm}^{-2}$  . RECOZIDO:  $10^5 - 10^6 \text{ mm}^{-2}$  . CERÂMICOS:  $10^2 - 10^4 \text{ mm}^{-2}$  . MONOCRISTAIS Si – CIRCUITOS INTEGRADOS: 0,1 A  $1 \text{ mm}^{-2}$  .

01-27 00:51:013





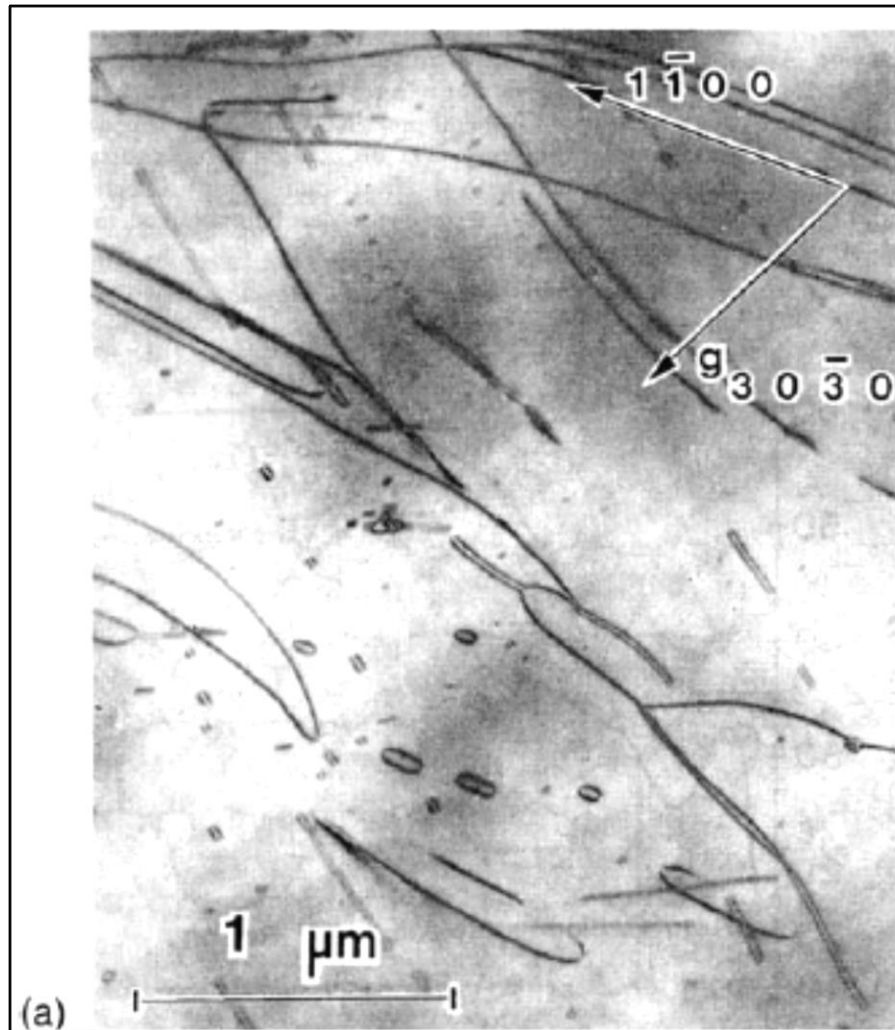
**Fig. 3.24** (a) Gilman model of dislocations in crystalline and glassy silica, represented by two-dimensional arrays of polyhedra. (Adapted from J. J. Gilman, *J. Appl. Phys.* 44 (1973) 675) (b) Argon model of displacement fields of atoms (indicated by magnitude and direction of lines) when assemblage of atoms is subjected to shear strain of  $5 \times 10^{-2}$ , in molecular dynamics computation. (Adapted from D. Deng, A. S. Argon, and S. Yip, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A329 (1989) 613.)



# A TEORIA DAS DISCORDÂNCIAS EXPLICA OS FENÔMENOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM CERÂMICAS CRISTALINAS E VÍTREAS

(fonte: CHAWLA & MEYERS –  
MECHANICAL BEHAVIOR OF  
MATERIAIS)

## DISCORDÂNCIAS EM SAFIRA



**Fig. 4.44** (a) Dislocations, dipoles, and loops in sapphire. (b) Interaction between dislocations in sapphire. (From K. P. D. Lagerdorf, B. J. Pletka, T. E. Mitchell, and A. H. Heuer, *Radiation Effects*, 74 (1983) 87.)

(fonte: CHAWLA & MEYERS – MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIAIS)

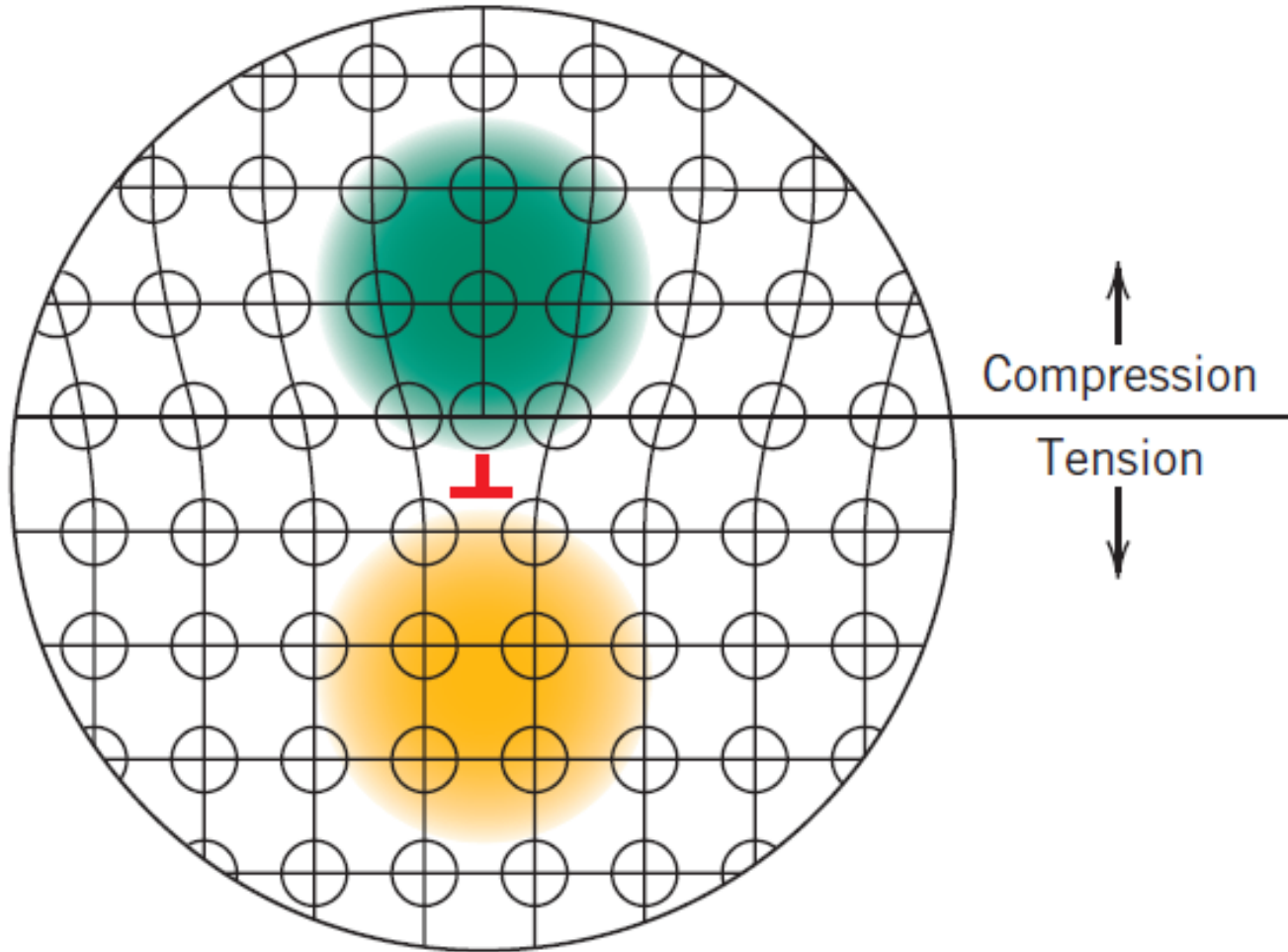
## DISCORDÂNCIAS

A DENSIDADE DE DISCORDÂNCIAS INFLUENCIA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS E ALGUMAS DE SUAS CARACTERÍSTICAS SÃO IMPORTANTES, COMO O CAMPO DE TENSÕES AO REDOR DAS MESMAS.

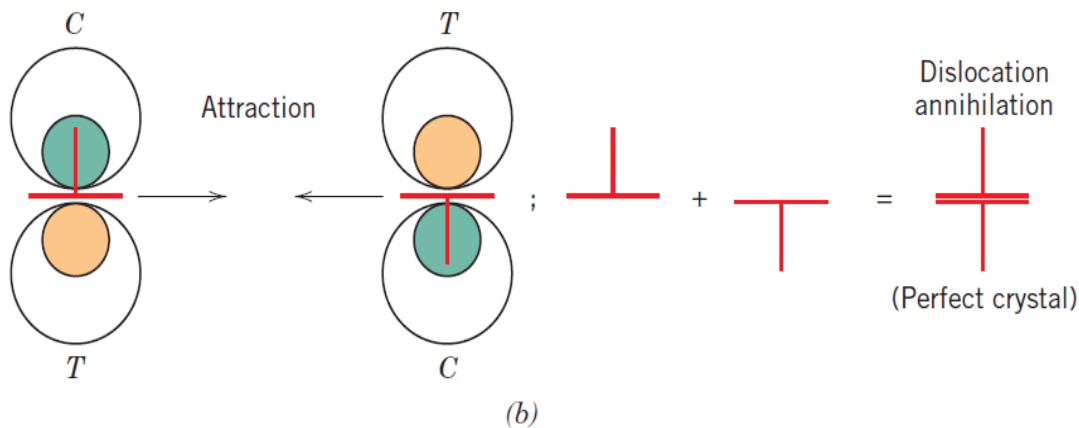
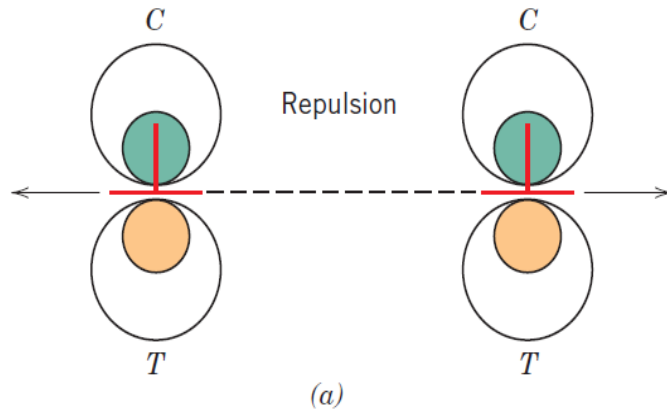
QUANDO UM METAL É DEFORMADO PLASTICAMENTE, 5% É RETIDO EM FORMA DE ENERGIA DE DEFORMAÇÃO (DISCORDÂNCIAS) E O RESTANTE É DISSIPADO EM FORMA DE CALOR.

DISCORDÂNCIAS PROVOCAM UMA DISTORÇÃO NA REDE CRISTALINA E CONSEQUENTEMENTE: CAMPO DE TENSÕES É GERADO.

# CAMPOS DE TENSÕES EM DISCORDÂNCIAS



# DISCORDÂNCIAS

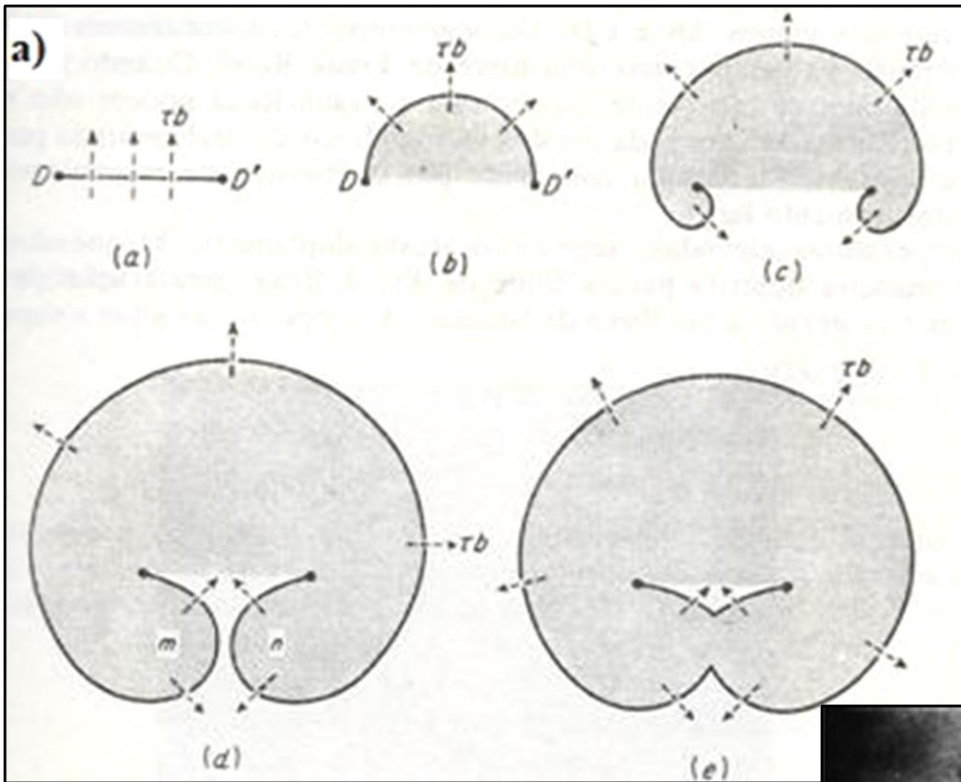


AS DISCORDÂNCIAS INTERAGEM ENTRE SI. DUAS LINHAS DE DISCORDÂNCIA NO MESMO PLANO DE ESCORREGAMENTO COM OS CAMPOS DO MESMO LADO SE REPELEM (a) E COM CAMPOS OPOSTOS SE ANULAM (b): DOIS SEMI-PLANOS FORMAM UM PLANO.

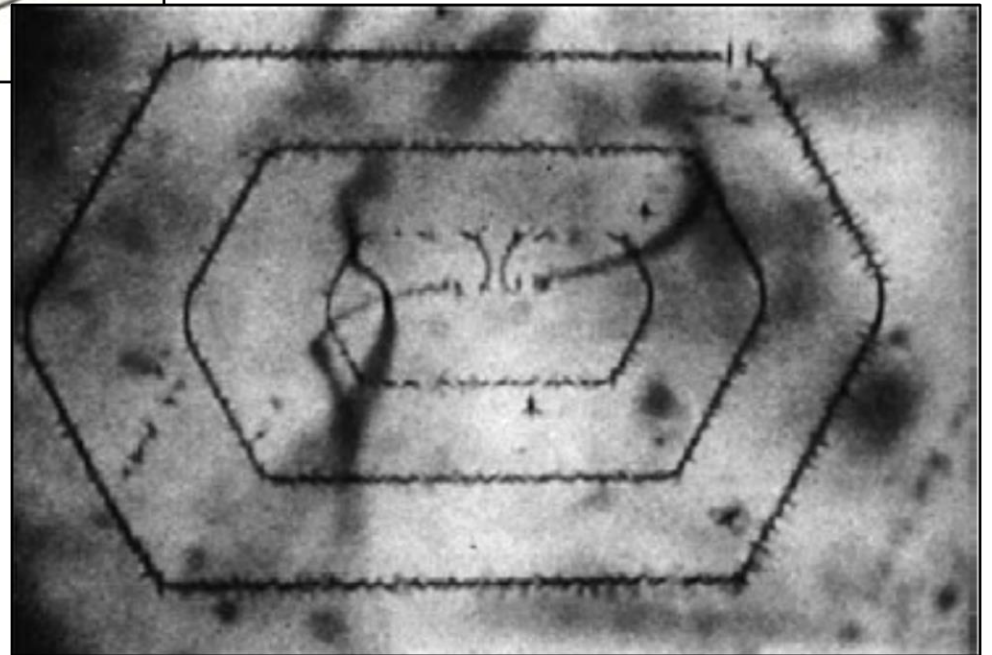


## **DISCORDÂNCIAS**

**DURANTE A DEFORMAÇÃO, AS DISCORDÂNCIAS INTERAGEM ENTRE SI E SE MULTIPLICAM. OCORRE TAMBÉM A INTERAÇÃO COM CONTORNOS DE GRÃO, PARTÍCULAS DE SEGUNDA FASE, DEFEITOS, ENTALHES E RISCOS. CONCENTRADORES DE TENSÕES SÃO SÍTIOS PARA FORMAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS DURANTE A DEFORMAÇÃO.**



## Fonte de Frank-Read (1953)

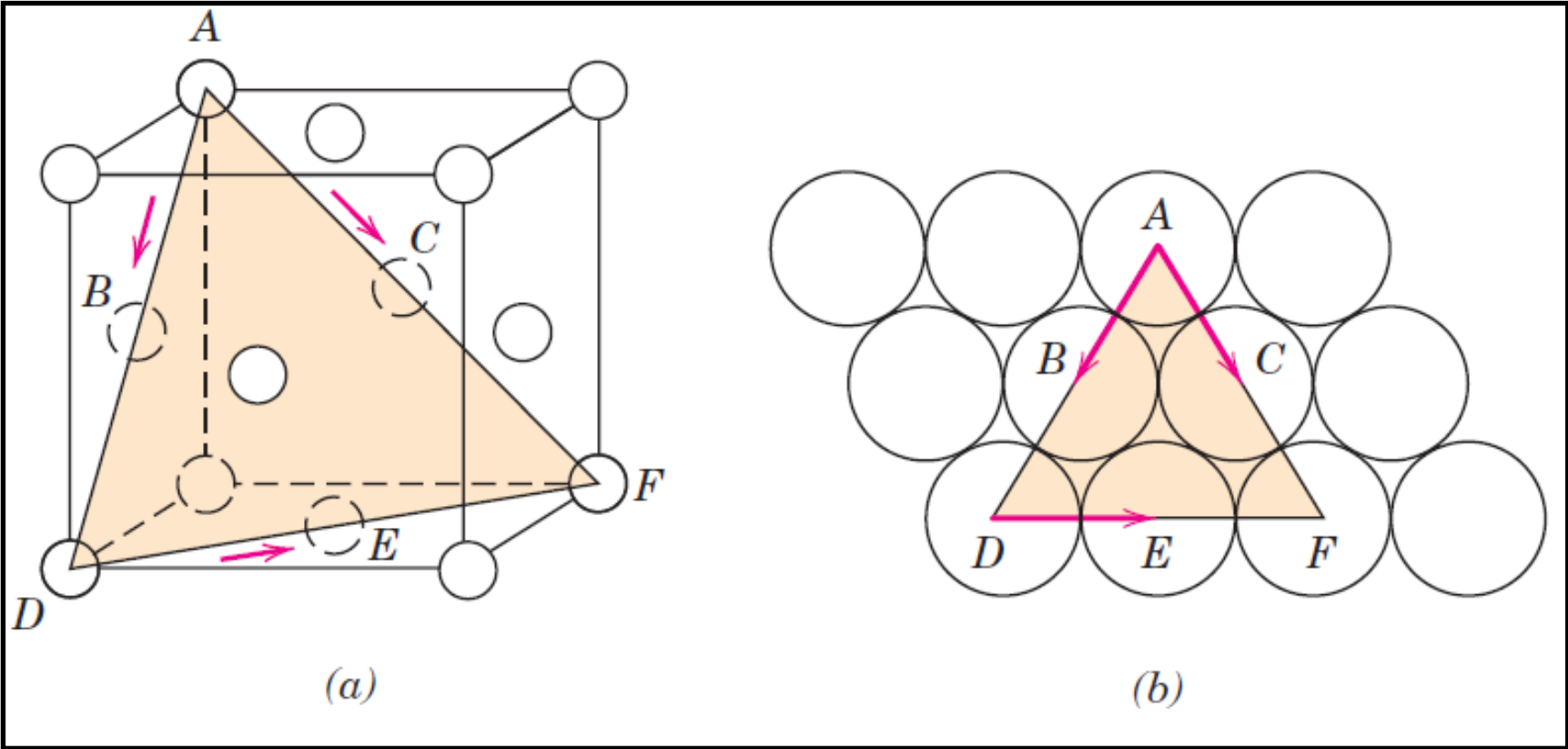


## **SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO**

**AS DISCORDÂNCIAS DESLOCAM-SE COM MAIS FACILIDADE EM PLANOS E DIREÇÕES ESPECÍFICAS. ESTE CONJUNTO DE PLANO E DIREÇÃO DE DESLIZAMENTO É CHAMADO DE SISTEMA DE DESLIZAMENTO OU SISTEMA DE ESCORREGAMENTO (DISTORÇÃO ATÔMICA DA DISCORDÂNCIA É MÍNIMA).**

**NORMALMENTE, ESSES PLANOS SÃO OS MAIS COMPACTOS (MAIOR DENSIDADE PLANAR) DA ESTRUTURA CRISTALINA E A DIREÇÃO É AQUELA QUE APRESENTA MAIOR DENSIDADE LINEAR.**

## SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO



**ESTRUTURA CFC – SISTEMA DE DESLIZAMENTO:  $\{111\}$   
 $\langle 110 \rangle$ . QUATRO PLANOS  $\{111\}$  E 3 DIREÇÕES  $\langle 110 \rangle$  - 12  
SISTEMAS DE DESLIZAMENTO.**

## SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO

**Table 7.1** Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

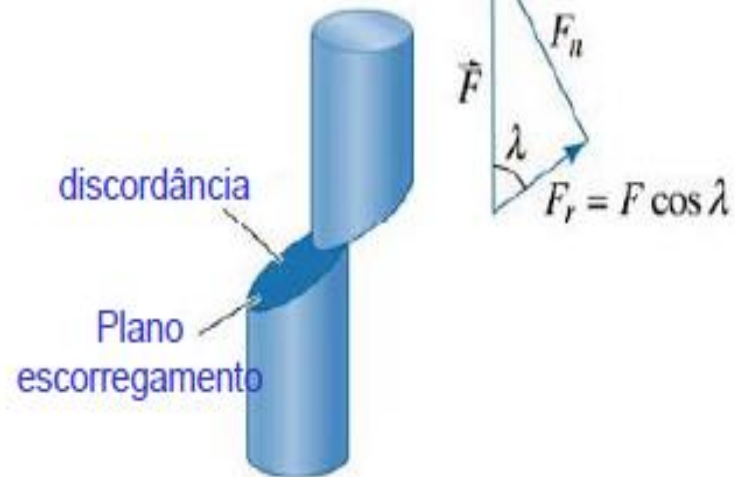
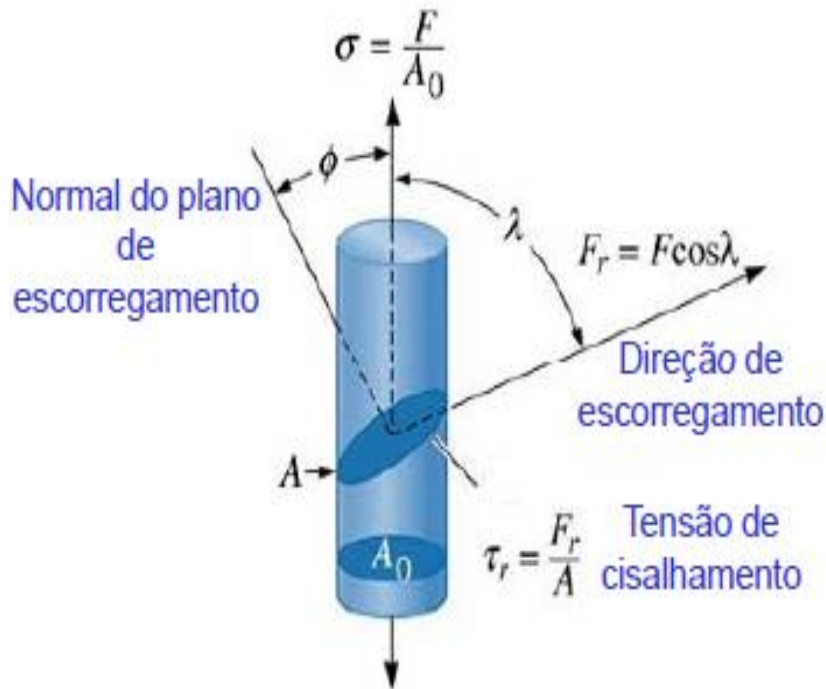
<i>Metals</i>	<i>Slip Plane</i>	<i>Slip Direction</i>	<i>Number of Slip Systems</i>
<b>Face-Centered Cubic</b>			
Cu, Al, Ni, Ag, Au	$\{111\}$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	12
<b>Body-Centered Cubic</b>			
$\alpha$ -Fe, W, Mo	$\{110\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
<b>Hexagonal Close-Packed</b>			
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM MONOCRISTAIS

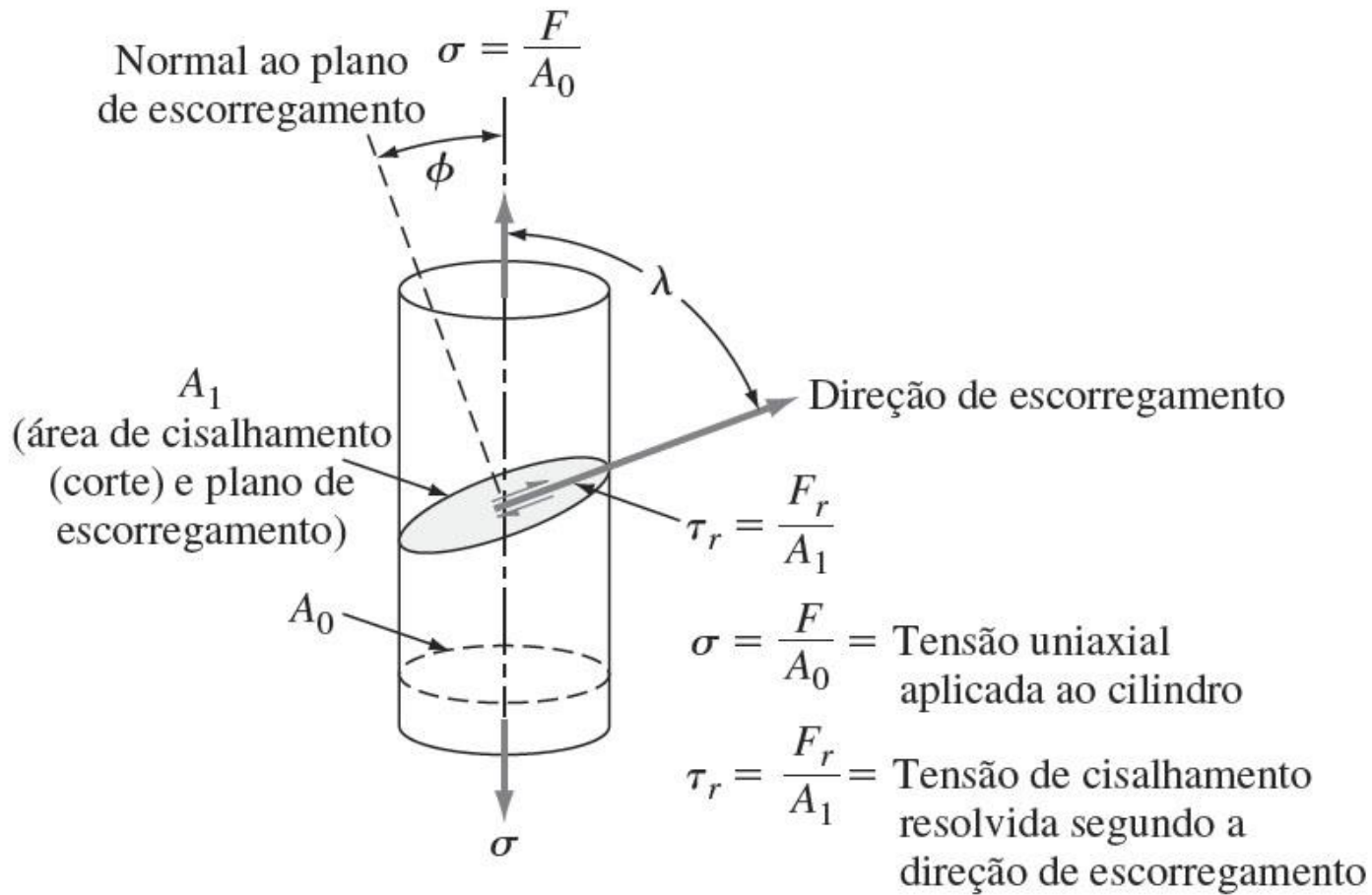
## TENSÃO CILHANTE CRÍTICA DECOMPOSTA – LEI DE SHIMIDT

$$\tau_r = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

(FONTE:  
ASKELAND)



A TENSÃO DE TRAÇÃO PODE SER DECOMPOSTA EM COMPONENTES QUE **DEPENDEM DA ORIENTAÇÃO DO PLANO E DA DIREÇÃO DE ESCORREGAMENTO.**



$$\tau_r = \frac{F_r}{A_1} = \frac{F \cos \lambda}{\frac{A_0}{\cos \phi}} = \frac{F}{A_0} \frac{\cos \lambda}{\frac{1}{\cos \phi}} = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM MONOCRISTAIS

## TENSÃO CILHANTE CRÍTICA DECOMPOSTA – LEI DE SHIMIDT

EXISTE UM SISTEMA DE ESCORREGAMENTO MAIS FAVORÁVEL QUE APRESENTA A TENSÃO CILHANTE RESOLVIDA MÁXIMA:

$$\tau_R(\max) = \sigma(\cos \phi \cos \lambda)_{\max}$$

PARA QUE O ESCOAMENTO TENHA INÍCIO A TENSÃO CILHANTE RESOLVIDA TEM QUE ATINGIR UM VALOR CRÍTICO:

$$\tau_R(\max) = \tau_{\text{crss}}$$

O “LIMITE DE ESCOAMENTO” DE UM MONOCRISTAL É DADO POR:

$$\sigma_y = \frac{\tau_{\text{crss}}}{(\cos \phi \cos \lambda)_{\max}}$$



## ESCOAMENTO EM MONOCRISTAIS

A CONDIÇÃO MÍNIMA PARA QUE OCORRA O ESCOAMENTO

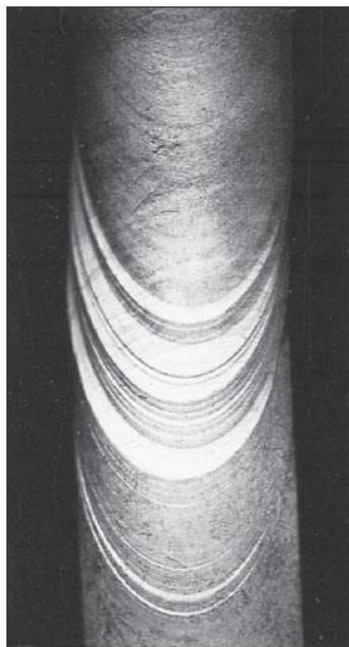
$$\phi = \lambda = 45^\circ$$

ENTÃO, O LIMITE DE ESCOAMENTO, NESTAS CONDIÇÕES:

$$\sigma_y = 2\tau_{\text{crss}}$$

# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS

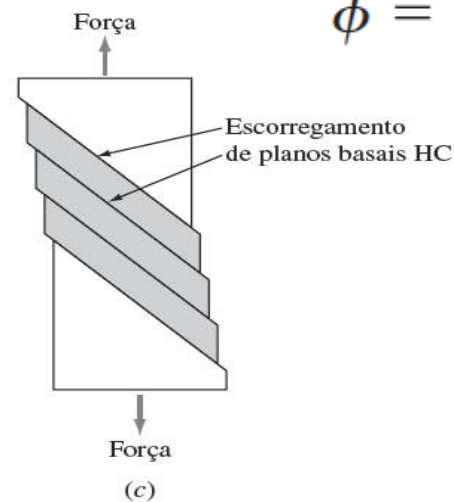
Monocristal de zinco deformado plasticamente, mostrando bandas de escorregamento: (a) vista frontal do cristal, (b) vista lateral do cristal, (c) vista lateral esquemática, indicando os planos basais de escorregamento no cristal HC e (d) indicação dos planos basais de escorregamento na célula unitária HC.



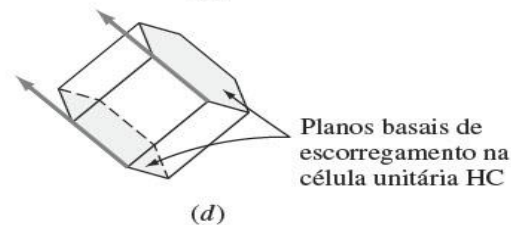
(a)



(b)



(c)



(d)

(FONTE: SMITH)

(As fotografias do monocristal de zinco foram cedidas pelo Prof. Earl Parker da University of California em Berkeley.)

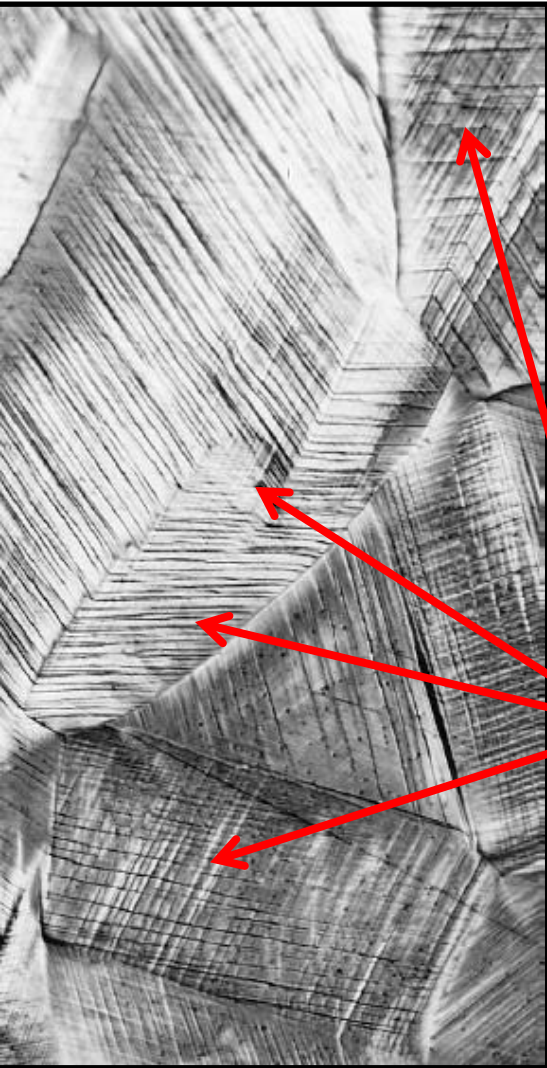
# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS

Metal	Estrutura cristalina	Pureza %	Plano de escorregamento	Direção de escorregamento	Tensão de cisalhamento crítica (MPa)
Zn	HC	99,999	(0001)	$[11\bar{2}0]$	0,18
Mg	HC	99,996	(0001)	$[1120]$	0,77
Cd	HC	99,996	(0001)	$[11\bar{2}0]$	0,58
Ti	HC	99,99	(1010)	$[11\bar{2}0]$	13,7
		99,9	(1010)	$[11\bar{2}0]$	90,1
Ag	CFC	99,99	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,48
		99,97	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,73
		99,93	(111)	$[1\bar{1}0]$	1,3
Cu	CFC	99,999	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,65
		99,98	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,94
Ni	CFC	99,8	(111)	$[1\bar{1}0]$	5,7
Fe	CCC	99,96	(110)	$[\bar{1}10]$	27,5
			(112)		
			(123)		
Mo	CCC		(110)	$[\bar{1}11]$	49,0

Fonte: G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 129.

(FONTE: SMITH)

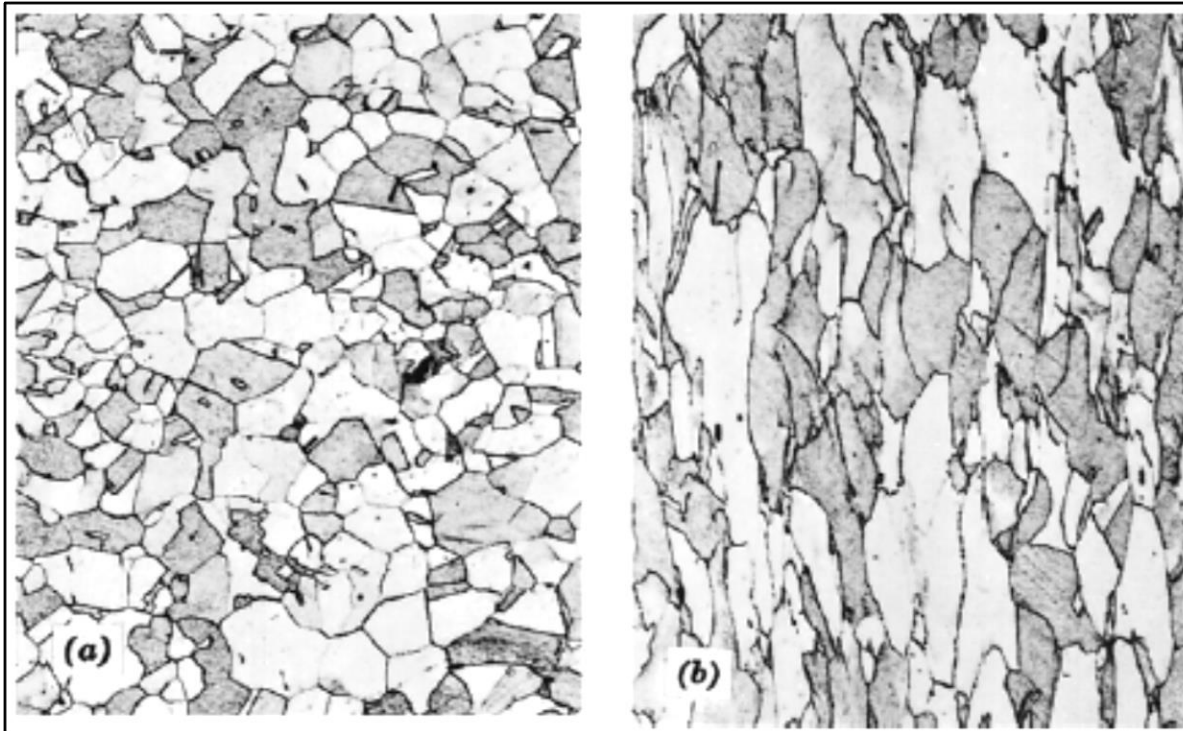
## OLHANDO AO MICROSCÓPIO ÓPTICO COMUM: AUMENTO 200X-



LINHAS DE ESCORREGAMENTO EM AMOSTRA DE **COBRE POLICRISTALINO**, POLIDA E DEFORMADA. AO MENOS DOIS SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO QUE SE CRUZAM, PODEM SER OBSERVADOS.

**LINHAS DE ESCORREGAMENTO QUE SE CRUZAM.**

**DIFERENTES ORIENTAÇÕES EM CADA GRÃO. ATAQUE NITAL3%.**



**GRÃOS EQUAXIAIS ANTES DA DEFORMAÇÃO(a) E ALONGADOS APÓS A DEFORMAÇÃO (b) DE UM METAL POLICRISTALINO.**

**Site da AluMATTER**

## **DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS POLICRISTALINOS**

- **O ESCORREGAMENTO OCORRE INDIVIDUALMENTE EM CADA GRÃO;**
- **DIREÇÃO DE ESCORREGAMENTO VARIA PARA CADA GRÃO;**
- **PARA CADA GRÃO, A LINHA DE DISCORDÂNCIA DESLIZARÁ NO SISTEMA DE ESCORREGAMENTO MAIS FAVORÁVEL;**
- **OS GRÃOS SE DEFORMAM COM O FATOR LIMITANTE DAS FRONTEIRAS COM OUTROS GRÃOS;**
- **NORMALMENTE, OS CONTORNOS DE GRÃO PERMANECEM ÍNTEGROS;**
- **O LIMITE DE ESCOAMENTO (L.E.) É MAIOR PARA OS MATERIAIS PLICRISTALINOS QUE PARA OS MONOCRISTAIS: RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS E INTERAÇÃO DAS LINHAS DE DISCORDÂNCIAS COM OS CG.**

# **PROPRIEDADES MECÂNICAS**

## PROPRIEDADES MECÂNICAS:

- **DUREZA;**
- **RESISTÊNCIA MECÂNICA;**
- **RIGIDEZ OU MÓDULO DE ELASTICIDADE;**
- **DUTILIDADE;**
- **TENACIDADE;**
- **TENACIDADE À FRATURA;**
- **TENACIDADE AO IMPACTO;**
- **RESISTÊNCIA À FADIGA;**
- **RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ALTA TEMPERATURA (FLUÊNCIA).**



## **PROPRIEDADES FÍSICAS:**

- DENSIDADE;**
- PROPRIEDADES ÓPTICAS;**
- PROPRIEDADES ELÉTRICAS;**
- PROPRIEDADES TÉRMICAS;**
- ESTABILIDADE DIMENSIONAL;**
- PONTO DE FUSÃO;**
- VISCOSIDADE;**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS:  
NÍVEL MACROSCÓPICO**

# RESISTÊNCIA MECÂNICA

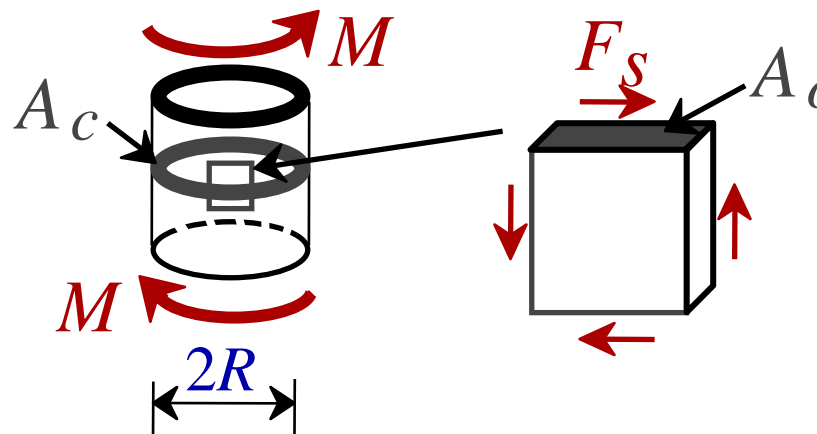
- Cabo em tração simples



$A_o$  = cross sectional area (when unloaded)



- Eixo solicitado em torção pura

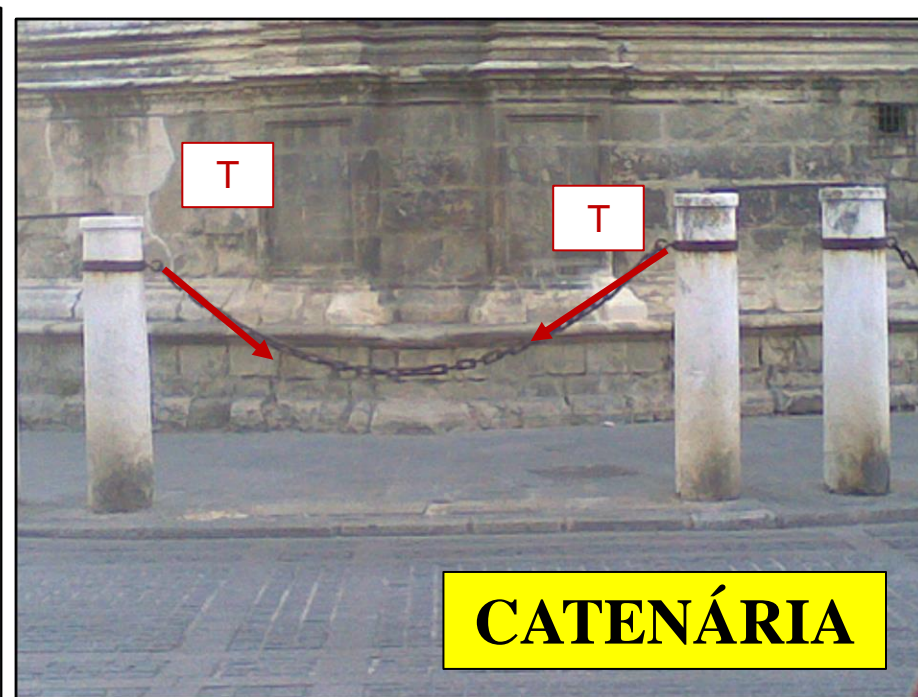
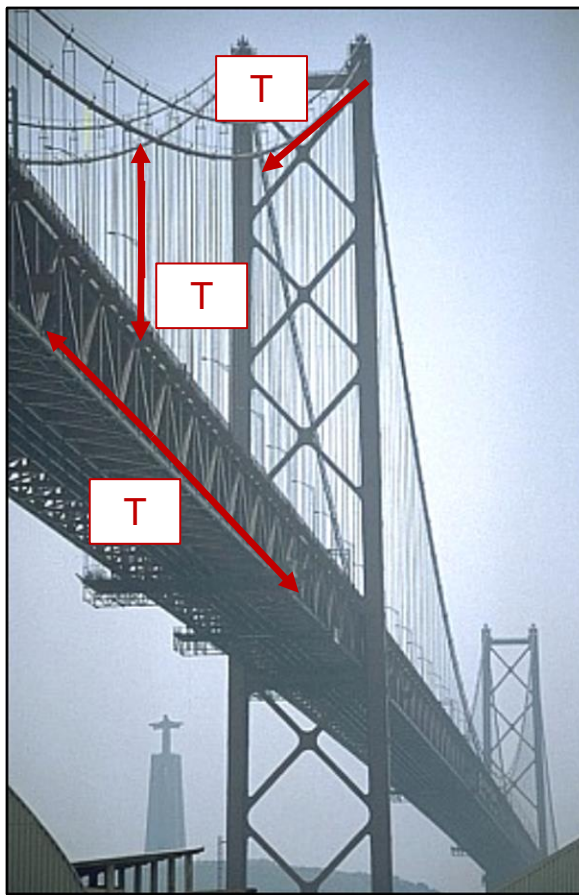


EXEMPLO: DISPOSITIVO DE TELEFÉRICO

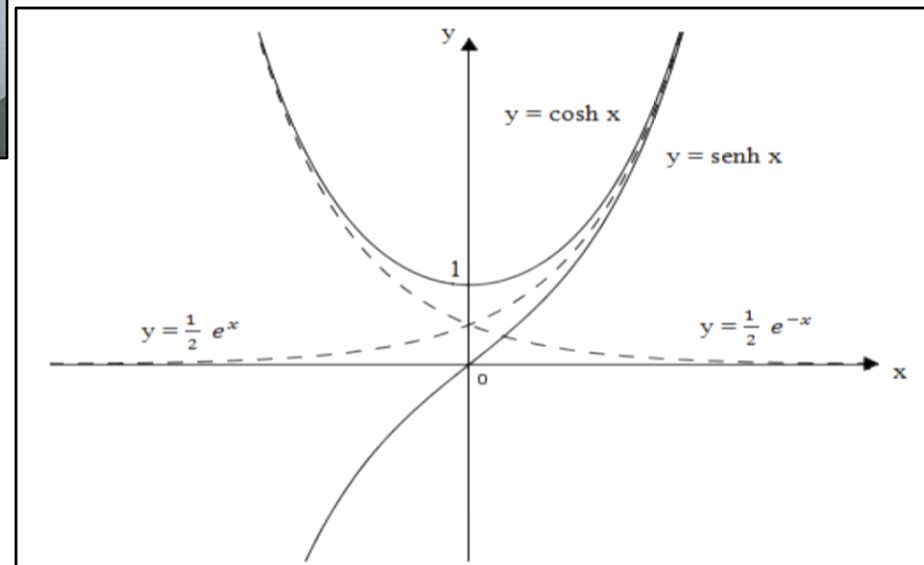
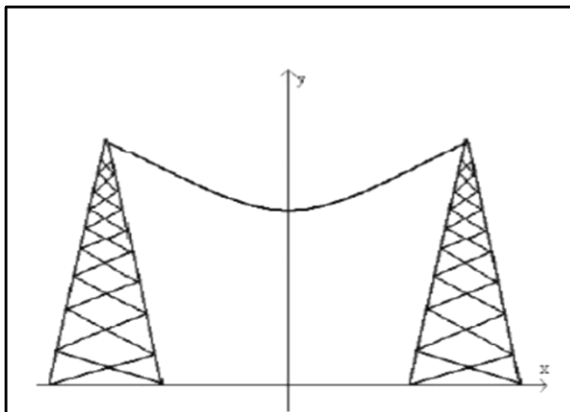
CASO REAL:

- TRAÇÃO;
- CORROSÃO;
- FRAGILIZAÇÃO(T↓);
- VIBRAÇÃO;
- FADIGA.

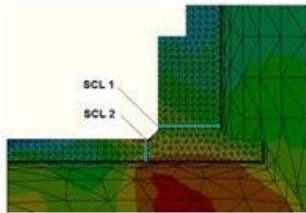
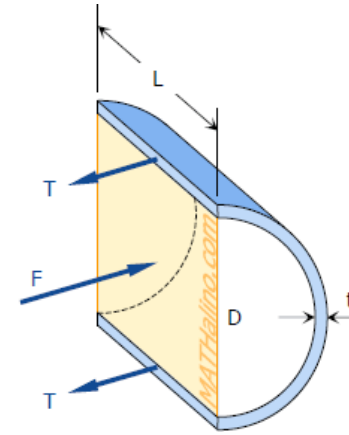
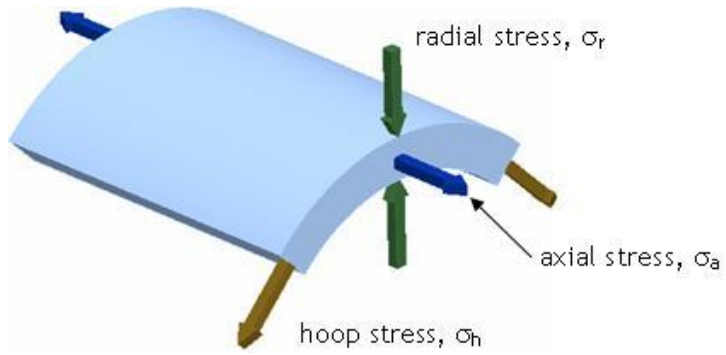
(Fonte:Callister)



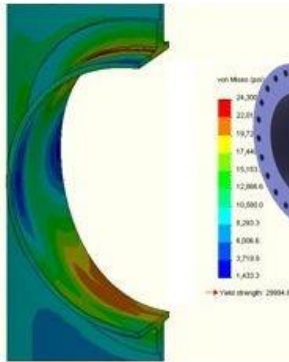
**CATENÁRIA**



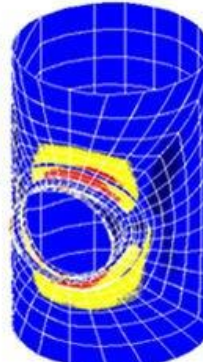
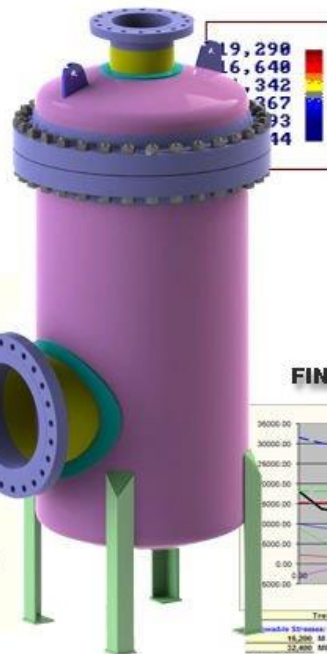
**Jesuíta Italiano Vincenzo Riccati (1707 – 1775)**



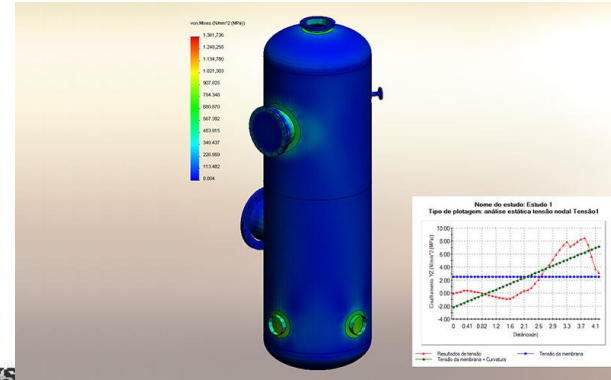
STRESS LINEARIZATION



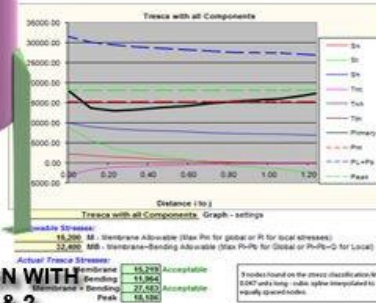
STRESS RESULT



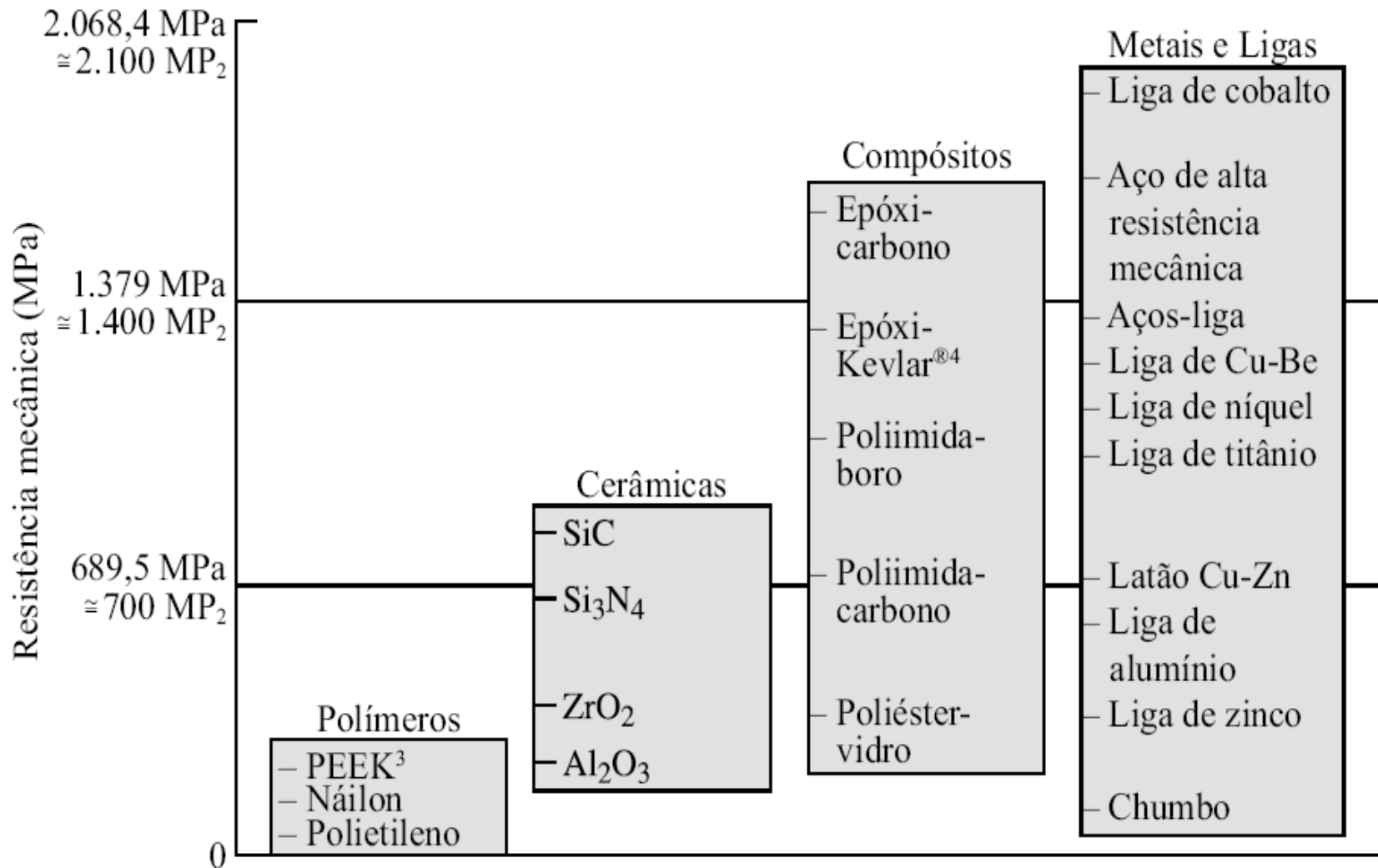
FINITE ELEMENT ANALYSIS



PRESSURE VESSEL DESIGN WITH ASME CODE VIII DIV. 1 & 2



# REPRESENTAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS VÁRIAS CATEGORIAS DE MATERIAIS



**PROPRIEDADES MECÂNICAS SÃO  
INFLUENCIADAS PELO  
PROCESSAMENTO: CONFORMAÇÃO  
MECÂNICA A FRIO OU A QUENTE  
(DEFORMAÇÃO PLÁSTICA),  
TRATAMENTOS TÉRMICOS, ETC.**

# PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO





**FIM**